

การศึกษาการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบเร่ง



นางสาวสมชบา สังกสิทธิเวชย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5273-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE STUDY ON LIFE ASSESSMENT OF IC BY ACCELERATED TESTING

Ms.Somchaba Sungstittivet

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5273-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบแรง
โดย นางสาวสมชบา สังกสิทธิเวชย์
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อาภรณ์ ชีรมงคลรัมย์)

..... กรรมการ
(นายสุรพล ปุณฺณานันท์)

สมชบา สังกิติวิทย: การศึกษาการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบเร่ง.(THE STUDY ON LIFE ASSESSMENT OF IC BY ACCELERATED TESTING) อาจารย์ที่ปรึกษา :
อ.ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ, 129 หน้า. ISBN 974-17-5273-3

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบเร่ง ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อเร่งให้ไอซีเกิดความล้มเหลวเร็วขึ้นโดยการเพิ่มความเค้น(Stress) จากนั้นจึงนำข้อมูลช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) ที่ได้จากการทดสอบเร่งไปประเมินอายุของไอซีที่สภาวะการใช้งานปกติโดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยังเป็นประโยชน์ในการอธิบายลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคุณภาพได้อีกด้วย เช่น การประเมินอัตราการเกิดความล้มเหลว (Failure Rate) เป็นต้น ความเค้นที่นำมาทดสอบ คือ อุณหภูมิและแรงดัน ไอซีที่ใช้ทดสอบเป็นไอซีประเภทหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash Memory) ซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตเป็นแบบ CMOS มีการห่อหุ้มแบบ TSOP (Thin Small Outline Package) จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งมีจำนวน 50 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบทั้งสิ้น 56 ครั้ง

การทดสอบสามารถประเมินอายุเฉลี่ยของไอซีได้ 187,790 ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี) โดยพิจารณาข้อมูลจากลักษณะความล้มเหลวชนิดเดียว (Single Failure Mode) และกำหนดให้ลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล เป็นเกณฑ์การกำหนดอายุเฉลี่ย (Mean Life)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470576121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : RELIABILITY / LIFE ASSESSMENT/ ACCELERATED TESTING

SOMCHABA SUNGSITTIVET : THE STUDY ON LIFE ASSESSMENT OF IC BY
ACCELERATED TESTING. THESIS ADVISOR : SOMBOON CHONGCHAIKIT, D.Ing.,
129 pp. ISBN 974-17-5273-3

This thesis is to study on life assessment of IC by accelerated testing, which accelerates IC to fail earlier by increasing stress. Then time-to-failure data, gathered from accelerated testing, will be used to evaluate life time in the normal operation condition by using suitable statistical theory and mathematical models. Moreover, the information gathered from the testing can describe other characteristics which concern about quality such as failure rate. The stresses used in this experiment are temperature and voltage. The testing performs with flash memory IC, which are fabricated by CMOS technology and TSOP(Thin Small Outline Package) packaging. Number of samples for each experiment is fifty. Fifty-six experiments are done.

The mean life time of IC, determining from the single failure mode, is about 187,790 hours (21 years) based on the failure mode relevant to the speed of IC.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Electrical Engineering... Student's Signature.....

Field of study...Electrical Engineering... Advisor's Signature.....

Academic year...2003..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อ.ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีในการทำงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณสุรพล ปุณฺณภินันท์ ที่ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าได้เข้าไปทำงานวิจัยที่บริษัท เอเอ็มดี(ไทยแลนด์) จำกัด และให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ Reliability Lab และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ นิสิตในสังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ได้เข้ามาศึกษาและทำงานวิจัย

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ของข้าพเจ้าที่ได้เลี้ยงดูสนับสนุนด้านการศึกษาด้วยดีตลอดมา และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่	
2. การทดสอบแรงและทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทดสอบแรง.....	4
2.2 ฟังก์ชันการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์(Life Distribution Function).....	12
2.2.1 ฟังก์ชันทางสถิติเบื้องต้น	12
2.2.2 การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	13
2.2.3 การแจกแจงแบบล็อกปกติ	16
2.2.4 การแจกแจงแบบไวบูลล์	19
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น	22
2.3.1 ความสัมพันธ์อาร์เรเนี่ยส.....	23
2.3.2 ความสัมพันธ์กำลังผกผัน.....	30
2.3.3 ความสัมพันธ์ T-NT	35
2.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์	41
2.4.1 วิธีเชิงกราฟ(Graphical Method).....	41

2.4.1.1 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Probability Plotting)	42
2.4.1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น (Life-Stress Relationship Plotting).....	49
2.4.2 วิธีเชิงเลข (Numerical Method).....	52
2.4.2.1 วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least Square Error Method).....	52
2.4.2.2 วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method)	55
บพที่	
3. กลไกความล้มเหลวที่เกิดกับไอซีและการทดสอบไอซี.....	58
3.1 กลไกที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Failure Mechanism in Semiconductor Device)	60
3.1.1 ความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นทางไฟฟ้า (Electrical Stress Failure)...	60
3.1.2 ความล้มเหลวที่เกิดจากภายใน (Intrinsic Failure Mechanism).....	62
3.1.3 ความล้มเหลวที่เกิดจากภายนอก (Extrinsic Failure Mechanism).....	63
3.2 การทดสอบความเชื่อถือได้(Reliability Test).....	63
3.2.1 การทดสอบคุณลักษณะ(Characterization Test)	64
3.2.2 การทดสอบเพื่อคัดกรองผลิตภัณฑ์(Product Screen Test).....	66
3.2.3 การทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge Sensitivity Testing).....	67
3.2.4 การทดสอบเชิงความร้อน(Thermal Test)	70
3.2.5 การทดสอบเชิงความร้อน-เชิงกล(Thermal-Mechanical Test).....	71
3.2.6 การทดสอบความชื้น(Moisture Test).....	72
3.2.7 การทดสอบอื่น ๆ	73
3.3 การทดสอบทางไฟฟ้า (Electrical Test)	74
3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์ความล้มเหลว (Failure Analysis Techniques).....	75

บทที่

4. ข้อมูลทั่วไปของไอซีที่นำมาทดสอบและการออกแบบการทดสอบ	79
4.1 ข้อมูลทั่วไปของไอซีที่นำมาทดสอบ	79
4.2 การออกแบบการทดสอบ.....	80
4.2.1 การทดสอบเบื้องต้น.....	81
4.2.2 การทดสอบจริง.....	85
4.3 ขั้นตอนการนำไอซีเข้าทดสอบ.....	89

บทที่

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	93
5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นและการวิเคราะห์ผล.....	93
5.1.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน.....	93
5.1.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน.....	96
5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	98
5.2 ผลการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ผล.....	100
5.2.1 ผลการทดสอบจริง.....	100
5.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบจริง.....	103
5.3 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูล.....	112

บทที่

6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	114
6.1 สรุป	114
6.2 ข้อเสนอแนะ	115
รายการอ้างอิง	116
ภาคผนวก	117
ภาคผนวก ก แสดงตารางของ $\Phi[u]$	118
ภาคผนวก ข แสดงตารางของฟังก์ชันแกมมาของ n ($\Gamma[n]$).....	121
ภาคผนวก ค แสดงการลดระยะเวลาการทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test).....	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	129

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ช่วงเวลาก่อนล้มเหลวจากการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้น 3 ระดับ.....	50
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	82
ตารางที่ 4.1(ต่อ) เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	83
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	83
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	84
ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	86
ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส.....	87
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	88
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	94
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	95
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง.....	97
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันที.....	97
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	100
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส.....	101
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	102
ตารางที่ 5.8 สรุปผลการทดสอบที่ทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลว.....	103
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบและข้อมูลทั้งหมด.....	105
ตารางที่ 5.9 (ต่อ) ผลการทดสอบและข้อมูลทั้งหมด.....	106

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

๗

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ข้อมูลสมบูรณ	7
รูปที่ 2.2 ข้อมูลตัดทอน	7
รูปที่ 2.3 ความเค้นคงที่	8
รูปที่ 2.4 ความเค้นแบบขั้นบันได(Step Stress)	9
รูปที่ 2.5 ความเค้นแบบเพิ่มอย่างคงที่(Progressive Stress)	10
รูปที่ 2.6 ความเค้นแบบวัฏจักร(Cyclic Stress)	10
รูปที่ 2.7 ความเค้นแบบสุ่ม(Random Stress)	10
รูปที่ 2.8 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล	11
รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	15
รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบล็อกปกติ	18
รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบไวบูลล์	21
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น	23
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนี่ยส	25
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนี่ยสที่เป็นเชิงเส้น	26
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนี่ยสที่ค่า B ต่าง ๆ	27
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผัน	31
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันที่เป็นเชิงเส้น	31
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันที่ค่า n ต่าง ๆ	32
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิแบบ T-NTเมื่อแรงดันคงที่	36
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงดันแบบ T-NT เมื่ออุณหภูมิคงที่	37
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 1 ระดับ	43
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 3 ระดับ	44
รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 3 ระดับ เมื่อพิจารณาให้มีความชันเท่ากัน	44
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างกราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	46
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบล็อกปกติ	47
รูปที่ 2.26 กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์	49
รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น	51

สารบัญภาพ

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.28 สมการเชิงเส้นที่ค่า ρ ต่าง ๆ.....	55
รูปที่ 3.1 กราฟรูปร่างอาบนํ้า.....	59
รูปที่ 3.2 ความล้มเหลวจากความเค้นทางไฟฟ้าที่มากเกินไปในไอซี.....	61
รูปที่ 3.3 ความล้มเหลวที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตในไอซี.....	62
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการคงอยู่ของข้อมูล (Data Retention).....	64
รูปที่ 3.5 ภายในเครื่องทดสอบการคงอยู่ของข้อมูล (Data Retention).....	65
รูปที่ 3.6 การทดสอบความคงทนในการเขียน/ลบข้อมูล.....	66
รูปที่ 3.7 ผู้สำหรับการทดสอบการทำให้เข้าที่(Burn-in Test)	67
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลอง เชิงร่างกายมนุษย์ซึ่งมีช็อกเกิดสำหรับใส่ไอซี.....	68
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต กับแบบจำลองเชิงอุปกรณ์ถูกซาร์จ.....	69
รูปที่ 3.10 แผ่นเพลทที่มีประจุไฟฟ้าสถิต.....	70
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบวัฏจักรอุณหภูมิซึ่งจะมีทั้งส่วนของอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ.....	71
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการอบความดันไอนํ้า(Steam Pressure Pot)	72
รูปที่ 3.13 การทดสอบอุณหภูมิ-ความชื้น(Temperature - Humidity Bias)	73
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก.....	74
รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy (SEM)).....	76
รูปที่ 3.16 รูปภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยคลื่นเสียง (Scanning Acoustic Microscopy (SAM))	76
รูปที่ 3.17 ภาพขยายวงจรภายในที่ได้จากการเปิดตัวห่อหุ้ม ซึ่งแสดงให้เห็นความเสียหายที่เกิดขึ้น.....	77
รูปที่ 3.18 ภาพตัดขวางขยาย 5 เท่า ของไดโอด.....	78
รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปทางกายภาพของไอซีโดยมองจากด้านบนและด้านข้าง.....	79
รูปที่ 4.2 ขาต่าง ๆ ของไอซี.....	80
รูปที่ 4.3 ลักษณะภายนอกของไอซี.....	80
รูปที่ 4.4 การวัดอุณหภูมิบนตัวไอซีโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล.....	85

สารบัญภาพ

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.5 บอร์ดที่ใช้สำหรับใส่ไอซี.....	89
รูปที่ 4.6 เครื่องทดสอบสัญญาณเบื้องต้น.....	90
รูปที่ 4.7 แผ่นวงจร Driver สำหรับจ่ายสัญญาณนาฬิกา.....	90
รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายแรงดันให้กับไอซีในบอร์ด	90
รูปที่ 4.9 การนำบอร์ดเข้าทดสอบในตู้อบ.....	91
รูปที่ 4.10 ส่วนควบคุมอุณหภูมิและแหล่งจ่ายแรงดัน.....	91
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนรูปของสารประกอบบนหน้าไดน์ (Die Surface).....	98
รูปที่ 5.2 รอยไหม้ที่หน้าไดน์.....	99
รูปที่ 5.3 กราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์แบบไวบูลล์.....	107
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิ.....	108
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงดัน.....	109
รูปที่ 5.6 กราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้นปกติ.....	111
รูปที่ 5.7 แสดงผลการประมาณค่าอายุเฉลี่ยจากซอฟต์แวร์.....	112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตและประกอบตามมาตรฐานที่ต่างประเทศเป็นผู้กำหนด การทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไอซี (Integrated Circuit) ยังไม่ค่อยมีมากนัก โดยเฉพาะการวิจัยทางการประเมินคุณภาพของไอซี ขั้นตอนหนึ่งของการประเมินคุณภาพของไอซี คือ กระบวนการตรวจสอบความเชื่อถือได้ (Reliability) อายุของไอซีเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ระบุถึงความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์

การหาอายุของผลิตภัณฑ์ (Product Life) ในสภาวะการใช้งานปกติไม่สามารถกระทำได้เพราะอายุการใช้งานของไอซีมีช่วงยาวกว่าช่วงวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ (Product Life Cycle) การแข่งขันทางการตลาดและเทคโนโลยีในการผลิตปัจจุบันทำให้มีการเปลี่ยนรุ่นของผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการประเมินอายุของผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบเร่ง (Accelerated Testing) ซึ่งเป็นการทดสอบที่เพิ่มความเค้น (Stress) ให้สูงกว่าสภาวะการใช้งานปกติเพื่อทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลว (Failure) ในช่วงเวลาที่สั้นลง ความเค้นที่นิยมใช้ทดสอบไอซี คือ อุณหภูมิและแรงดัน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเร่งสามารถนำไปประเมินหาอายุการใช้งานของไอซีในสภาวะการใช้งานปกติโดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม อนึ่งการทดสอบเร่งยังทำให้การหาอายุการใช้งานทำได้ในเวลาที่รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการประเมินอายุสามารถนำไปแสดงข้อมูลอื่น ๆ เกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น แสดงอัตราการล้มเหลว (Failure Rate) ของผลิตภัณฑ์ เพอร์เซ็นต์ความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและวิจัยเบื้องต้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในทฤษฎีการทดสอบเร่งและการประเมินอายุของไอซี โดยหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษาและพัฒนากระบวนการตรวจสอบความเชื่อถือได้ที่ซับซ้อนกว่าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเข้าใจในทฤษฎีการทดสอบเร่ง
- 2) เพื่อศึกษาการประเมินอายุการใช้งานของไอซีโดยการทดสอบเร่ง
- 3) เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดความล้มเหลวของไอซี

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบเร่งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการทดสอบเพื่อประเมินอายุการใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
- 3) ทดสอบกับไอซีประเภทหน่วยความจำ (Flash Memory)

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบเร่ง รวมถึงเอกสาร, บทความและมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาลักษณะการเกิดความล้มเหลวของไอซี
- 3) ทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดความล้มเหลวของไอซีที่นำมาทดสอบ
- 4) ทดสอบจริง
- 5) วิเคราะห์ข้อมูลและอธิบายผลที่ได้โดยอาศัยความรู้ทางทฤษฎี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจทฤษฎีการทดสอบแรง
- 2) สามารถประเมินอายุการใช้งานของไอซีได้
- 3) สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การทดสอบเร่งและทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทดสอบเร่ง

การวิเคราะห์ข้อมูลอายุของผลิตภัณฑ์นั้นเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) ของผลิตภัณฑ์ ในสภาวะการใช้งานปกติความเป็นไปได้ในการหาช่วงเวลาก่อนล้มเหลวนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะเหตุผลหลายอย่าง เช่น ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีอายุการใช้งานนานขึ้น ช่วงเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์สั้นลงมาก เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีวิธีการเร่งทำให้ผลิตภัณฑ์เสียเร็วขึ้นกว่าสภาวะปกติเพื่อทำให้ผู้ผลิตทราบถึงข้อมูลต่าง ๆ เช่น กลไกของความล้มเหลว (Failure Mechanism) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับตัวผลิตภัณฑ์ หรือข้อมูลอายุ (Life Data) ของผลิตภัณฑ์ ฯลฯ ได้เร็วขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการทดสอบเร่ง (Accelerated Testing)

ความหมายของการทดสอบเร่ง [1]

การทดสอบเร่ง คือการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อให้อายุของผลิตภัณฑ์สั้นลง หรือเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพการใช้งานเร็วขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาวิเคราะห์ถึงอายุหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ นอกจากนี้การทดสอบเร่งยังสามารถช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้ด้วย

ชนิดของการทดสอบเร่ง [2]

การทดสอบเร่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพ (Qualitative Accelerated Testing)

เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบข้อมูลความล้มเหลว (Failure) ของผลิตภัณฑ์ สามารถเรียกได้หลายแบบเช่น Elephant Test Torture Test และ Shake & Bake Test การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพจะทดสอบด้วยความเค้น (Stress) ชนิดต่าง ๆ ถ้ากลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบไม่เกิดความล้มเหลวแสดงว่าสามารถผ่านการทดสอบนี้ได้ แต่ถ้าไม่ผ่านจะต้องมีการ

ปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เพื่อกำจัดสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลว อย่างไรก็ตามถ้ามีการออกแบบที่ไม่ถูกต้องเหมาะสมก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความล้มเหลวในแบบที่ไม่อาจเกิดได้ในสภาวะการใช้งานจริง

การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพที่ดีต้องเป็นการทดสอบที่ทำให้พบกลไกความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นได้ในสภาวะใช้งานปกติได้อย่างรวดเร็ว ปกติแล้วการทดสอบเร่งเชิงคุณภาพไม่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบข้อมูลอายุของผลิตภัณฑ์ แต่ข้อมูลที่ได้มาเช่น ชนิดและระดับความเค้นจะมีประโยชน์สำหรับการทดสอบเร่งเชิงปริมาณ (Qualitative Accelerated Testing)

2. การทดสอบเร่งเชิงปริมาณ (Quantitative Accelerated Testing)

เป็นการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลอายุของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และสามารถทราบถึงข้อมูลความเชื่อถือได้ (Reliability Information) ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์ที่อายุการใช้งานต่าง ๆ อายุเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ การตีกลับ (Reject) และค่าใช้จ่ายในการรับประกันสินค้า (Warranty Costs) การทดสอบเร่งเชิงปริมาณแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1) การทดสอบเร่งโดยเพิ่มอัตราการใช้งาน (Usage Rate Acceleration)

ใช้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ การทดสอบจะทำได้โดยการเพิ่มอัตราการใช้งานอย่างต่อเนื่อง หรือลดระยะเวลาไม่ใช้งาน (Off Time) ของผลิตภัณฑ์ให้น้อยลงนั่นเอง เช่น เครื่องปั๊มลมซึ่งปกติถูกใช้งานเพียงวันละ 2-3 ครั้ง สามารถทดสอบเร่งได้โดยการใช้งานให้ต่อเนื่องหลายรอบในแต่ละวันเป็นต้น หรือเพิ่มความเร็วในการใช้งาน เช่น เพิ่มความเร็วรอบในการทดสอบกับเบรค ซึ่งจะก่อให้เกิดความล้มเหลวเร็วขึ้นกว่าการทดสอบที่อัตราการใช้งานปกติ เป็นต้น

2.2) การทดสอบเร่งโดยเพิ่มความเค้น (Overstress Acceleration)

ใช้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์มีอัตราการใช้งานสูงหรือมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องในสภาวะปกติอยู่แล้ว การทดสอบทำได้โดยการเพิ่มความเค้นในระดับที่เกินกว่าระดับปกติเมื่อได้ช่วงเวลาก่อนล้มเหลวแล้ว สามารถประมาณค่ากลับไปยังสภาวะใช้งานปกติได้ การทดสอบ

เร่งด้วยวิธีนี้สามารถทดสอบโดยใช้ความเค้นต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า ความดัน การสั่นสะเทือน เป็นต้น

ชนิดของข้อมูล [1],[2]

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเร่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ข้อมูลสมรรถนะ (Performance Data)

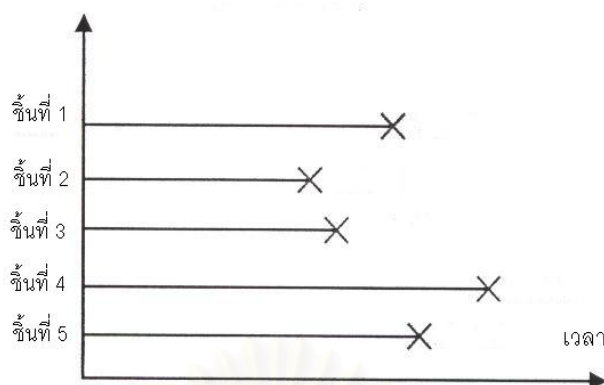
เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติการใช้งานที่เสื่อมลงตามอายุการใช้งาน ในการทดสอบนี้อาจทำได้โดยนำกลุ่มตัวอย่างไปทดสอบในสภาวะความเค้นสูง และวัดความสามารถในการใช้งานด้านต่าง ๆ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการเสื่อมถอย (Degradation Model) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะ อายุการใช้งาน และ ความเค้น

2. ข้อมูลอายุ (Life Data)

เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจ ข้อมูลอายุแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1) ข้อมูลสมบูรณ์ (Complete Data)

เป็นข้อมูลที่ได้จากอายุการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ หรือกล่าวได้ว่าเป็นข้อมูลที่ได้จากการที่ผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดสอบเกิดความล้มเหลวทั้งหมด ซึ่งทำให้ทราบช่วงเวลาก่อนล้มเหลว(Time-to-failure Data) ทั้งหมด เช่น ถ้านำผลิตภัณฑ์ 5 ชิ้นมาทดสอบ แล้วผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 ชิ้นนั้นเกิดความล้มเหลวหมดทั้ง 5 ชิ้น ดังรูป



รูปที่ 2.1 ข้อมูลสมบูรณ

2.2) ข้อมูลตัดทอน (Censored Data)

เป็นข้อมูลอายุตั้งแต่เริ่มทดสอบจนผลิตภัณท์ตัวอย่างล้มเหลวบางส่วน เช่นนำผลิตภัณท์ 5 ขึ้นมาทดสอบ และที่ระยะเวลาหนึ่งมีผลิตภัณท์ 3 ชั้นที่เกิดความล้มเหลว ส่วนอีก 2 ชั้นยังสามารถใช้งานต่อไปได้ ข้อมูลที่เหลือนี้ถือเป็นข้อมูลตัดทอน



รูปที่ 2.2 ข้อมูลตัดทอน

ในทางปฏิบัติการทดสอบเร่งนิยมเก็บข้อมูลอายุแบบตัดทอนเนื่องจากประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย และเพียงพอสำหรับการทราบการกระจายของอายุเพียงช่วงต้นของการใช้งาน ข้อมูลตัดทอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

- **ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 1 (Type I Censoring, Time Censoring)** คือการเก็บข้อมูลโดยจำกัดเวลาการทดสอบ นั่นคือจะหยุดทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด ตัวอย่างใดที่ไม่เกิดความล้มเหลวจะทำการบันทึกเวลาที่สิ้นสุดการทดสอบไว้แทน

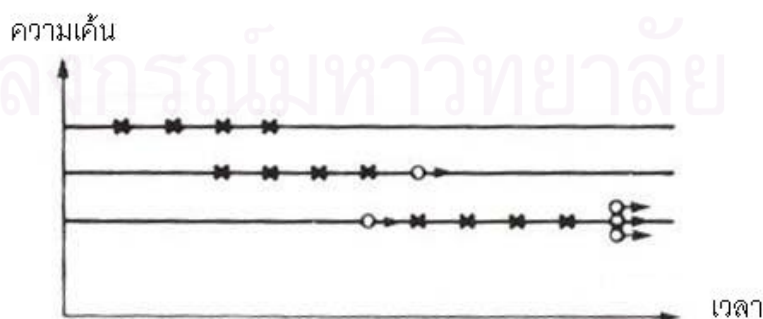
- **ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 2 (Type II Censoring, Failure Censoring)** คือการเก็บข้อมูลโดยจำกัดจำนวนตัวอย่างที่เกิดความล้มเหลว นั่นคือจะหยุดทำการทดสอบเมื่อได้จำนวนผลิตภัณฑ์ที่เกิดความล้มเหลวตามที่ต้องการแล้ว ตัวอย่างที่ไม่ล้มเหลว ณ เวลานั้นจะทำการบันทึกเวลาที่สิ้นสุดการทดสอบไว้แทน

ความเค้น (Stress) [1],[2]

ความเค้นที่ใช้สำหรับการทดสอบเร่งมีมากมายหลายชนิดดังกล่าวมาแล้ว แต่สามารถจัดประเภทของความเค้นได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. ความเค้นที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time-Independent Stress)

หมายถึงระดับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบเร่งจะไม่แปรผันกับเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นระดับความเค้นคงที่ (Constant Stress) ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ในการทดสอบส่วนใหญ่นิยมใช้ความเค้นคงที่เพราะทำให้ง่ายต่อการทดสอบ นอกจากนี้แบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์การทดสอบเร่งที่มีระดับความเค้นคงที่



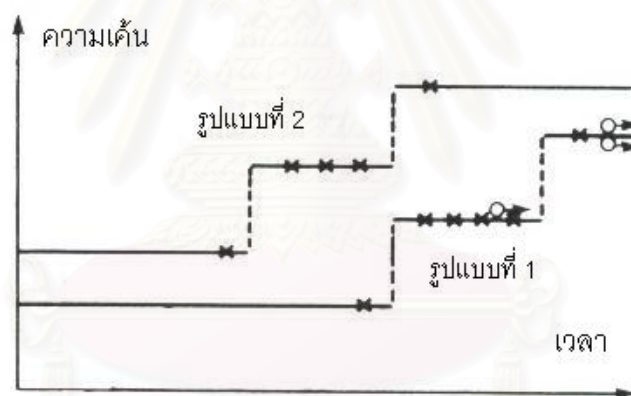
รูปที่ 2.3 ความเค้นคงที่

2. ความเค้นที่ขึ้นกับเวลา (Time Dependent Stress)

หมายถึงระดับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบแรงจะแปรผันตามช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบด้วย การทดสอบแรงด้วยความเค้นที่ขึ้นกับเวลาจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความล้มเหลวเร็วขึ้น แต่การทดสอบแบบนี้จะให้ความแม่นยำ (Accuracy) ของข้อมูลที่ได้น้อยกว่าการทดสอบแบบใช้ระดับความเค้นคงที่ นอกจากนี้การใช้ความเค้นที่ขึ้นกับเวลานั้นไม่เกิดขึ้นจริงกับการใช้งานปกติเพราะผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกใช้งานที่ระดับความเค้นคงที่ อีกทั้งแบบจำลองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ก็มีความซับซ้อนมากและยังไม่ค่อยมีผู้คิดค้นและพัฒนามากนัก

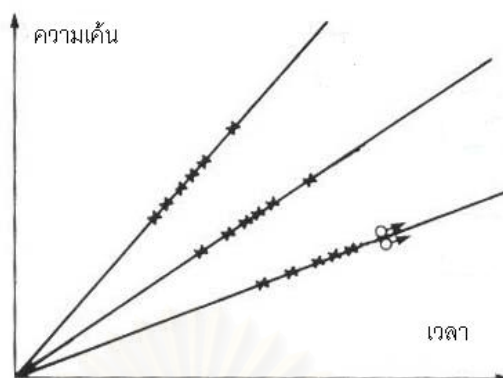
ความเค้นที่ขึ้นกับเวลายังแบ่งได้เป็นหลายแบบ คือ

ความเค้นแบบขั้นบันได (Step Stress) ความเค้นจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งและจะเพิ่มขึ้นแล้วคงที่อยู่อีกช่วงระยะเวลาหนึ่งไปเรื่อย ๆ โดยในกลุ่มตัวอย่างที่ต่างกันอาจมีรูปแบบของความเค้น (Stress Pattern) ที่ต่างกันได้



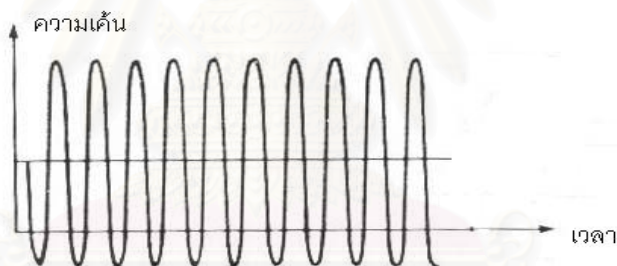
รูปที่ 2.4 ความเค้นแบบขั้นบันได (Step Stress)

ความเค้นแบบเพิ่มอย่างคงที่ (Progressive Stress) ความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ โดยในกลุ่มตัวอย่างที่ต่างกันอาจมีรูปแบบของความเค้นที่ต่างกันได้ การควบคุมระดับความเค้นแบบนี้ทำได้ยาก



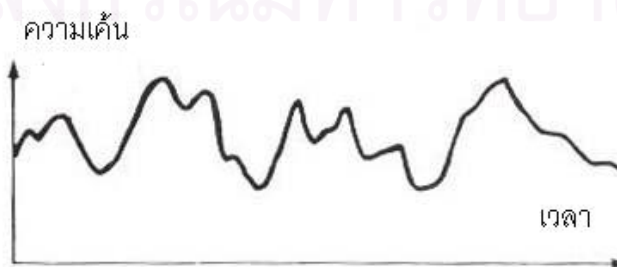
รูปที่ 2.5 ความเค้นแบบเพิ่มอย่างคงที่(Progressive Stress)

ความเค้นแบบวัฏจักร(Cyclic Stress) เป็นระดับความเค้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร เช่น การทดสอบแบบวัฏจักรอุณหภูมิ(Temperature Cycle Test)



รูปที่ 2.6 ความเค้นแบบวัฏจักร(Cyclic Stress)

ความเค้นแบบสุ่ม(Random Stress) เป็นระดับความเค้นที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

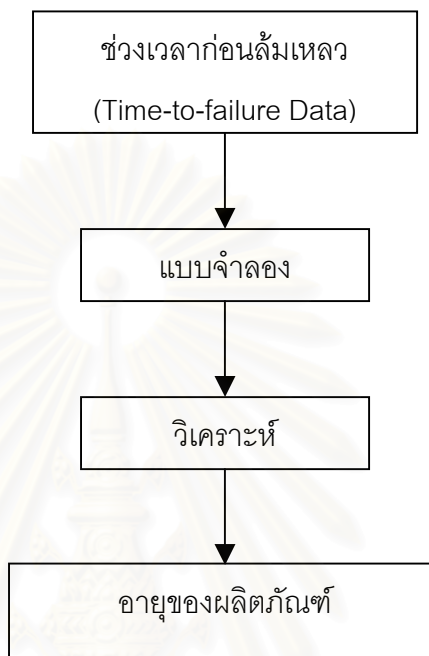


รูปที่ 2.7 ความเค้นแบบสุ่ม(Random Stress)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยคร่าว ๆ เป็นไปตามแผนภูมิสายงาน (Flow Chart)

ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทำการทดสอบเร่งและได้ช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) แล้ว จะนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่กับแบบจำลองซึ่งมีแบบจำลอง 2 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องคือแบบจำลอง ฟังก์ชันการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Function Model) และ แบบจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น (Life-Stress Relationship Model) จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ของ ผลิตภัณฑ์ในสภาวะการใช้งานปกติ เช่น อายุการใช้งานเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดความล้มเหลว (Failure Rate) เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงแบบจำลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่น่ามาใช้ต่อไป

ประโยชน์ของการทดสอบเร่ง [2]

- เพื่อประเมินอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในสภาวะการใช้งานจริง
- สามารถนำข้อมูลที่ได้มาแสดงความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์
- สามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การออกแบบที่ต่างกัน ของผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน เป็นต้น
- ใช้ทดสอบเพื่อแสดงความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความเชื่อถือได้มากขึ้น
- ใช้ทดสอบเพื่อแสดงความผิดพลาดที่เกิดจากการผลิต (Manufacturing Defects)
- ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปช่วยในการวางแผนเกี่ยวกับนโยบายการบริการและซ่อมบำรุง เช่น นำไปกำหนดระยะเวลาการรับประกันสินค้า เป็นต้น

2.2 ฟังก์ชันการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Function)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายลักษณะการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ สำหรับฟังก์ชันการแจกแจงของอายุผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution) , การแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution) และการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

2.2.1 ฟังก์ชันทางสถิติเบื้องต้น [1]

- ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function(cdf), $F(t)$)

แสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ล้มเหลว ณ เวลา t ซึ่งมีสมการดังนี้

$$F(t) = \int_0^t f(s) ds \quad (2.1)$$

- ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function $R(t)$)

แสดงความน่าจะเป็นของผลิตภัณฑ์ที่ยังสามารถทำงานได้อย่างปกติเมื่อใช้งานจนกระทั่งเวลา t

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.2)$$

- ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function $f(t)$)

เป็นฟังก์ชันที่แสดงฮิสโทแกรม (Histogram) ของอายุของผลิตภัณฑ์

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (2.3)$$

- ฟังก์ชันอันตราย (Hazard Function $h(t)$)

แสดงอัตราความล้มเหลวขณะใด ๆ (Instantaneous Failure Rate) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอายุของผลิตภัณฑ์

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

2.2.2 การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [1],[2]

การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลใช้อธิบายลักษณะอายุของผลิตภัณฑ์ประเภท Insulating oils and fluids (dielectrics) หรือ วัสดุฉนวนและผลิตภัณฑ์บางประเภท บ่อยครั้งจะมีการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลผิดพลาดได้ เนื่องจากการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นสามารถอธิบายได้เพียงช่วงต้น ๆ ของการแจกแจง [1]

- ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$)

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\theta}} ; t \geq 0 \quad (2.5)$$

โดยที่ θ คือ อายุเฉลี่ย หรือ MTTF (Mean Time To Failure)

- ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ($R(t)$)

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\theta}} \quad ; t \geq 0 \quad (2.6)$$

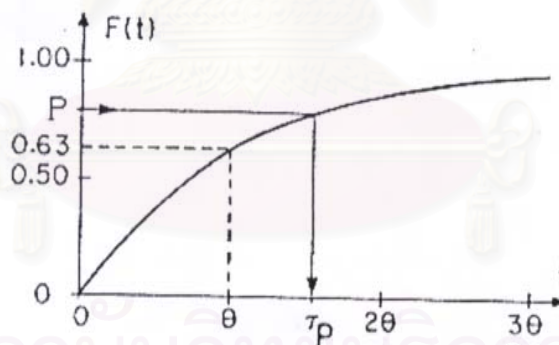
- ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{t}{\theta}} \quad ; t \geq 0 \quad (2.7)$$

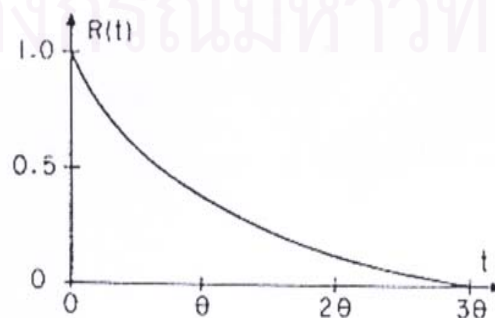
- ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

$$h(t) = \frac{1}{\theta} = \lambda \quad (2.8)$$

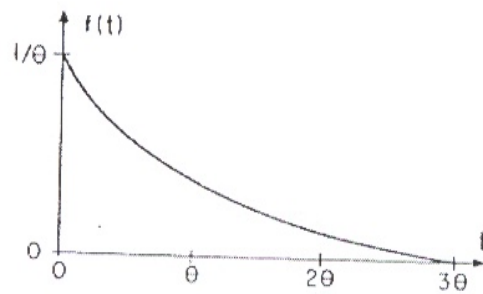
โดยที่ λ คือ อัตราความล้มเหลว (Failure Rate) จะสังเกตได้ว่าการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นจะมีอัตราความล้มเหลวคงที่เท่ากับ λ นั้นเอง



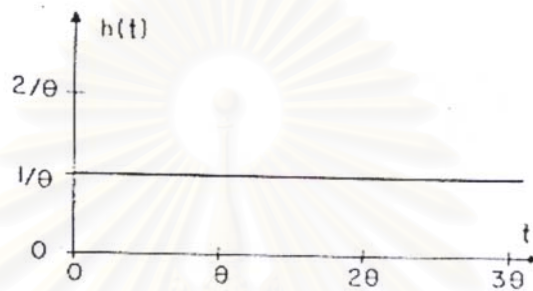
ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$)



ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ($R(t)$)



ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)



ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ค่าทางสถิติที่สำคัญของการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \theta \quad (2.9)$$

- 2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\hat{T} = 0.693 \cdot \theta \quad (2.10)$$

- 3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \theta \quad (2.11)$$

2.2.3 การแจกแจงแบบล็อกปกติ [1],[2]

การแจกแจงแบบล็อกปกตินิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ไดโอด ฯลฯ และ ผลิตภัณฑ์ประเภทฉนวนไฟฟ้า

การแจกแจงแบบล็อกปกติที่มีความคล้ายคลึงทางคณิตศาสตร์กับการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

- ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (F(t))

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงแบบปกติ มีสมการดังนี้

$$F(y) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \Phi\left[\frac{y-\mu}{\sigma}\right] \quad (2.12)$$

ดังนั้นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงแบบล็อกปกติ จะมีสมการดังนี้

$$F(T) = \Phi\left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}}\right] \quad (2.13)$$

โดยที่ T คือ ช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure)

T' คือ ลอการิทึมฐานธรรมชาติของ T ($\ln(T)$)

\bar{T}' คือ ค่าเฉลี่ยของ $\ln(T)$

$\sigma_{T'}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของ $\ln(T)$

ซึ่งค่าของ $\Phi [u]$ สามารถหาได้จากตาราง (ดูภาคผนวก ก)

- ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (R(t))

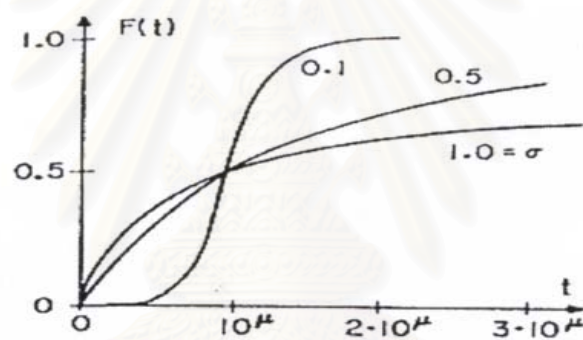
$$R(T) = 1 - \Phi\left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}}\right] \quad (2.14)$$

- ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)

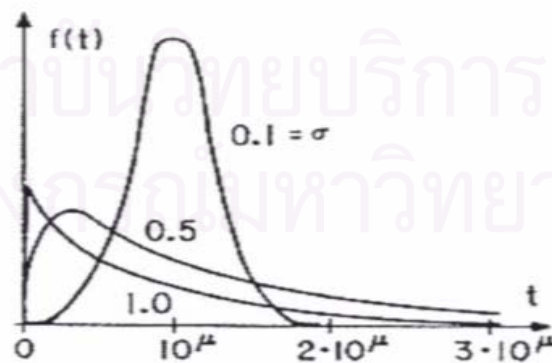
$$f(T) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2} \quad (2.15)$$

- ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

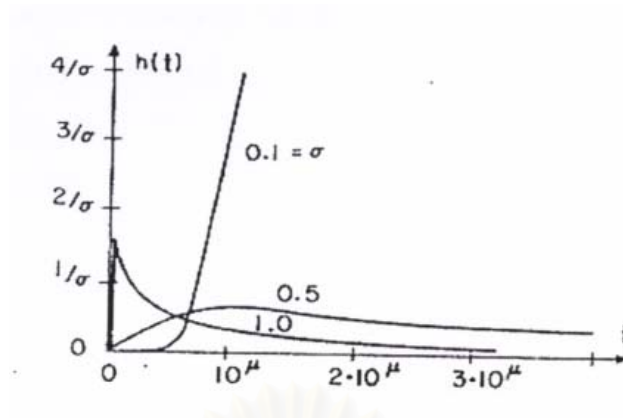
$$h(T) = \frac{\frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2}}{1 - \Phi \left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right]} \quad (2.16)$$



ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$)



ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)

ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบล็อกปกติ

ค่าทางสถิติที่สำคัญของการแจกแจงแบบล็อกปกติ

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = e^{\bar{T}' + \frac{1}{2}\sigma_T'^2} \quad (2.17)$$

ค่าเฉลี่ยของ $\ln(T)$ หาได้จาก

$$\bar{T}' = \ln(\bar{T}) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma_T'^2}{\bar{T}^2} + 1\right) \quad (2.18)$$

- 2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\hat{T} = e^{\bar{T}'} \quad (2.19)$$

- 3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2\bar{T}'+\sigma_T'^2}\right)\left(e^{\sigma_T'^2} - 1\right)} \quad (2.20)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\ln(T)$ หาได้จาก

$$\sigma_{T'} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_T^2}{T^2} + 1\right)} \quad (2.21)$$

2.2.4 การแจกแจงแบบไวบูลล์ [1],[2]

การแจกแจงแบบไวบูลล์เป็นที่นิยมใช้เพราะเป็นแบบจำลองที่แสดงการเพิ่ม-ลดของอัตราการล้มเหลวได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังใช้กับการแจกแจงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น ความคงทน ความยืดหยุ่น ความต้านทาน ฯลฯ การแจกแจงแบบนี้สามารถแสดงอายุของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้เช่น แบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

- ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$)

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad ; t > 0 \quad (2.22)$$

โดยที่ η คือ พารามิเตอร์สเกล (Scale Parameter)

β คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter)

- ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ($R(t)$)

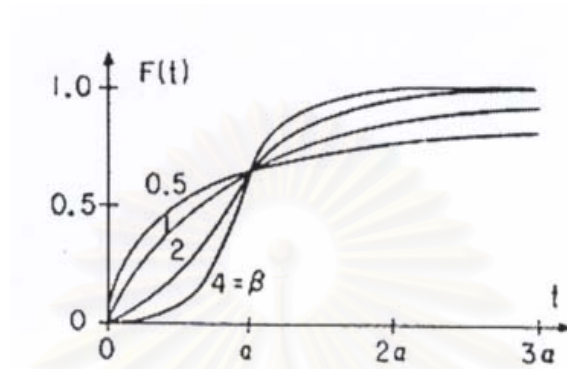
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.23)$$

- ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)

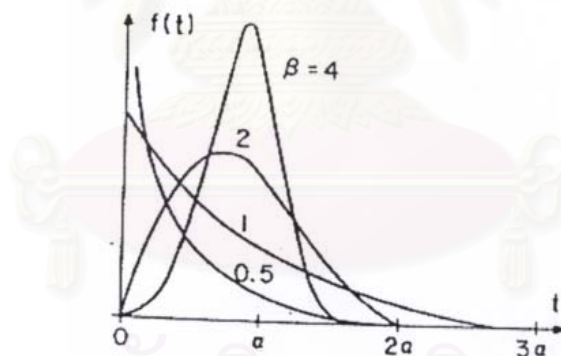
$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.24)$$

- ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

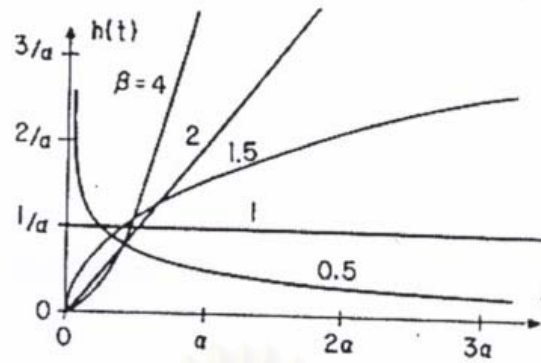
$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.25)$$



ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$)



ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ($f(t)$)

ฟังก์ชันอันตราย ($h(t)$)

รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบไวบูลล์

ค่าทางสถิติที่สำคัญของการแจกแจงแบบไวบูลล์

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.26)$$

โดยที่ $\Gamma(n)$ คือ ฟังก์ชันแกมมาของ n (ดูภาคผนวก ข)

- 2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\bar{T} = \eta \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.27)$$

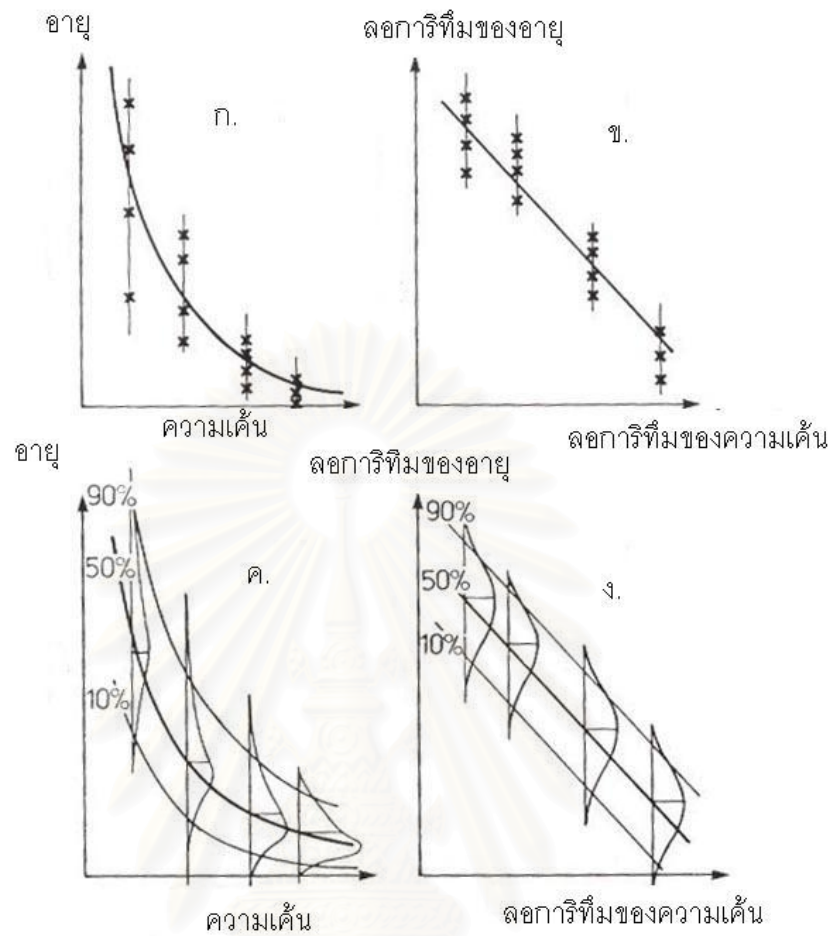
- 3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \eta \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (2.28)$$

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น

ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้นมีหลายชนิดด้วยกัน ขึ้นอยู่กับความเค้นที่นำมาใช้ทดสอบ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุและความเค้นที่นิยมใช้และนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยกัน 3 ชนิดได้แก่ความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius Relationship) , ความสัมพันธ์กำลังผกผัน (Inverse Power Relationship) และ ความสัมพันธ์ T-NT (Temperature-Nonthermal Relationship) โดยความสัมพันธ์ทั้งสามชนิดนี้จะใช้วิเคราะห์ในกรณีการทดสอบที่ระดับความเค้นคงที่

อายุของผลิตภัณฑ์ที่ความเค้นระดับต่ำ (Low Stress) จะมากกว่าที่ความเค้นระดับสูง (High Stress) ในการพล็อตกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้นนั้นกราฟจะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังรูปที่ 2.12(ก) ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้กราฟที่เป็นเชิงเส้น (Linear) ในการวิเคราะห์มากกว่าเพราะจะสะดวกในการประมาณค่า จึงต้องแปลงสมการของฟังก์ชันให้อยู่ในรูปเชิงเส้น ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.12(ข) สำหรับความเค้นแต่ละระดับจะมีการแจกแจงทางสถิติ (Statistical Distribution) ของอายุผลิตภัณฑ์ ซึ่งก็คือความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density) หรือ ฮิสโทแกรมของอายุของผลิตภัณฑ์ที่ความเค้นนั้น ๆ ดังที่เห็นเป็นรูปเส้นโค้งในรูปที่ 2.12(ค) และ 2.12(ง) ซึ่งในความเป็นจริงเส้นโค้งนี้จะตั้งฉากกับหน้ากระดาษ [1]



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น

2.3.1 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียส [1],[2]

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบเร่งที่ใช้ความเค้นเป็นอุณหภูมิ และเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงอายุของผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ แบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจากกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius Law) ซึ่งเป็นการอธิบายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

$$R = A e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (2.29)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

A คือ ค่าคงที่

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (eV)

k คือ ค่าคงที่โบลซ์มาน (8.617×10^{-5} eV/°C)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้นแบบอาร์เรเนียส คือ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยานั่นเอง

$$L = C e^{\frac{B}{V}} \quad (2.30)$$

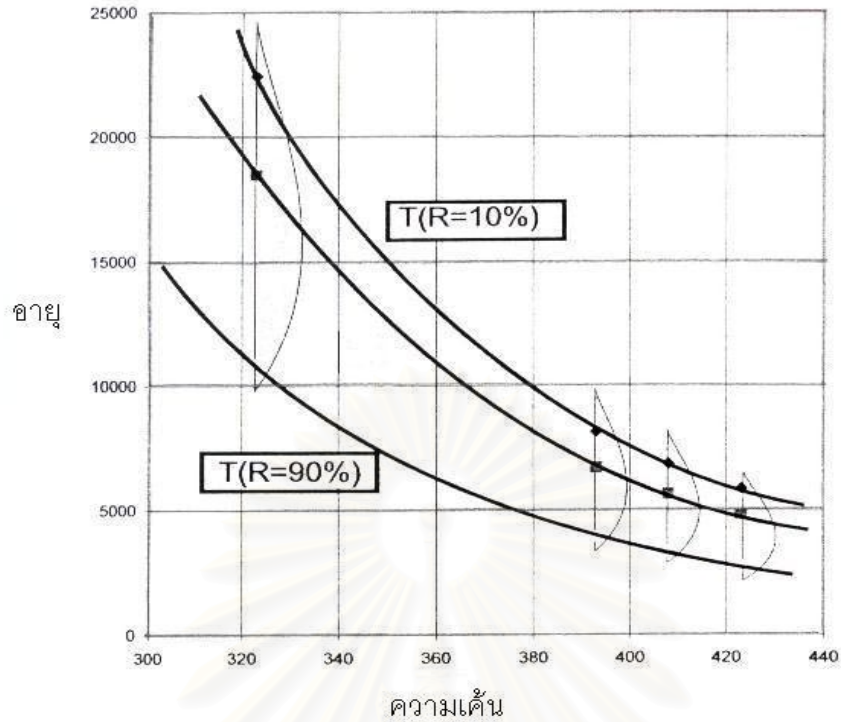
โดยที่ L คือ อายุของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเป็นอายุ (Life), อายุเฉลี่ย (Mean Life), อายุมัธยฐาน (Median Life)

V คือ ค่าความเค้น

C คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง

B คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง ($B = \frac{E_a}{k}$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

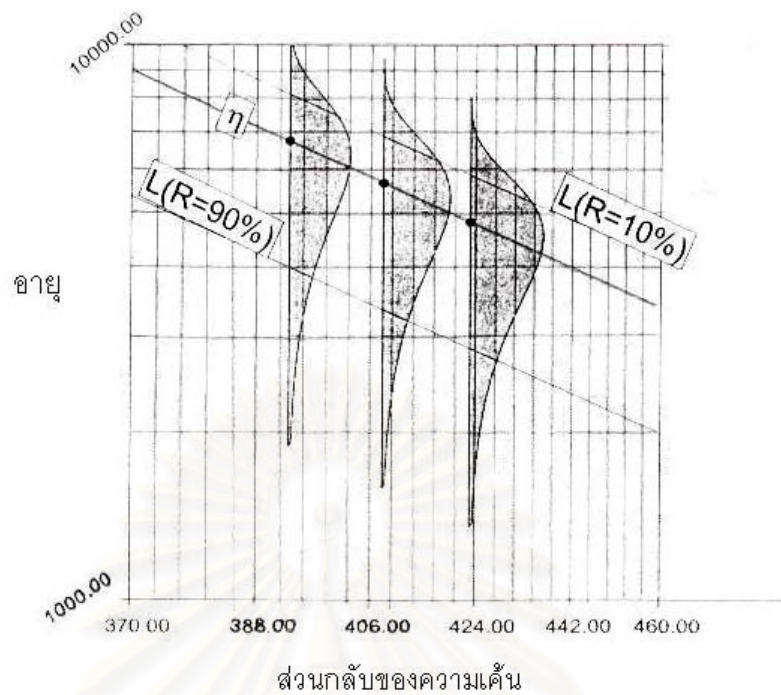


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียส

การทำความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียสให้เป็นเชิงเส้นนั้นทำได้โดยการใส่ลอการิทึมฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm) เข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ 2.30

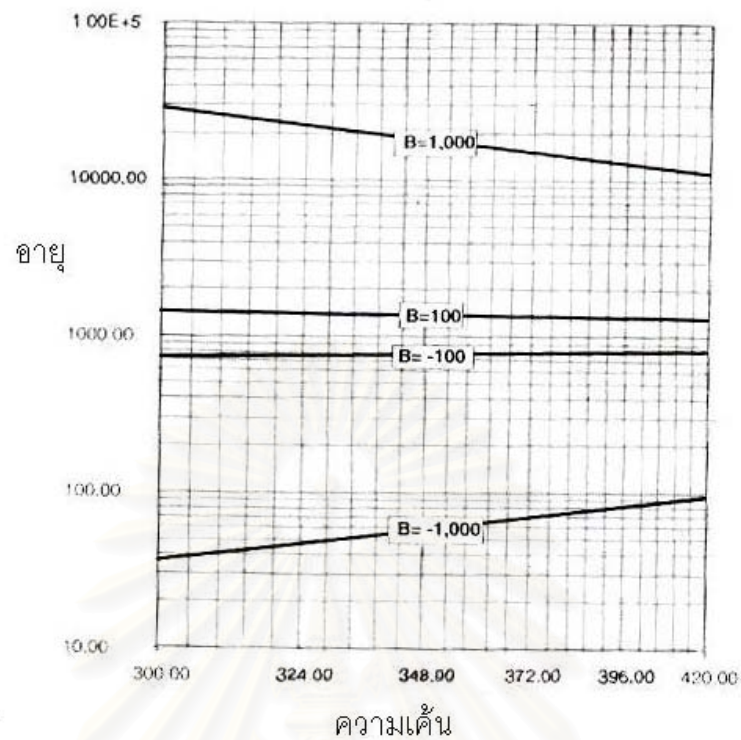
$$\ln(L) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (2.31)$$

กราฟที่ได้จะเป็นการพล็อตระหว่าง $\ln(L)$ ในแกน y และ $\frac{1}{V}$ ในแกน x แต่เพื่อความเข้าใจจึงไม่นิยมเขียนค่าส่วนกลับของความเค้นบนสเกลแกน x แต่จะเขียนเป็นค่าความเค้นแทน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียสที่เป็นเชิงเส้น

ค่าพารามิเตอร์ B เป็นตัวชี้วัดผลของความเค้น (อุณหภูมิ) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เมื่อค่า B มีค่ามากจะมีผลทำให้อายุของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น และที่ค่า $B < 0$ จะมีผลให้อายุของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียสที่ค่า B ต่าง ๆ

ตัวประกอบการเร่ง (Acceleration Factor, AF) ของความสัมพันธ์อาร์เรเนียส คือ อัตราส่วนของอายุปกติที่อุณหภูมิใช้งานปกติ และอายุที่อุณหภูมิค้นหาได้จาก

$$AF = \frac{L_u}{L_a} = e^{\left[\left(\frac{B}{V_u} - \frac{B}{V_a}\right)\right]} \quad (2.32)$$

โดยที่ L_u คือ อายุปกติ

L_a คือ อายุที่อุณหภูมิค้นหา

V_u คือ อุณหภูมิปกติ

V_a คือ อุณหภูมิค้นหา

- แบบจำลองอาร์เรเนิส-เอ็กซ์โพเนนเชียล [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองอาร์เรเนิส-เอ็กซ์โพเนนเชียลจะได้รับการแทนค่า θ ในสมการที่ 2.7 ด้วย สมการที่ 2.30 ดังนี้

$$f(t, V) = \frac{1}{C e^{\frac{B}{V}}} \cdot e^{-\frac{t}{C e^{\frac{B}{V}}}} \quad (2.33)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองอาร์เรเนิส-เอ็กซ์โพเนนเชียล จะเป็นดังนี้

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = C e^{\frac{B}{V}} \quad (2.34)$$

- 4) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\hat{T} = 0.693 \cdot C e^{\frac{B}{V}} \quad (2.35)$$

- 5) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = C e^{\frac{B}{V}} \quad (2.36)$$

- แบบจำลองอาร์เรเนิส-ล็อกปกติ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองอาร์เรเนิส-ล็อกปกติจะได้รับการแทนค่า \bar{T}' ในสมการที่ 2.15 ด้วย สมการที่ 2.31 ดังนี้

$$f(T, V) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2} \quad (2.37)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองอาร์เรเนิส-ล็อกปกติ จะเป็นดังนี้

1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = e^{\ln(C) + \frac{B}{V} + \frac{1}{2}\sigma_T^2} \quad (2.38)$$

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$T = e^{\ln(C) + \frac{B}{V}} \quad (2.39)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2\left(\ln(C) + \frac{B}{V} + \sigma_T^2\right)} \left(e^{\sigma_T^2} - 1 \right) \right)} \quad (2.40)$$

- แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์จะได้จากการแทนค่า η ในสมการที่ 2.24 ด้วย สมการที่ 2.30 ดังนี้

$$f(t, V) = \left(\frac{\beta}{C e^{\frac{B}{V}}} \right) \left(\frac{t}{C e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{C e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta}} \quad (2.41)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ จะเป็นดังนี้

1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = C e^{\frac{B}{V}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.42)$$

โดยที่ $\Gamma(n)$ คือ ฟังก์ชันแกมมาของ n (ดูภาคผนวกที่ 2)

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\bar{T} = C e^{\frac{B}{V}} \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.43)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = C e^{\frac{B}{V}} \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (2.44)$$

2.3.2 ความสัมพันธ์กำลังผกผัน [1],[2]

เป็นความสัมพันธ์ที่แสดงอายุของผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากความเค้นชนิดอื่นที่ไม่ใช่ความเค้นเชิงความร้อน (Non-thermal Stress) เช่นแรงดัน (Voltage) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$L = \frac{1}{KV^n} \quad (2.45)$$

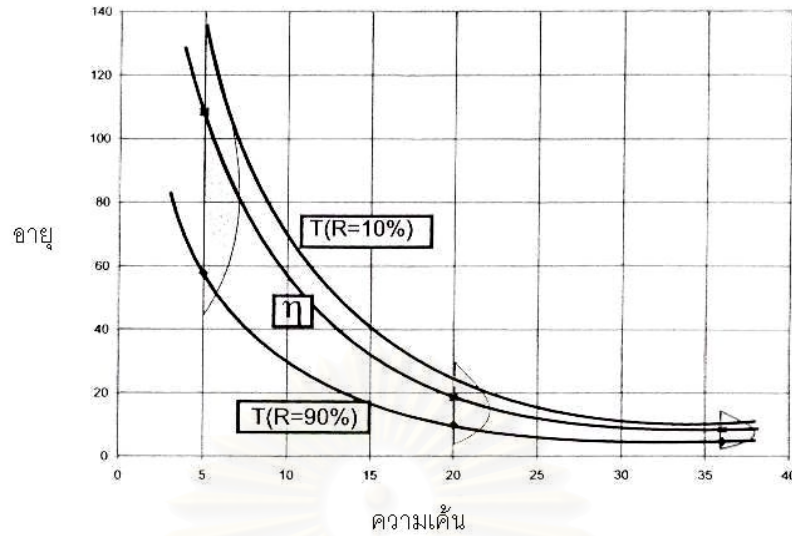
โดยที่ L คือ อายุของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเป็นอายุ(Life), อายุเฉลี่ย(Mean Life),
อายุมัธยฐาน(Median Life)

V คือ ค่าความเค้น

K คือ พารามิเตอร์ของฟังก์ชัน

n คือ พารามิเตอร์ของฟังก์ชัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



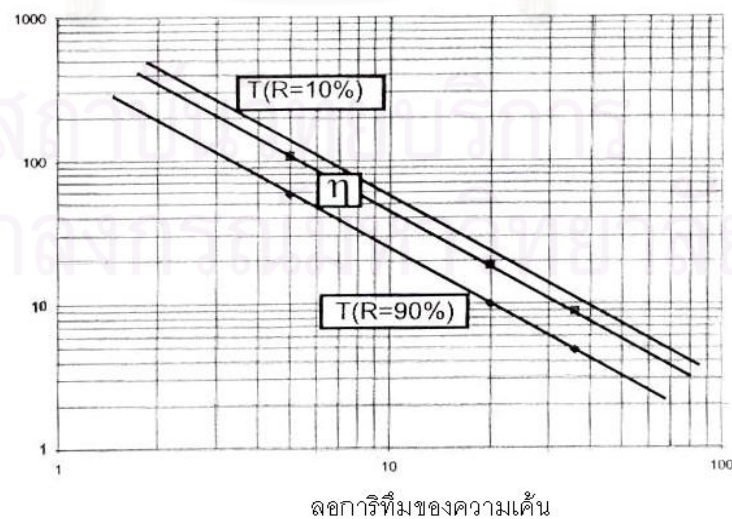
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผัน

การทำความเข้าใจระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันให้เป็นเชิงเส้นนั้นทำได้โดยการใส่ลอการิทึมฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm) เข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ 2.45

$$\ln(L) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (2.46)$$

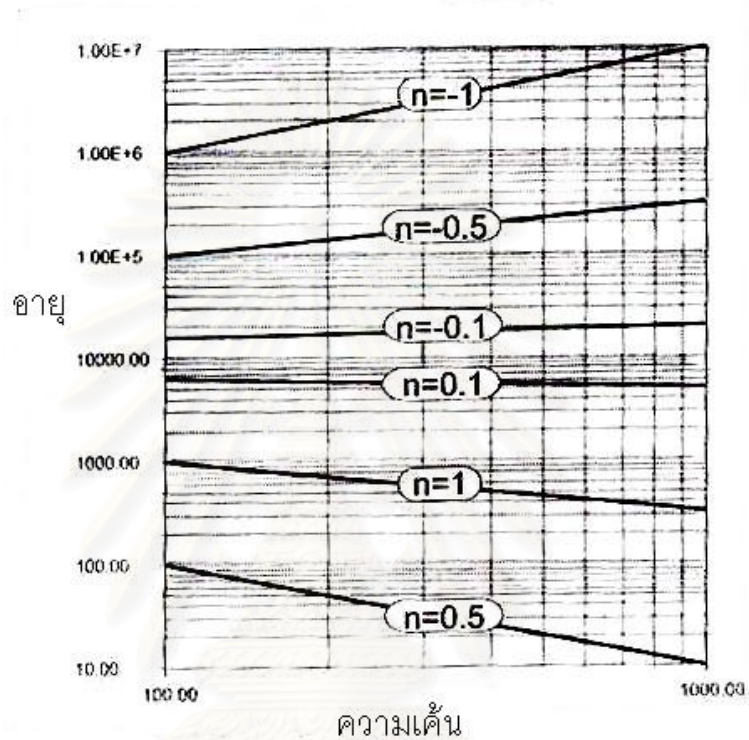
กราฟที่ได้จะเป็นการพล็อตระหว่าง $\ln(L)$ ในแกน y และ $\ln(V)$ ในแกน x และจากความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นแล้วนั้นจะได้ค่า K จากจุดตัดแกน y ค่า n คือค่าความชัน (Slope) ของกราฟนั่นเอง

ลอการิทึมของอายุ



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันที่เป็นเชิงเส้น

ค่าพารามิเตอร์ n เป็นตัวชี้วัดผลของความเค้นที่มีต่ออายุของผลิตภัณฑ์ได้ ที่ค่า $n > 0$ จะทำให้อายุของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อค่าของความเค้นเพิ่มขึ้น ค่า $n < 0$ ทำให้อายุของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น เมื่อค่า n เข้าใกล้ศูนย์จะไม่ส่งผลมากนักกับอายุผลิตภัณฑ์ แต่ถ้า $n = 0$ ความเค้นจะไม่มีผลเลยกับอายุของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันที่ค่า n ต่าง ๆ

ตัวประกอบการเร่ง (Acceleration Factor, AF) ของความสัมพันธ์กำลังผกผัน คืออัตราส่วนของอายุปกติที่ระดับแรงดันปกติและอายุที่ระดับแรงดันเค้นหาได้จาก

$$AF = \frac{L_u}{L_a} = \left(\frac{V_a}{V_u} \right)^n \quad (2.47)$$

โดยที่ L_u คือ อายุปกติ

L_a คือ อายุที่แรงดันเค้น

V_u คือ แรงดันปกติ

V_a คือ แรงดันเค้น

- แบบจำลองกำลังผกผัน- เอ็กซ์โพเนนเชียล [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (pdf) ของแบบจำลองกำลังผกผัน - เอ็กซ์โพเนนเชียลจะได้รับการแทนค่า θ ในสมการที่ 2.7 ด้วย สมการที่ 2.45 ดังนี้

$$f(t, V) = K V^n e^{-KV^n t} \quad (2.48)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองกำลังผกผัน- เอ็กซ์โพเนนเชียล จะเป็นดังนี้

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \frac{1}{KV^n} \quad (2.49)$$

- 2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$T = 0.693 \cdot \frac{1}{KV^n} \quad (2.50)$$

- 3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \frac{1}{KV^n} \quad (2.51)$$

- แบบจำลองกำลังผกผัน- ล็อกปกติ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (pdf) ของแบบจำลองกำลังผกผัน- ล็อกปกติจะได้รับการแทนค่า T' ในสมการที่ 2.15 ด้วย สมการที่ 2.46 ดังนี้

$$f(T, V) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \ln(K) + n \ln(V)}{\sigma_{T'}} \right)^2} \quad (2.52)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองกำลังผกผัน-ล็อกปกติ จะเป็นดังนี้

1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = e^{-\ln(K) - n \ln(V) + \frac{1}{2}\sigma_T^2} \quad (2.53)$$

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\hat{T} = e^{-\ln(K) - n \ln(V)} \quad (2.54)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2(-\ln(K) - n \ln(V)) + \sigma_T^2} \left(e^{\sigma_T^2} - 1 \right) \right)} \quad (2.55)$$

• แบบจำลองกำลังผกผัน-ไวบูลล์ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (pdf) ของแบบจำลองกำลังผกผัน-ไวบูลล์จะได้รับการแทนค่า η ในสมการที่ 2.24 ด้วย สมการที่ 2.45 ดังนี้

$$f(t, V) = (\beta K V^n) (K V^n t)^{\beta-1} \cdot e^{-(K V^n t)^\beta} \quad (2.56)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลองกำลังผกผัน-ไวบูลล์ จะเป็นดังนี้

1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \frac{1}{K V^n} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.57)$$

โดยที่ $\Gamma(n)$ คือ ฟังก์ชันแกมมาของ n (ดูภาคผนวก ข)

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\hat{T} = \frac{1}{K V^n} \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.58)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \frac{1}{KV^n} \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (2.59)$$

2.3.3 ความสัมพันธ์ T-NT [2]

ใช้สำหรับการทดสอบแรงที่ใช้ความเค้น 2 ชนิด โดยที่ความเค้นชนิดแรก คือ อุณหภูมิ และความเค้นชนิดที่สองเป็นความเค้นที่ไม่ใช่อุณหภูมิ เช่น แรงดัน ดังนั้นสมการของความสัมพันธ์นี้เป็นการรวมความสัมพันธ์อาร์เรเนียส และ ความสัมพันธ์กำลังผกผันเข้าด้วยกัน แสดงได้ดังสมการ

$$L = \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \quad (2.60)$$

โดยที่ L คือ อายุของผลิตภัณฑ์

U คือ ความเค้นที่ไม่ใช่อุณหภูมิ

n คือ พารามิเตอร์ของฟังก์ชัน

B คือ พารามิเตอร์ของฟังก์ชัน ($B = \frac{E_a}{k}$)

V คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์(เคลวิน)

การทำความสัมพันธ์ T-NT ให้เป็นเชิงเส้นนั้นสามารถทำได้โดยการใส่ลอการิทึมฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm) เข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ 2.60

$$\ln(L) = \ln(C) - n \ln(U) + \frac{B}{V} \quad (2.61)$$

เนื่องจากอายุของผลิตภัณฑ์นั้นขึ้นกับความเค้นสองชนิด ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นนั้นมี 2 แบบ โดยแต่ละแบบต้องกำหนดให้ความเค้นชนิดใดชนิดหนึ่งคงที่

ถ้ากำหนดให้แรงดันคงที่ จะได้สมการดังนี้

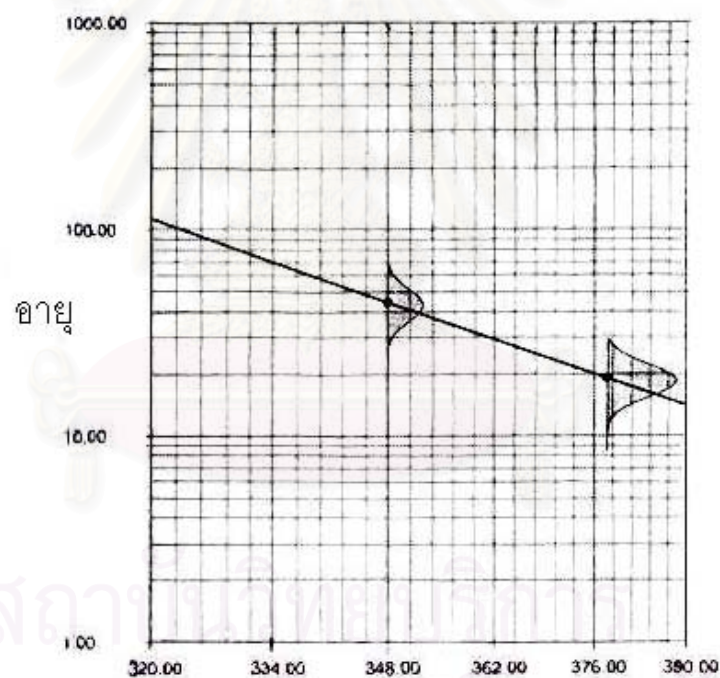
$$\ln(L) = C + \frac{B}{V} \quad (2.62)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่

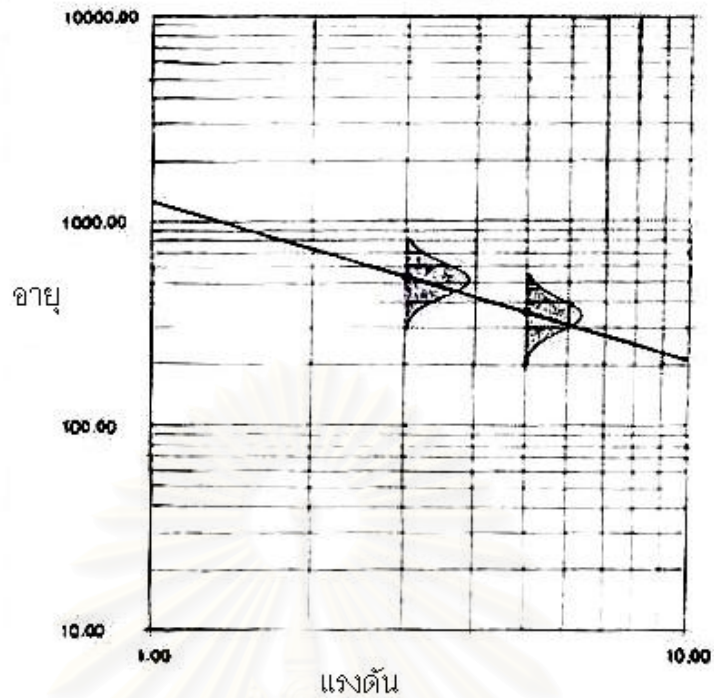
จะสังเกตได้ว่าสมการคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียสนั่นเอง และถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ จะได้สมการดังนี้

$$\ln(L) = C - n \ln(U) \quad (2.63)$$

สมการที่ได้นี้คล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผันนั่นเอง



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิแบบ T-NT เมื่อแรงดันคงที่



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงแผ่นดินไหวแบบ T-NT
เมื่ออุณหภูมิคงที่

จากสมการที่ (2.62) และ (2.63) จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ B และ n นั้นคือค่าความชันของกราฟนั่นเอง ค่าพารามิเตอร์ B และ n เป็นตัวชี้วัดผลของความเค้นที่มีต่ออายุของผลิตภัณฑ์ได้ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตัวประกอบการเร่ง (Acceleration Factor, AF) ของความสัมพันธ์ T-NT หาได้จากอัตราส่วนของอายุปกติที่แรงแผ่นดินไหวและอุณหภูมิปกติกับ อายุ (L_a) ที่แรงแผ่นดินไหวและอุณหภูมิเค้น (U_a, V_a) หาได้จาก

$$AF = \frac{L_u}{L_a} = \left(\frac{U_a}{U_u} \right)^n e^{B \left(\frac{1}{V_u} - \frac{1}{V_a} \right)} \quad (2.64)$$

โดยที่ L_u คือ อายุปกติ

L_a คือ อายุที่อุณหภูมิและแรงดันคั่น

U_u คือ แรงดันปกติ

U_a คือ แรงดันคั่น

V_u คือ อุณหภูมิปกติ

V_a คือ อุณหภูมิคั่น

จะเห็นได้ว่าตัวประกอบการเร่งของความสัมพันธ์ T-NT ก็คือ ผลคูณของตัวประกอบการเร่งของความสัมพันธ์อาร์เรเนียสและตัวประกอบการเร่งของความสัมพันธ์กำลังผกผันนั่นเอง ดังนั้นในการทดสอบเร่งอาจใช้ความเค้นหลายชนิดซึ่งสามารถนำมาประกอบกันได้ โดยมีสมมติฐานว่าความเค้นทั้งสองชนิดส่งผลต่ออายุของผลิตภัณฑ์อย่างเป็นอิสระต่อกัน [4]

- แบบจำลอง T-NT - เอ็กซ์โพเนนเชียล [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองกำลังผกผัน-เอ็กซ์โพเนนเชียลจะได้รับการแทนค่า θ ในสมการที่ 2.7 ด้วย สมการที่ 2.60 ดังนี้

$$f(t, U, V) = \frac{U^n}{C} \cdot e^{-\frac{B}{V}} \cdot e^{-\frac{U^n e^{\frac{B}{V}} \cdot t}{C}} \quad (2.65)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลอง T-NT - เอ็กซ์โพเนนเชียล จะเป็นดังนี้

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \quad (2.66)$$

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\bar{T} = 0.693 \cdot \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \quad (2.67)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \quad (2.68)$$

• แบบจำลอง T-NT - ล็อกปกติ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองกำลังผกผัน-ล็อกปกติจะได้จากการแทนค่า \bar{T}' ในสมการที่ 2.15 ด้วย สมการที่ 2.61 ดังนี้

$$f(T, U, V) = \frac{1}{T \sigma_{T'} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \ln(C) + n \ln(U) - \frac{B}{V}}{\sigma_{T'}} \right)^2} \quad (2.69)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลอง T-NT - ล็อกปกติ จะเป็นดังนี้

1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = e^{\ln(C) - n \ln(U) + \frac{B}{V} + \frac{1}{2} \sigma_{T'}^2} \quad (2.70)$$

2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$\bar{T} = e^{\ln(C) - n \ln(U) + \frac{B}{V}} \quad (2.71)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \sqrt{\left(e^{2(\ln(C) - n \ln(U) + \frac{B}{V}) + \sigma_T^2} \right) (e^{\sigma_T^2} - 1)} \quad (2.72)$$

• แบบจำลอง T-NT - ไวบูลล์ [2]

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(pdf)ของแบบจำลองกำลังผกผัน-ไวบูลล์จะได้จากการแทนค่า η ในสมการที่ 2.24 ด้วย สมการที่ 2.60 ดังนี้

$$f(t, U, V) = \left(\frac{\beta U^n e^{\frac{B}{V}}}{C} \right) \left(\frac{t U^n e^{\frac{B}{V}}}{C} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t U^n e^{\frac{B}{V}}}{C} \right)^\beta} \quad (2.73)$$

ค่าทางสถิติที่สำคัญของแบบจำลอง T-NT - ล็อกปกติ จะเป็นดังนี้

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ MTTF (Mean Time to Failure)

$$\bar{T} = \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.74)$$

โดยที่ $\Gamma(n)$ คือ ฟังก์ชันแกมมาของ n (ดูภาคผนวก ข)

- 2) ค่ามัธยฐาน (Median)

$$T = \frac{C}{U^n e^{\frac{B}{V}}} \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.75)$$

3) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$\sigma_T = \frac{C}{U^n e^{-\frac{B}{V}}} \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (2.76)$$

2.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ [1],[2],[3]

เมื่อได้ข้อมูลจากการทดสอบ (Time-to-failure) แล้ว จะนำข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละแบบจำลอง การประมาณค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีเชิงกราฟ (Graphical Method) และวิธีเชิงเลข (Numerical Method)

2.4.1 วิธีเชิงกราฟ (Graphical Method)

วิธีเชิงกราฟเป็นวิธีที่สามารถทำได้สะดวกและง่ายต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพราะการประมาณค่าจากกราฟทำให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระดับความแม่นยำต่าง ๆ ได้ การประมาณค่าด้วยกราฟเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นที่ทำให้ทราบวาแบบจำลองที่ใช้สำหรับการแจกแจงอายุนั้นเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มาหรือไม่

แต่การประมาณค่าด้วยกราฟมีข้อเสีย คือ กราฟที่ได้ อาจไม่มีความแม่นยำเพียงพอ และ ผู้วิเคราะห์ต่างคนกันจะมีความคิดเห็นที่ต่างกันจากข้อมูลชุดเดียวกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีร่วมกันคือวิธีเชิงกราฟ และวิธีเชิงเลขควบคู่กันไป

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นมีกราฟที่เกี่ยวข้อง 2 กราฟคือ กราฟแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Probability Plotting) ซึ่งจะแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความแม่นยำต่าง ๆ ตามรูปแบบการแจกแจงที่เหมาะสม (เอ็กซ์โพเนนเชียล ล็อกปกติ ไวบูลล์) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น (Life-Stress Relationship)

2.4.1.1 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Probability Plotting)

กราฟแสดงการแจกแจงอายุจะพล็อตบนกระดาษกราฟที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ ขึ้นอยู่กับรูปแบบการแจกแจง (เอ็กซ์โพเนนเชียล, ล็อกปกติ, ไวบูลล์) การแจกแจงแต่ละแบบก็จะมีรูปแบบของกระดาษกราฟโดยเฉพาะ [2]

กราฟแสดงการแจกแจงอายุจะพิจารณาจากฟังก์ชัน $F(t)$ (ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม, cdf) ของความเค้นแต่ละระดับ (ดูสมการที่ 2.2) ซึ่งฟังก์ชันการแจกแจงสะสมนั้นอาจถือได้ว่าเป็นฟังก์ชันของความไม่น่าเชื่อถือ (Unreliability) การพิจารณาฟังก์ชัน $F(t)$ จะพิจารณาในลักษณะของสมการเชิงเส้น ตามรูปแบบ $y = a + bx$ การทำให้ฟังก์ชัน $F(t)$ อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นนั้นจะแตกต่างกันตามสมการที่แตกต่างกันของการแจกแจงแต่ละรูปแบบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับการพล็อตกราฟนั้นค่าในแกน y จะเป็นค่าความไม่น่าเชื่อถือ ($F(t)$) และค่าในแกน x จะเป็นเวลา (Time)

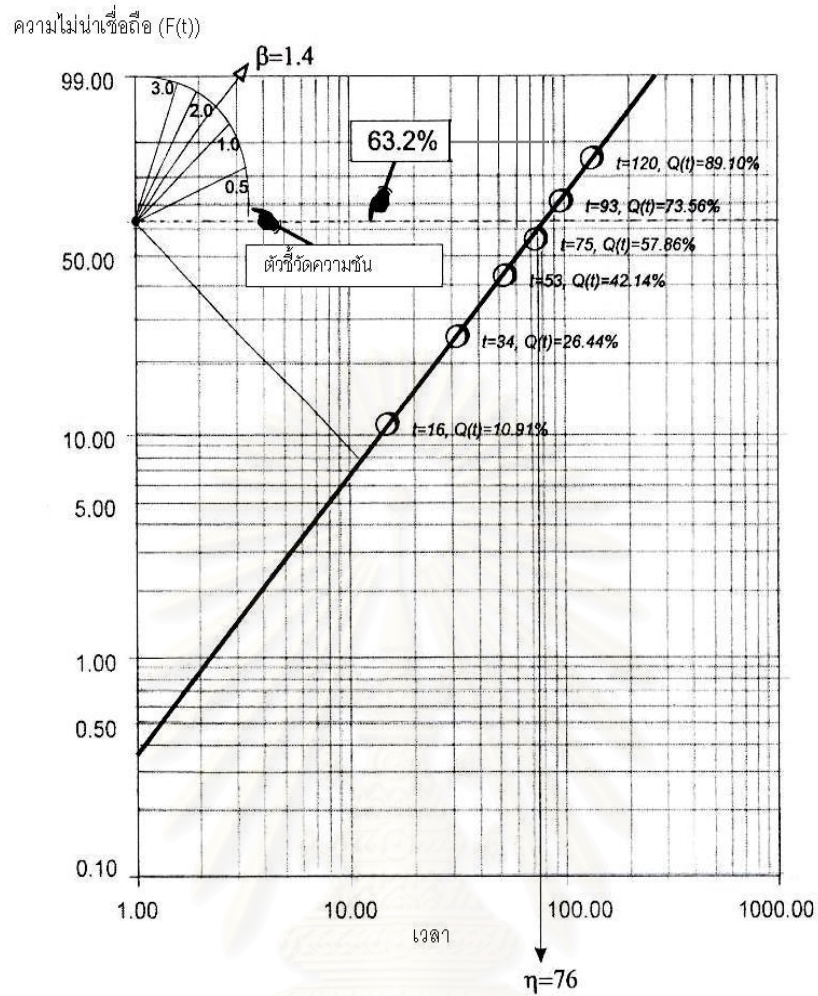
สำหรับข้อมูลสมบรูณ์การพิจารณาค่าแห่งพิกัดจุดในแกน y นั้นจะอาศัยการพิจารณาค่าแห่งจากการประมาณค่าแบบลำดับที่มีมัธยฐาน (Median Rank) ซึ่งเป็นการประมาณค่าความไม่น่าเชื่อถือของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในแต่ละลำดับ โดยสมการของลำดับที่มีมัธยฐาน เป็นดังนี้ [2],[3]

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (2.77)$$

โดยที่ F_i คือ ค่าความไม่น่าเชื่อถือของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นลำดับที่ i

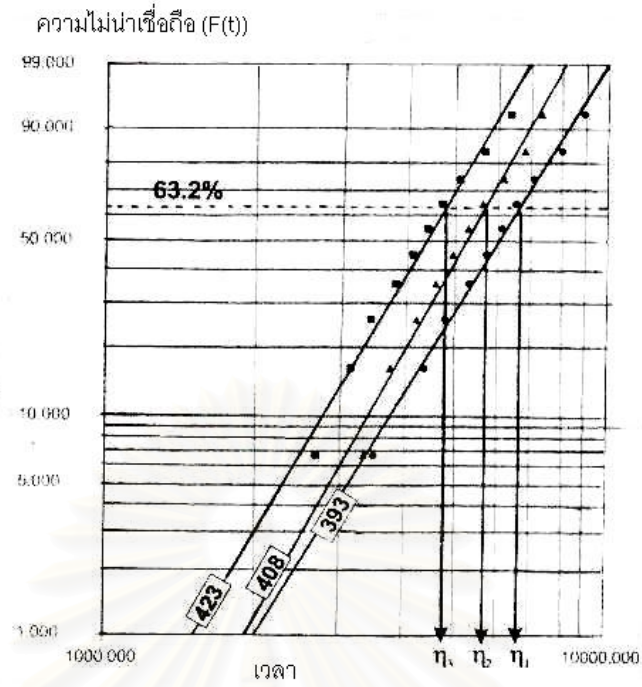
i คือ ลำดับที่เกิดความล้มเหลว

n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

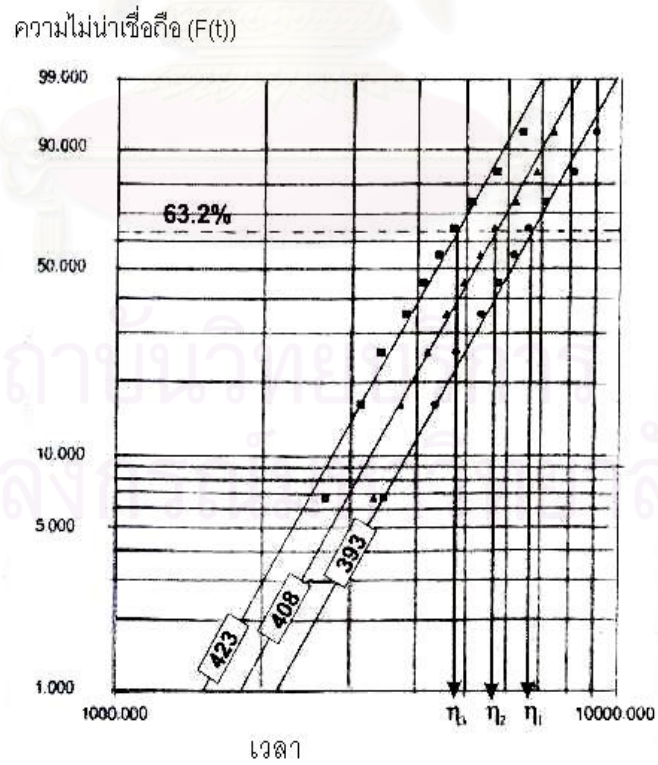


รูปที่ 2.21 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 1 ระดับ

เมื่อทราบตำแหน่งพิกัด (x,y) ในแต่ละจุดแล้ว จากนั้นลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านี้ โดยให้ลากผ่านจุดส่วนใหญ่ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หลังจากได้เส้นกราฟแล้วก็จะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากเส้นกราฟได้ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าเส้นกราฟแต่ละเส้นเป็นการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ของความเค้นแต่ละระดับ ดังนั้นความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นจะพิจารณาเสมือนว่ากราฟทุกเส้นมีความชันเท่ากัน โดยจะใช้ค่าความชันเฉลี่ยเพื่อพิจารณาข้อมูล [1],[2]



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 3 ระดับ



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการแจกแจงอายุของความเค้น 3 ระดับเมื่อพิจารณาให้มีความชันเท่ากัน

- กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [3]

จากสมการที่ 2.5 ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

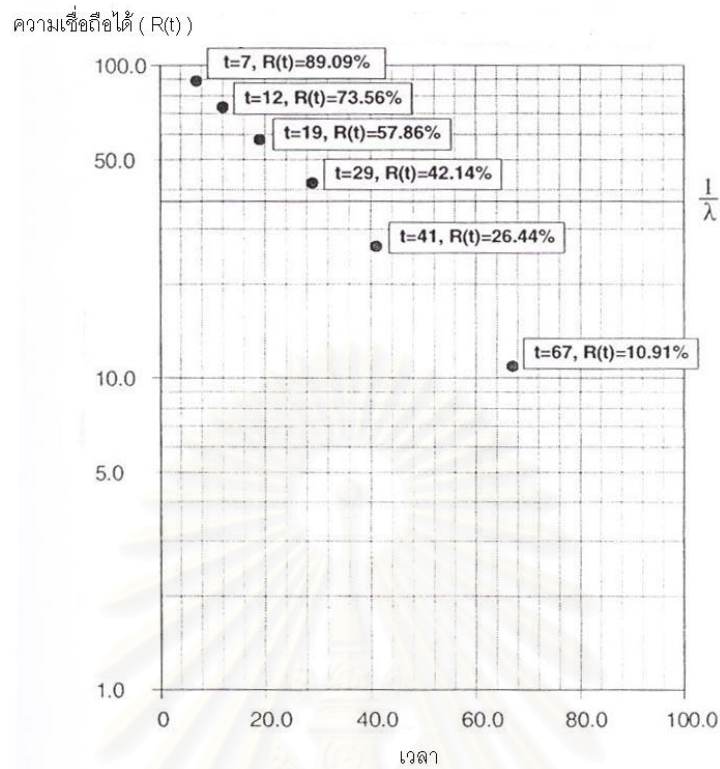
$$\ln[1 - F(t)] = -\frac{t}{\theta} \quad (2.78)$$

เมื่อเทียบกับสมการเชิงเส้น $y = a + bt$ จะได้ว่า

$$y = \ln[1 - F(t)] \quad (2.79)$$

$$b = -\frac{1}{\theta} = -\lambda \quad (2.80)$$

จะเห็นว่าสเกลในแกน y เป็นสเกลลอการิทึม สเกลในแกน x เป็นสเกลเชิงเส้น และมีค่าความชันเท่ากับ λ (อัตราการเกิดความล้มเหลว) จะสังเกตได้ว่ากราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นเป็นแบบเดียวที่มีความชันเป็นลบ เพราะว่าคุณค่าในแกน y นั้นเป็นค่าความเชื่อถือได้ (จากสมการที่ 2.2 ; $R(t) = 1 - F(t)$) ในขณะที่การแจกแจงแบบอื่นๆ นั้นค่าในแกน y จะเป็นค่าความไม่น่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างกราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

- กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบล็อกปกติ [3]

จากสมการที่ 2.13 ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\Phi^{-1}[F(T)] = -\frac{\bar{T}'}{\sigma_{T'}} + \frac{1}{\sigma_{T'}} \cdot T' \quad (2.81)$$

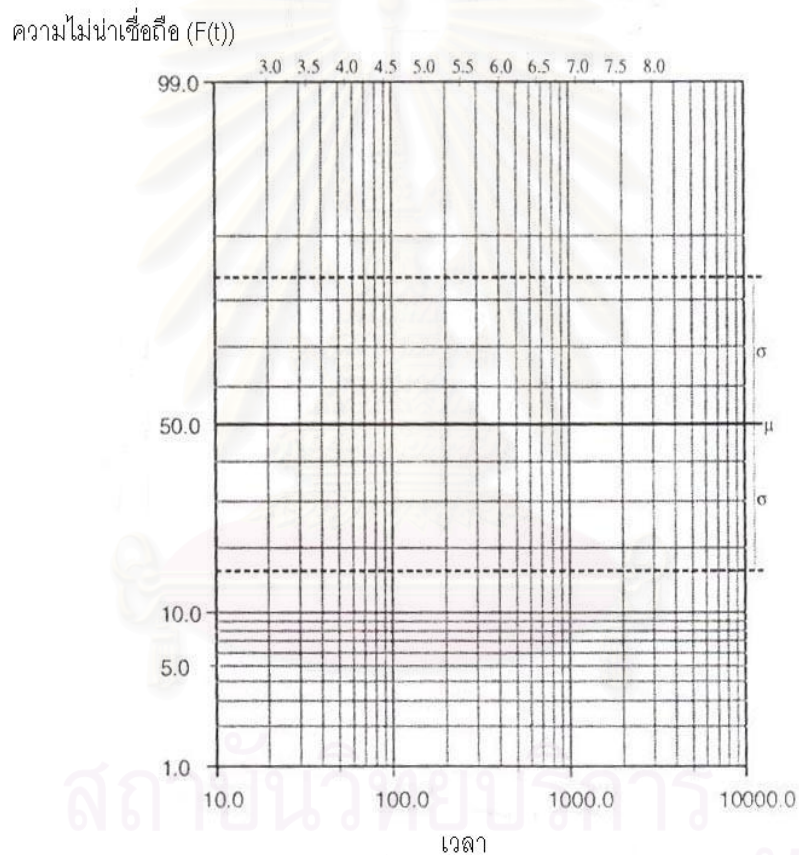
เมื่อเทียบกับสมการเชิงเส้น $y = a + bT'$ จะได้ว่า

$$y = \Phi^{-1}[F(T)] \quad (2.82)$$

$$a = -\frac{\bar{T}'}{\sigma_{T'}} \quad (2.83)$$

$$b = \frac{1}{\sigma_{T'}} \quad (2.84)$$

จะเห็นว่าค่าในแกน y คือ $\Phi^{-1}[F(T)]$ ค่าในแกน x เป็นค่าของ T' (ลอการิทึมฐานธรรมชาติของ T) ค่าความชัน(Slope) เท่ากับ $\frac{1}{\sigma_{T'}}$ และค่าจุดตัด (Intercept) เท่ากับ $-\frac{\bar{T}'}{\sigma_{T'}}$ สำหรับกระดาษกราฟที่ใช้ในการพล็อตกราฟการแจกแจงอายุแบบล็อกปกติ จะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบล็อกปกติ

• กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์ [3]

จากสมการที่ 2.22 ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln[1 - F(t)] = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (2.85)$$

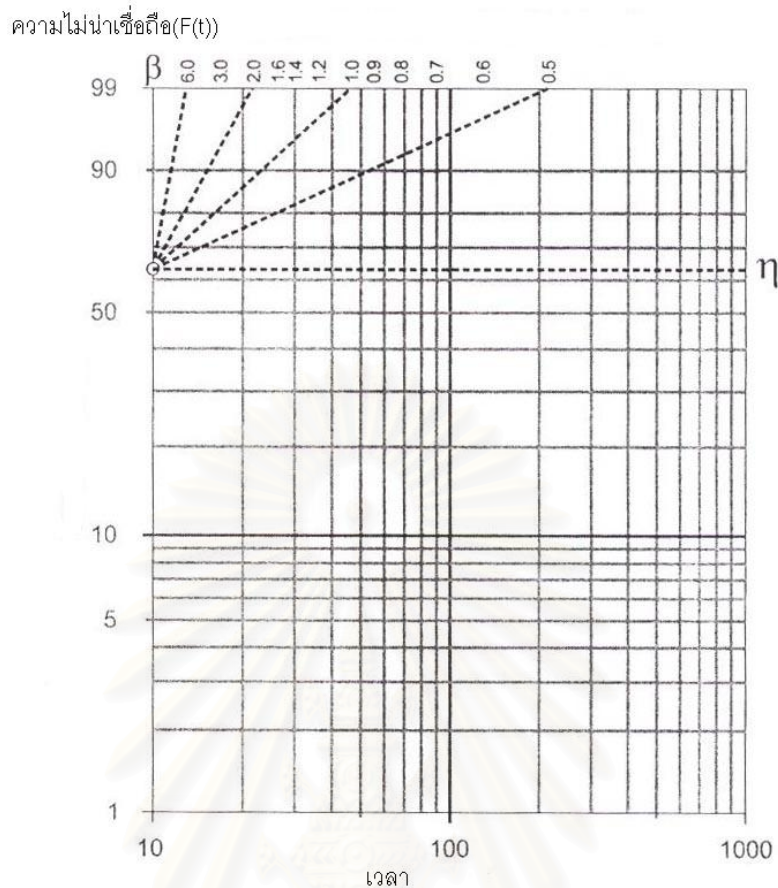
เมื่อเทียบกับสมการเชิงเส้น $y = \beta x - \beta \ln(\eta)$ จะได้ว่า

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) \quad (2.86)$$

$$x = \ln(t) \quad (2.87)$$

จะเห็นว่าจากสมการค่าในแกน y จะเป็นสเกลลอการิทึม 2 ชั้น(double-log scale) และสเกลในแกน x เป็นสเกลลอการิทึม ซึ่งจากสมการจะได้ค่าความชันเท่ากับ β และค่าจุดตัดคือ $\beta \ln(\eta)$ สำหรับกระดาษกราฟที่ใช้ในการพล็อตกราฟการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์ จะมีลักษณะดังรูป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.26 กราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์

2.4.1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น (Life-Stress Relationship Plotting) [1], [2], [3]

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์จากฟังก์ชันการแจกแจงอายุแล้ว จึงพล็อตกราฟของความเค้นสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น โดยข้อมูลที่นำมาพล็อตนั้นเป็นข้อมูลของอายุที่ระดับความเค้นต่าง ๆ ณ ระดับความเชื่อถือได้ (Reliability) ที่สนใจ กระดาษกราฟที่นำมาใช้จะมีลักษณะเฉพาะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น เช่นกระดาษสเกลลอการิทึม-ลอการิทึม (Log-Log Scale) ใช้สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผัน หรือ กระดาษสเกลลอการิทึม-ส่วนกลับ(Log-reciprocal) ใช้สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบอาร์เรเนียส เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองจะประมาณค่าจาก

ความชันและจุดตัดของกราฟ เพื่อความเข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงขอยกตัวอย่างการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงกราฟดังนี้

ตัวอย่าง [2] มีข้อมูลซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) ที่ได้จากการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้น (ความดัน) 3 ระดับ โดยที่ผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์ และใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผัน

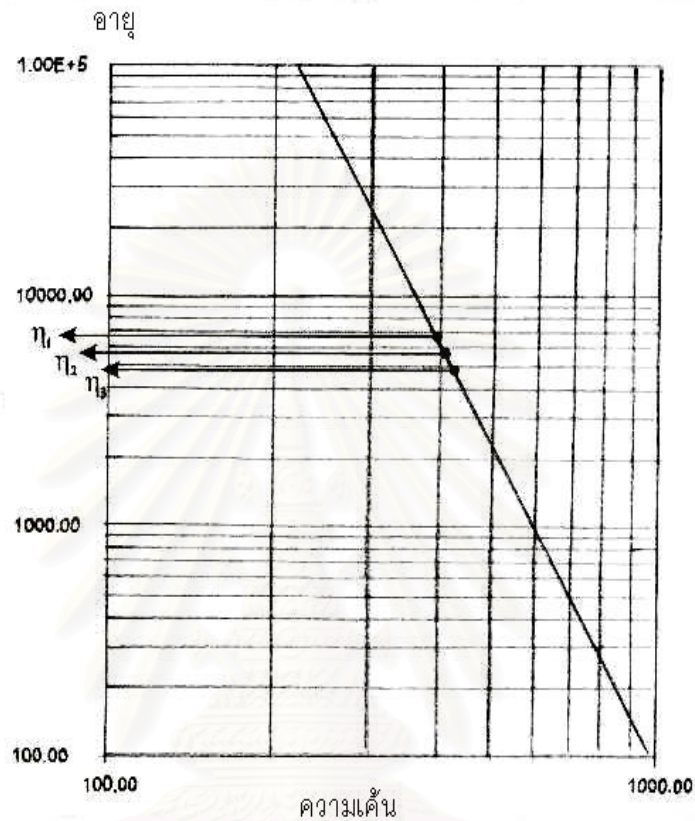
ตารางที่ 2.1 ช่วงเวลาก่อนล้มเหลวจากการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้น 3 ระดับ

ความเค้น	393 psi	408 psi	423 psi
ช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (ชั่วโมง)	3450	3300	2645
	4340	3720	3100
	4760	4180	3400
	5320	4560	3800
	5740	4920	4100
	6160	5280	4400
	6580	5640	4700
	7140	6233	5100
	8101	6840	5700
8960	7380	6400	

สำหรับกราฟแสดงการแจกแจงอายุจะได้ดังรูปที่ 2.23 ดังนั้นการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์ซึ่งมีพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ β และ η โดยค่า β จะสามารถประมาณค่าได้จากค่าความชันของกราฟโดยใช้ตัวชี้วัดความชัน (Slope Indicator) ที่กำหนดจากกระดาษกราฟ ดังรูปที่ 2.26 สำหรับค่า η นั่นก็คือค่าเวลา (t) ที่ระดับความไม่น่าเชื่อถือ 63.2% นั่นเอง ซึ่งที่มาของค่าระดับความไม่น่าเชื่อถือ 63.2% นั้นมาจากการแทนค่า $t = \eta$ ในสมการที่ 2.22 ซึ่งจะได้

$$F(t) = 1 - e^{-1} \\ = 0.632 = 63.2\%$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ n จากระดับความเค้นทั้ง 3 ระดับแล้วจึงนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นได้ดังรูป



รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น

สำหรับตัวอย่างนี้ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นแบบกำลังผกผัน ซึ่งมีสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 2.46 ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ n จากค่าความชันของกราฟนั่นเอง

$$\text{slope} = \frac{\ln(T_2) - \ln(T_1)}{\ln(V_2) - \ln(V_1)}$$

จะได้ $n = 4.5272$

จากนั้นจึงทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือคือค่า K จากสมการที่ 2.45
จะได้ว่า

$$K = \frac{1}{LV^n}$$

จากการแทนค่า $V = 403$ psi , $L = 6000$ ชั่วโมง (ซึ่งเป็นค่าจุดพิกัดใด ๆ จาก
กราฟ) จะได้ว่า

$$K = \frac{1}{(6000)(403^{4.5272})} = 2.67 \times 10^{-16}$$

2.4.2 วิธีเชิงเลข (Numerical Method)

การประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขมีข้อดี คือ เมื่อใช้ผู้วิเคราะห์หลายคนวิเคราะห์ข้อมูลชุดเดียวกันจะได้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน แต่ก็มีข้อเสียเปรียบ คือ การวิเคราะห์เชิงเลขนั้นจะไม่สามารถเห็นรายละเอียดบางอย่างเหมือนกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงกราฟ เช่นจะไม่ทราบว่าข้อมูลนั้นมีความเหมาะสมกับการแจกแจงอายุแบบใด หรือแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลควรใช้ทั้ง 2 วิธีควบคู่กันไปดังกล่าวไว้ข้างต้นแล้ว การประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขมักมีความซับซ้อนซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณซึ่งในปัจจุบันได้มีซอฟต์แวร์ช่วยคำนวณจำนวนมาก [1],[3]

การประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขนั้นมีวิธีที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การประมาณค่าด้วยวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least Square Error Method) ซึ่งนิยมใช้กับข้อมูลสมบรูณ์ และ วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) ซึ่งนิยมใช้กันมากเพราะใช้ได้ทั้งกับ ข้อมูลสมบรูณ์และข้อมูลตัดทอน [1]

2.4.2.1 วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least Square Error Method)

วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดจะใช้วิธีการทางสถิติพื้นฐานคือวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) การวิเคราะห์การถดถอยนั้นเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัวคือ x และ y สำหรับในแต่ละข้อมูลจากการทดลอง เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ที่

ใช้เป็นตัวแทนของชุดข้อมูล โดยจะมีค่าผิดพลาดกำลังสองระหว่างค่าแท้จริงกับค่าประมาณน้อยที่สุด การวิเคราะห์การถดถอยนั้นสามารถทำได้ทั้งในแนวแกน y และในแนวแกน x ดังนี้

- การวิเคราะห์การถดถอยในแนวแกน y [3]

ให้สมการเส้นตรงมีความสัมพันธ์ $y = \hat{a} + \hat{b}x$ (\hat{a} และ \hat{b} หมายถึงค่าที่ได้จากการประมาณ) สามารถหาค่า \hat{a} และ \hat{b} ได้ดังนี้

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2.88)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N}} \quad (2.89)$$

- การวิเคราะห์การถดถอยในแนวแกน x [3]

ให้สมการเส้นตรงมีความสัมพันธ์ $x = \hat{a} + \hat{b}y$ (\hat{a} และ \hat{b} หมายถึงค่าที่ได้จากการประมาณ) สามารถหาค่า \hat{a} และ \hat{b} ได้ดังนี้

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (2.90)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N}} \quad (2.91)$$

ซึ่งทำให้อยู่ในรูปของค่า y ได้ดังนี้ $y = -\frac{\hat{a}}{\hat{b}} + \frac{1}{\hat{b}}x$

การวัดค่าความใกล้เคียงของสมการเชิงเส้นที่ได้จะอาศัยค่า ρ (Correlation Coefficient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงว่าตัวแปร x และ y มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด ค่า ρ สามารถคำนวณได้ดังนี้ [3]

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.92)$$

โดยที่ σ_{xy} คือ ค่า Covariance ของ x และ y

σ_x คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x

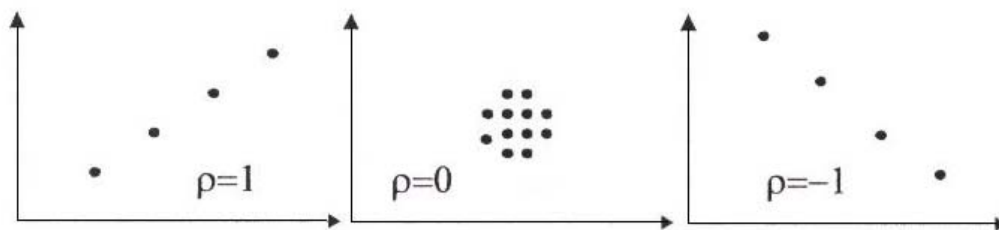
σ_y คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ y

$$\sigma_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (2.93)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N} \right)} \quad (2.94)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{N} \right)} \quad (2.95)$$

ถ้า ρ มีค่าเข้าใกล้ ± 1 แสดงว่าการประมาณค่าสมการเชิงเส้นนั้นเหมาะสมกับข้อมูล ถ้า $\rho = 1$ แสดงว่าการประมาณค่าสมการเชิงเส้นนั้นมีค่าเหมาะสมที่สุดกับข้อมูล และมีความชันเป็นบวก ถ้า $\rho = -1$ แสดงว่าการประมาณค่าสมการเชิงเส้นนั้นมีค่าเหมาะสมที่สุดกับข้อมูลและมีความชันเป็นลบ ถ้า $\rho = 0$ แสดงว่าข้อมูลชุดนั้นกระจัดกระจายและไม่มีความเป็นเชิงเส้นเลย



รูปที่ 2.28 สมการเชิงเส้นที่ค่า ρ ต่าง ๆ

2.4.2.2 วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เพราะเป็นตัวประมาณค่าที่มีความคล่องจง (Consistent) หมายถึงค่าที่ประมาณได้จะลู่เข้าใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้นเมื่อมีจำนวนตัวอย่างมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นตัวประมาณค่าที่มีประสิทธิภาพ (Efficient) เมื่อมีจำนวนตัวอย่างมากขึ้นการประมาณค่าจะมีความเที่ยงตรงมากขึ้น และเป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased) ซึ่งหมายถึงการประมาณค่าที่ไม่สูงหรือต่ำเกินไป [3],[4]

การใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีนี้กับข้อมูลตัดทอนจะได้ผลดีว่าการประมาณค่าแบบวิธีกำลังสองน้อยสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับชุดข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลตัดทอนมาก ๆ และจำนวนข้อมูลที่เกิดความล้มเหลวน้อย [3]

วิธีความควรจะเป็นสูงสุดเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (pdf, $f(t)$) เพราะถือว่าการประมาณเพื่อให้เกิดค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้นั้นเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด [4] สำหรับทฤษฎีพื้นฐานของวิธีความควรจะเป็นสูงสุดนั้นเป็นดังนี้

กำหนด x_R เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variable) ซึ่งมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น เป็นดังนี้

$$f(x_R ; \theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k)$$

โดยที่ $\theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k$ เป็นพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า (Unknown Parameter) ที่ต้องการจะทำการประมาณค่า

ดังนั้นจะได้ ฟังก์ชันความควรจะเป็น(Likelihood Function) ดังสมการ

$$L(\theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k | x_1, x_2, \dots, x_R) = L = \prod_{i=1}^R f(x_i ; \theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k) \quad (2.96)$$

และฟังก์ชันลอการิทึมของความควรจะเป็น(Log-likelihood Function)

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^R \ln f(x_i ; \theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k) \quad (2.97)$$

การประมาณค่า $\theta_1, \theta_2, \mathbf{K}, \theta_k$ ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด ทำได้โดยการหาค่ามากที่สุดของฟังก์ชันความควรจะเป็น(Likelihood Function) หรือฟังก์ชันลอการิทึมของความควรจะเป็น(Log-likelihood Function) แต่นิยมใช้ฟังก์ชันลอการิทึมของความควรจะเป็นมากกว่าเพราะคำนวณได้ง่ายกว่า

การหาค่ามากที่สุดของฟังก์ชันลอการิทึมของความควรจะเป็น (Log-likelihood Function) นั้นทำได้โดยการหาคำตอบจากสมการหลายชั้น (Simultaneous Equations) จำนวน k สมการ โดยสามารถหาสมการหลายชั้นทั้งหมดได้จากการหาอนุพันธ์ (Differentiate) ของฟังก์ชันลอการิทึมของความควรจะเป็น (Log-likelihood Function) เทียบกับพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta_j} = 0 \quad ; j = 1, 2, \dots, k \quad (2.98)$$

ทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นเป็นทฤษฎีพื้นฐานของวิธีความควรจะเป็นสูงสุดสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลสมบูรณ์ สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับข้อมูลตัดทอนนั้นมีขั้นตอนเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ต่างกันที่ฟังก์ชันความควรจะเป็น (Likelihood Function) สำหรับข้อมูลตัดทอนนั้นสามารถหาได้จาก [1],[2]

$$L = \prod_{i=1}^R f(x_i; \theta_1, \theta_2, K, \theta_k) \cdot \prod_{i=1}^M [1 - F(x_i; \theta_1, \theta_2, K, \theta_k)] \quad (2.99)$$

โดยที่ R คือจำนวนข้อมูลที่เกิดความล้มเหลว

M คือจำนวนข้อมูลตัดทอน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

กลไกความล้มเหลวที่เกิดกับไอซีและการทดสอบไอซี

ไอซีหรือวงจรรวม (Integrated Circuits) นับได้ว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันกำลังมีบทบาทและความสำคัญมากต่อวงการอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากวงจรรวมคือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่ถูกสร้างบนชั้นผลึกขึ้นเดียวกันและรวมกันอยู่เป็นวงจรไฟฟ้า สามารถทำหน้าที่ต่าง ๆ ได้ เช่น วงจรขยาย วงจรตรรก เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันไอซีได้กลายเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานในการประกอบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนั้นไอซีที่ผลิตขึ้นมาจำเป็นจะต้องมีความเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง [5] การศึกษากลไกที่ทำให้เกิดความล้มเหลว (Failure Mechanism) จะทำให้เราทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากการผลิต แล้วนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพในการผลิตให้ดีขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเชื่อถือได้ในระดับที่ต้องการ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตไอซีได้ก้าวหน้าไปมาก เมื่อเปรียบเทียบไอซีกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบขึ้นจากการนำเอาชิ้นส่วนต่าง ๆ มาต่อกันโดยใช้ลวดตัวนำ จะเห็นได้ว่าไอซีมีข้อดีที่พอสรุปได้ดังนี้ [5]

- มีขนาดเล็กน้ำหนักเบากว่า แต่ทำงานได้ผลเหมือนกัน
- มีความเชื่อถือได้ (Reliability) มากกว่า
- มีการสิ้นเปลืองวัสดุในการสร้างน้อยกว่า ทำให้มีราคาถูกกว่า
- สามารถประยุกต์และนำไปใช้งานได้สะดวกกว่า

ความล้มเหลว (Failure) หมายถึงการสิ้นสุดความสามารถในการทำงานตามที่กำหนด ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ความล้มเหลวแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ [6],[7]

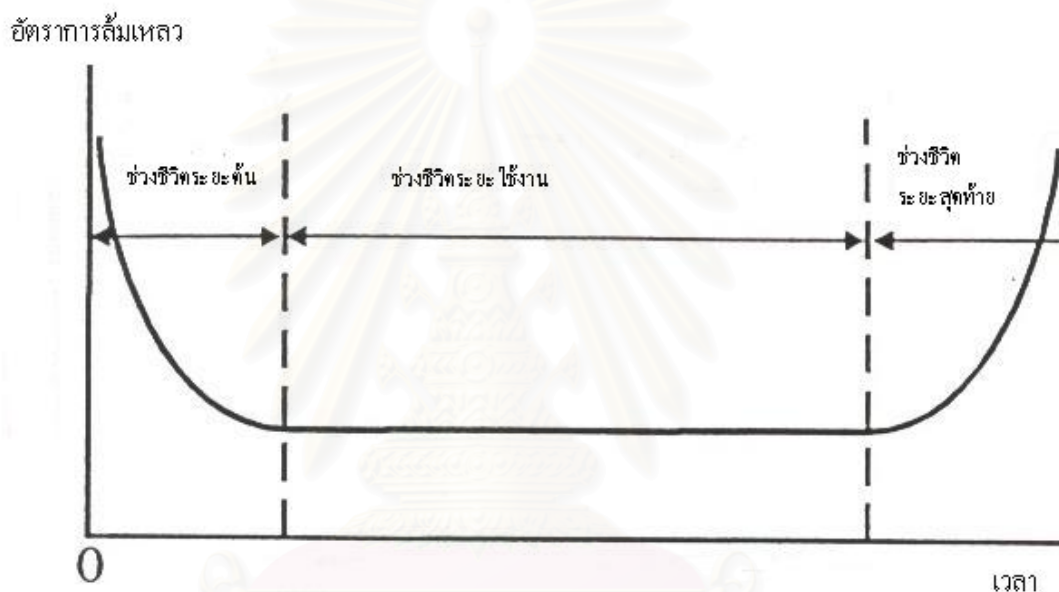
1. ความล้มเหลวแบบเสื่อมสภาพ (Degradation Failures)

เป็นความล้มเหลวที่เกิดจากการที่พารามิเตอร์บางตัวของอุปกรณ์นั้น ๆ มีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ไม่ถูกต้อง

2. ความล้มเหลวแบบเสียหาย (Catastrophic Failures)

เป็นความล้มเหลวที่ทำให้ใช้งานไม่ได้อีกต่อไป

ไอซีหรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราการล้มเหลวต่ำ และมีช่วงชีวิตใช้งานยาว โดยทั่วไปลักษณะของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเทียบกับเวลาจะมีลักษณะเป็นกราฟรูปอ่างอาบน้ำ (Bathtub Curve) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟรูปอ่างอาบน้ำ

จากลักษณะดังกล่าว สามารถแบ่งช่วงการเกิดความล้มเหลวได้เป็น 3 ช่วง

ช่วงแรก หรือเรียกว่า **ช่วงชีวิตระยะต้น** (Early Life Period, Infant Mortality) จะเป็นช่วงที่อัตราการล้มเหลวจะมีค่าสูงและมีแนวโน้มลดลง ผลิตภัณฑ์ที่อ่อนแอ (หรือล้มเหลว) จะถูกคัดออก สาเหตุการล้มเหลวในระยะต้นนี้เกิดจากความผิดพลาดในการผลิต, ความผิดพลาดในการออกแบบ หรือความผิดพลาดในการควบคุมคุณภาพ เช่นการเชื่อมสายต่อไม่ดี เกิดความสกปรกบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทำไอซี หรือเกิดการปนเปื้อนของสารเคมี เป็นต้น

ช่วงที่สอง หรือเรียกว่า **ช่วงชีวิตระยะใช้งาน** (Useful Life Period, Random Failure) ในช่วงนี้จะเกิดความล้มเหลวแบบสุ่ม และอัตราการล้มเหลวจะมีค่าต่ำสุดและคงที่โดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้งาน ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมในการใช้งานที่สูงเกินกว่าค่าที่กำหนดในสภาวะการใช้งานปกติ หรือเกิดจากความผิดพลาดของผู้ใช้ขณะใช้งาน ซึ่งเป็นความล้มเหลวที่คาดเดาไม่ได้

ช่วงที่สาม หรือเรียกว่า **ช่วงชีวิตระยะสุดท้าย** (Wear - out Period) เป็นช่วงที่อัตราการล้มเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ตามอายุ แต่เนื่องจากอายุของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และไอซีมีช่วงยาวมากจึงไม่มีประโยชน์มากนักในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

3.1 กลไกที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Failure Mechanism in Semiconductor Device) [6]

ไอซีเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง กลไกที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

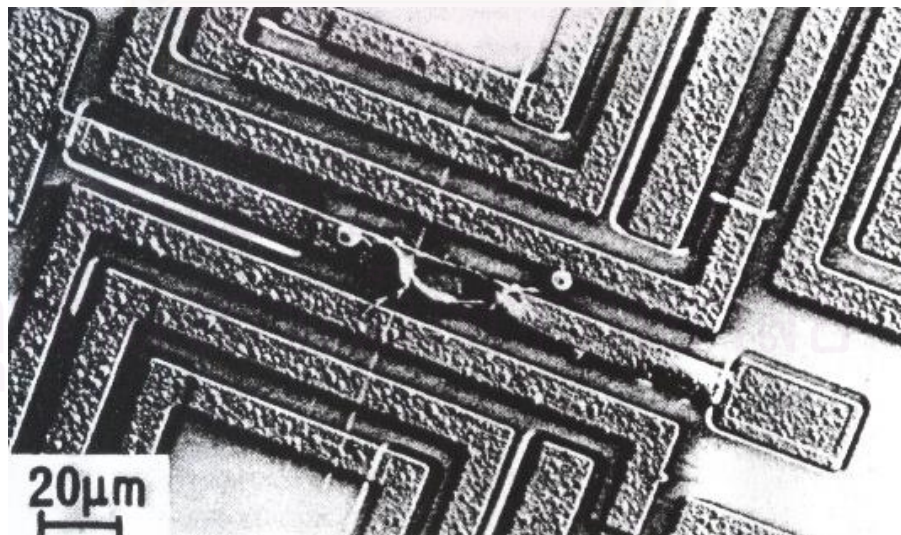
3.1.1 ความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นทางไฟฟ้า (Electrical Stress Failure)

ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมี 2 รูปแบบ คือ

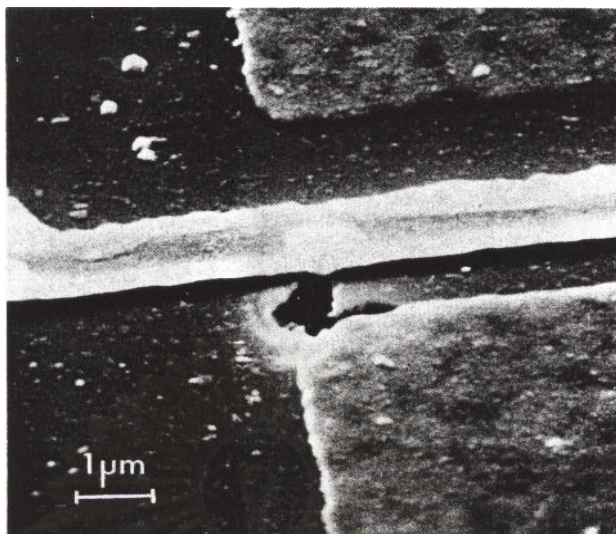
- ความล้มเหลวจากความเค้นทางไฟฟ้าที่มากเกินไป (Electrical Overstress, EOS) ซึ่งอาจเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ กระบวนการทำงานที่ไม่ถูกต้อง เช่น การใส่หรือถอดไอซีในขณะที่ยังจ่ายไฟอยู่ เป็นต้น ความผิดพลาดจากการออกแบบ และกระบวนการทดสอบที่ไม่ถูกต้อง เช่นจ่ายไฟเกินข้อกำหนด เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้ตัวไอซีมีกระแสไหลมากเกินไปกว่าที่กำหนดจึงเกิดความล้มเหลวได้

- ความล้มเหลวที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge, ESD) การคายประจุไฟฟ้าสถิต คือ ลักษณะของการถ่ายโอนประจุอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน แม้แต่การสัมผัสจากมนุษย์ก็ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตได้เช่นกัน เนื่องจากมนุษย์เสมือนมีตัวเก็บประจุอยู่ เมื่อประจุที่เกิดจากการขัดสีเกิดขึ้นก็จะเก็บไว้ในตัวเก็บประจุ(ร่างกาย) เมื่อมนุษย์ไปสัมผัสกับไอซีจะเกิดการคายประจุผ่านความต้านทานของร่างกาย(กล้ามเนื้อ, ผิวหนัง ฯลฯ) การคายประจุไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เมื่อเกิดสิ่งเหล่านี้ขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของไอซีลดลง ซึ่งสาเหตุของความล้มเหลวที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตนั้นอาจเกิดจากการขาดความระมัดระวังในการเคลื่อนย้ายตัวไอซีทำให้ไอซีสัมผัสกับสิ่งอื่น ๆ ที่สามารถถ่ายโอนประจุไฟฟ้าสถิตได้ [8]

ความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นทางไฟฟ้านั้นเป็นความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมากในช่วงระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ถึงร้อยละ 60 ขณะใช้งานจริง ความเสียหายที่เกิดจากความเค้นทางไฟฟ้าที่มากเกินไปโดยส่วนใหญ่จะมีความเสียหายมากกว่าความเสียหายที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้ความเสียหายดังกล่าวยังเป็นเหตุให้มีความเป็นไปได้ในการเกิดความล้มเหลวภายใน (Intrinsic Failure) และความล้มเหลวภายนอก (Extrinsic Failure) มากขึ้นด้วย



รูปที่ 3.2 ความล้มเหลวจากความเค้นทางไฟฟ้าที่มากเกินไปในไอซี



รูปที่ 3.3 ความล้มเหลวที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตในไอซี

3.1.2 ความล้มเหลวที่เกิดจากภายใน (Intrinsic Failure Mechanism)

เป็นความล้มเหลวที่เกิดจากความบกพร่องของการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น

- การพังทลายของชั้นออกไซด์เกต (Gate Oxide Breakdown) ซึ่งอาจเกิดจากความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นทางไฟฟ้าที่มากเกินไป การคายประจุไฟฟ้าสถิต หรือ ความบกพร่องในชั้นออกไซด์ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิต ความล้มเหลวนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงชีวิตระยะต้นและเกิดขึ้นน้อยมากในช่วงระยะใช้งานเพราะเป็นความล้มเหลวที่สามารถคัดกรองได้ก่อนจะส่งผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด วิธีการคัดกรองที่มีประสิทธิภาพนั้นทำได้โดยใช้แรงดันเค้น การตรวจพบความบกพร่องของชั้นออกไซด์เกต (Gate Oxide) มีความสำคัญมากเพราะความบกพร่องเหล่านี้ทำให้เกิดความล้มเหลวแบบเสียหาย (Catastrophic Failures) ได้

- การปนเปื้อนของไอออน (Ionic Contamination) เกิดจากไอออนอิสระ (Mobile Ions) เช่น Na^+ , Cl^- , K^+ เป็นต้น ซึ่งมีผลต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ไอออนอิสระนี้มาจาก 4 แหล่งด้วยกันคือ สิ่งแวดล้อมเช่นไอน้ำ ฝุ่นละออง, มนุษย์ เช่น เหงื่อ น้ำลาย , วัสดุต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต และวัสดุห่อหุ้ม (Package)

- ผลของประจุ (Charge Effects) ประจุที่อยู่ในตัวเก็บประจุชั้นออกไซด์เกต (Gate Oxide Capacitor) นั้นมีผลกับไอซีประเภทมอส(MOS) โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทหน่วยความจำ การเปลี่ยนแปลงของประจุมีผลทำให้เกิดความล้มเหลวได้

3.1.3 ความล้มเหลวที่เกิดจากภายนอก (Extrinsic Failure Mechanism)

เป็นความล้มเหลวที่เกิดจากความบกพร่องในกระบวนการห่อหุ้ม (Packaging Process) หรือสิ่งแวดล้อมที่ไอซีนั้นถูกใช้งาน เช่น

- กระบวนการห่อหุ้ม สำหรับวัสดุที่นำมาใช้จะมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือเฮอริเมติก (Hermetic) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเซรามิก และ พลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติไม่ค่อยเสถียรภาพทางเคมี ความล้มเหลวอาจเกิดจากกระบวนการห่อหุ้มเช่น การเชื่อมต่อลวดบอนด์ (Wire Bond) หรือเชื่อมต่อขา(Pin) ของไอซี เป็นต้น

- ชั้นโลหะ(Metallization) ในไอซีมักมีชั้นบาง ๆ ที่ใช้โลหะเช่น อลูมิเนียม, ทองคำ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะที่นำมาใช้นี้จะต้องมีคุณสมบัติที่ดีและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นถ้าคุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนไปจึงมีผลทำให้ลดประสิทธิภาพของไอซีและอาจมีผลให้เกิดความล้มเหลวได้

3.2 การทดสอบความเชื่อถือได้ (Reliability Test) [9],[10]

การทดสอบความเชื่อถือได้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบความเค้นแวดล้อม (Environmental Stress Test) การทดสอบความเชื่อถือได้จึงเป็นการทดสอบผลิตภัณฑ์ด้วยความเค้นและวิธีการทดสอบต่าง ๆ เพื่อประเมินค่าความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ หรือช่วยในการประเมินอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่สามารถคัดกรอง (Screening) ผลิตภัณฑ์ ทำให้พบความบกพร่อง (Defect) ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การแก้ไขข้อบกพร่องนั้นต่อไป

วิธีการทดสอบความเชื่อถือได้มีหลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการตรวจดูความเชื่อถือได้หรือความทนทานด้านต่าง ๆ ของไอซี การทดสอบนั้นจะเป็นการทดสอบกับความเค้นชนิดต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แรงดัน ความชื้น ความดัน เป็นต้น จึงขอยกตัวอย่างวิธีการทดสอบโดยวิธีการทดสอบออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

3.2.1 การทดสอบคุณลักษณะ (Characterization Test) เช่น

- การทดสอบการคงไว้ของข้อมูล (Data Retention) เป็นการทดสอบความสามารถในการเก็บข้อมูล โดยทั่วไปจะทดสอบที่อุณหภูมิสูงโดยไม่จ่ายแรงดันไบอัส (No Bias) เช่นที่ 250 องศาเซลเซียส 2000 ชั่วโมง เป็นต้น การทดสอบจะทำการนำไอซีวางเรียงในภาชนะทนความร้อนแล้วนำไปเข้าเครื่องอบ การเรียงไอซีนั้นจะต้องไม่วางซ้อนกันเพื่อให้ไอซีทุกตัวได้รับความร้อนโดยทั่วถึง ส่วนเครื่องที่ใช้จะต้องควบคุมอุณหภูมิได้



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการคงอยู่ของข้อมูล (Data Retention)



รูปที่ 3.5 ภายในเครื่องทดสอบการคงอยู่ของข้อมูล (Data Retention)

- การทดสอบความคงทนในการเขียน/ลบข้อมูล (Write/Erase Endurance) เป็นการวัดความสามารถในการเขียน, ลบ และโปรแกรมใหม่(Reprogram) โดยนับเป็นจำนวนรอบ (Cycle) การทดสอบจะทำการเขียนและลบตามจำนวนรอบที่กำหนด เช่น 10,000 100,000 รอบ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องจ่ายแรงดันให้กับไอซีด้วยเพื่อให้ไอซีอยู่ในสถานะพร้อมทำงาน การทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะทำที่อุณหภูมิปกติ แต่สามารถทำที่อุณหภูมิสูง(Hot Endurance) หรือที่อุณหภูมิต่ำ(Cold Endurance) ได้ เพื่อดูความคงทนในการเขียน/ลบข้อมูลที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 การทดสอบความคงทนในการเขียน/ลบข้อมูล

3.2.2 การทดสอบเพื่อคัดกรองผลิตภัณฑ์ (Product Screen Test)

เป็นการทดสอบเพื่อพบความบกพร่องของผลิตภัณฑ์ วิธีที่นิยมใช้กันมากได้แก่

- **การทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test)** เป็นการทดสอบด้วยความเค้นเชิงไฟฟ้า(Electrical stress) และความเค้นเชิงความร้อน (Thermal Stress) ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อดูสมรรถนะ (Performance) และ ความเชื่อถือได้ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจดูความบกพร่องของไอซีโดยเร่งให้ไอซีที่มีความบกพร่องเกิดความล้มเหลวได้เร็วขึ้นด้วย โดยปกติแล้วการทดสอบนี้จะทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูงและใช้ระดับแรงดันปกติ แต่สามารถใช้ระดับแรงดันสูงกว่าที่กำหนดได้ในกรณีที่ทราบว่าคุณภาพความล้มเหลวที่จะเกิดขึ้นนั้นเกิดเมื่อถูกเร่งด้วยแรงดัน การทดสอบการทำให้เข้าที่นี้จะไม่เฉพาะเจาะจงกับกลไกความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เพราะการตรวจพบความล้มเหลวบางชนิดโดยเจาะจงนั้นจะต้องทำการทดสอบด้วยเงื่อนไขเฉพาะเจาะจงสำหรับการเกิดความล้มเหลวนั้นโดยเฉพาะ

การทดสอบการทำให้เข้าที่นั้นมี 2 ลักษณะ คือ การทำให้เข้าที่แบบสถิต (Static Burn-in) ซึ่งเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและจ่ายแรงดันปกติ แต่จะไม่จ่ายสัญญาณนาฬิกา

(Clock) และการทำให้เข้าที่แบบพลวัต (Dynamic Burn-in) ซึ่งเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและจ่ายแรงดันปกติ แต่จะจ่ายสัญญาณนาฬิกา (Clock) ด้วยเพื่อให้ไอซีเสมือนได้ทำงานจริง [11]



รูปที่ 3.7 ตู้สำหรับการทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test)

- การคัดกรองด้วยแรงดัน (Voltage Screening) เป็นการคัดกรองที่มีประสิทธิภาพเมื่อมีไอซีจำนวนหนึ่ง (Sub-population) จากที่นำมาทดสอบทั้งหมดมีความบกพร่อง ในการทดสอบนั้นจะใช้ระดับแรงดันที่สามารถกำจัดผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องออกได้

3.2.3 การทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge Sensitivity Testing) [8],[9]

เป็นการทดสอบเพื่อดูความทนทานของไอซีที่มีต่อปัจจัยที่ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ

- การทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลองเชิงร่างกายมนุษย์ (Electrostatic Discharge Sensitivity to the Human Body Model) ซึ่งจะทดสอบโดยการจำลองระดับแรงดันสูงเช่น $\pm 1,000$ $\pm 2,000$ $\pm 3,000$ $\pm 4,000$ โวลต์ เป็นต้น จ่ายเข้าไปที่แต่ละขาของไอซี ซึ่งเป็นการจำลองลักษณะการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากร่างกายมนุษย์ไปที่ไอซี



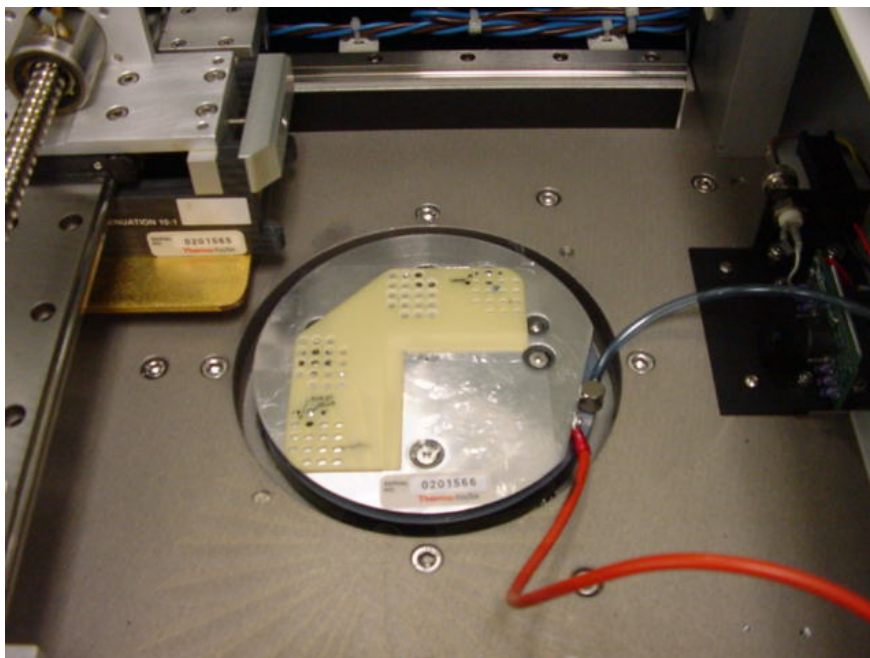
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลองเชิงร่างกายมนุษย์ ซึ่งมีช็อกเกิดสำหรับใส่ไอซี

- การทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลองเชิงเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า (Electrostatic Discharge Sensitivity to the Field Induced Model) เป็นการจำลองลักษณะการเกิดการคายประจุจากสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น การนำไอซีวางไว้ใกล้หมอนิเตอร์ซึ่งมีสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สนามไฟฟ้าที่กระจายออกมาสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดประจุได้ ขนาดของประจุเหล่านี้พอเพียงที่จะทำให้เกิดความเสียหายได้เมื่อเกิดการคายประจุแบบจำลองชนิดนี้ไม่นิยมนำมาใช้งาน

- การทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลองเชิงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electrostatic Discharge Sensitivity to the Charge Device model) เป็นการจำลองลักษณะการเกิดการคายประจุจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น เมื่อไอซีสัมผัสกับหัวจับไอซี เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดการคายประจุผ่านตัวไอซีได้ ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความล้มเหลวขึ้น การทดสอบจะทดสอบโดยการจำลองแผ่นเพลทให้มีประจุไฟฟ้าสถิตโดยใช้ระดับแรงดันสูง เช่น ± 300 ± 600 $\pm 1,000$ $\pm 1,600$ โวลต์ จากนั้นนำไอซีวางบนแผ่นเพลทนั้นแล้วทำการถ่ายโอนประจุโดยใช้แท่งโลหะซึ่งต่อกราวด์สัมผัสกับแต่ละขาของไอซี เพื่อให้เกิดการคายประจุผ่านไอซี



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับแบบจำลองเชิงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.10 แผ่นเพลทที่มีประจุไฟฟ้าสถิต

3.2.4 การทดสอบเชิงความร้อน (Thermal Test) เช่น

โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิในการทดสอบ ผลของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ (Parameter Drift) , การเปลี่ยนรูปทางกล (Mechanical Deformation), ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions), การพังทลายของไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown) เป็นต้น [7]

- การทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test) เป็นการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งาน ประเมินอัตราการล้มเหลว ประเมินค่าความเชื่อถือได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้พิจารณาถึงความล้มเหลวที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย การทดสอบนี้นิยมใช้ความเค้น 2 ชนิด คือ อุณหภูมิและแรงดัน เพื่อเร่งให้อิทธิพลเกิดความล้มเหลวเร็วขึ้น จากนั้นนำข้อมูลช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) มาวิเคราะห์โดยใช้หลักการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของการทดสอบเร่งที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เพื่อประเมินค่าต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งาน อัตราการล้มเหลว ค่าความเชื่อถือได้ เป็นต้น โดยจะทดสอบในตู้อบ (Oven) ที่ควบคุมอุณหภูมิและแรงดันได้ ซึ่งวิธีการทดสอบนั้นจะคล้ายกับการทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test) กลไกความล้มเหลวที่อาจ

พบได้ในการทดสอบอายุการใช้งาน เช่น ความบกพร่องของชั้นซิลิกอน (Silicon Defects) ความบกพร่องชั้นออกไซด์ (Oxide Defects) ความบกพร่องจากการผลิต (Manufacturing Defects) การพังทลายของไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown) การปนเปื้อนของไอออน หรือความล้มเหลวแบบสุ่มอื่น ๆ (Random Failure) เป็นต้น [12]

- การทดสอบที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Storage) เป็นการทดสอบโดยการอบไอซีในภาวะอุณหภูมิสูง แต่ไม่จ่ายแรงดัน จะทดสอบเพื่อดูความบกพร่องโดยทั่ว ๆ ไป

3.2.5 การทดสอบเชิงความร้อน-เชิงกล(Thermal-Mechanical Test) เช่น

- การทดสอบวัฏจักรอุณหภูมิ (Temperature Cycle) เป็นการทดสอบเพื่อดูความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการที่จะทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการใช้งาน เช่น ในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเปิด/ปิด ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิและจำนวนรอบที่ใช้ทดสอบต่าง ๆ เช่น -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส -65 ถึง 150 องศาเซลเซียส -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส เป็นต้น ส่วนจำนวนรอบที่ใช้ทดสอบเช่น 500 1000 รอบ เป็นต้น



ส่วนอุณหภูมิสูง



ส่วนอุณหภูมิต่ำ

รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบวัฏจักรอุณหภูมิซึ่งจะมีทั้งส่วนของอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

3.2.6 การทดสอบความชื้น (Moisture Test)

ความชื้นอาจมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion), การลัดวงจร และเกิดการพังทลาย(Breakdown) เป็นต้น

- การอบความดันไอน้ำ(Stream Pressure Pot) เป็นการทดสอบไอซีโดยใช้ อุณหภูมิสูง และความดัน โดยไม่จ่ายแรงดัน เช่น อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส และ ความดัน 15 psig (Pounds per Square Inch Gauge) โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 100 (100%RH) เพื่อตรวจดูปัญหาเกี่ยวกับการรวมกันของไดน์และวัสดุห่อหุ้ม (Die/Package Combination) ภายใต้สภาวะที่ความชื้นสามารถผ่านเข้าไปที่หน้าไดน์ (Die Surface) เครื่องทดสอบควรจะควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และ ความชื้นได้



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการอบความดันไอน้ำ(Steam Pressure Pot)

- การทดสอบอุณหภูมิ-ความชื้น(Temperature/Humidity Bias) เป็นการทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ (Integrity) ของวัสดุห่อหุ้มแบบพลาสติกภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสูง โดยจะทดสอบไอซีด้วยความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและความชื้น โดยจ่ายแรงดันปกติ เงื่อนไขที่นิยมใช้เช่น อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85



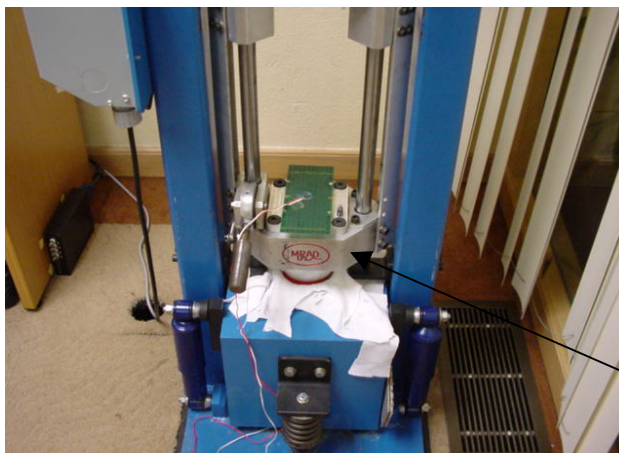
รูปที่ 3.13 การทดสอบอุณหภูมิ-ความชื้น(Temperature - Humidity Bias)

3.2.7 การทดสอบอื่น ๆ

นอกจากวิธีการทดสอบต่าง ๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว ยังมีการทดสอบอื่น ๆ อีก เช่น

- การทดสอบแรงกระแทกทางกล (Mechanical Shock Test) แรงกระแทกทางกลอาจทำให้เกิดความเสียหายเช่น ความเสียหายกับส่วนเชื่อมต่อ (Connections) หรือเกิดการแตกร้าวในโครงสร้างของไอซี เป็นต้น การทดสอบนี้จะดูความทนทานของไอซีเมื่อมีแรงกระทำ การทดสอบจะจำลองการกระแทกซึ่งมีแรงกระทำตามที่กำหนด โดยการปล่อยแท่นเหล็กซึ่งมีไอซีติดอยู่จากระดับความสูงต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แท่นเหล็ก

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

3.3 การทดสอบทางไฟฟ้า (Electrical Test) [6]

เป็นการทดสอบหลังจากทำการทดสอบความเชื่อถือได้หรือการทดสอบความเค้น แวดล้อมด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าหลังจากการทดสอบผ่านความเค้นต่าง ๆ แล้วนั้น ตัวไอซี ยังสามารถทำงานได้ปกติหรือไม่ การทดสอบนั้นจะเป็นไปตามโปรแกรมทดสอบ (Test Program) ของแต่ละบริษัท โดยทั่วไปการทดสอบทางไฟฟ้าจะแบ่งย่อยเป็น 2 ประเภท คือ

1) การทดสอบพารามेटริก (Parametric Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปของไอซี เช่น การตรวจความต่อเนื่อง (Continuity Test) ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบการลัดวงจร (Short) หรือเปิดวงจร (Open) ภายในตัว ไอซี หรือการวัดค่ากระแสที่สภาวะต่าง ๆ เช่น สภาวะทำงาน (Active) หรือสภาวะสำรอง (Standby) เป็นต้น ถ้าค่าที่วัดได้ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ (Specification) แสดงว่าไอซีนั้นเกิดความล้มเหลว และควรทำการวิเคราะห์ความล้มเหลว (Failure Analysis) เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุ และนำมาปรับปรุงการผลิตต่อไป

2) การทดสอบฟังก์ชัน (Functional Test)

เป็นการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของไอซี เช่นการวัดความเร็วในการอ่าน หรือเขียนข้อมูล เป็นต้น ถ้าค่าที่วัดได้ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ (Specification) แสดงว่าไอซีนั้นเกิดความล้มเหลว และควรทำการวิเคราะห์ความล้มเหลว (Failure Analysis) เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุ และนำมาปรับปรุงการผลิตต่อไป

3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์ความล้มเหลว (Failure Analysis Techniques) [7]

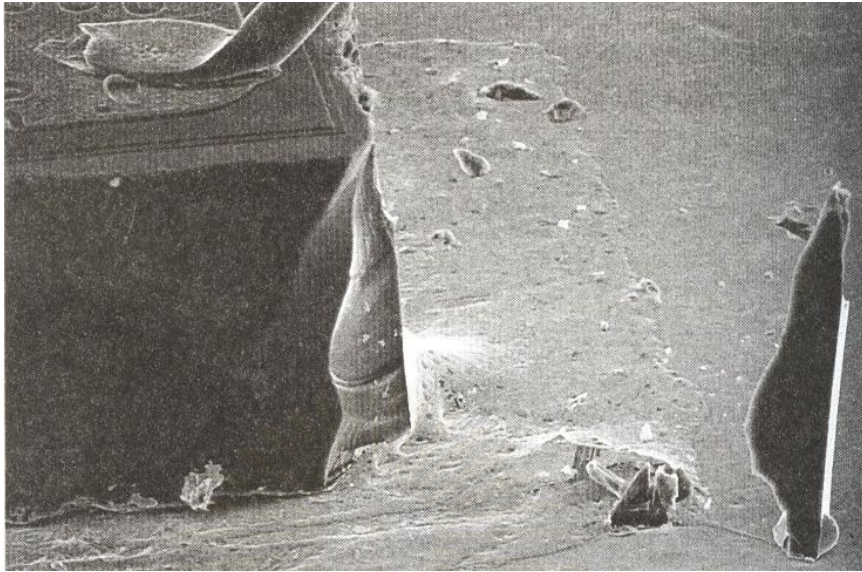
เมื่อทำการทดสอบไอซีด้วยความเค้นต่าง ๆ แล้ว จะนำไอซีมาทดสอบทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบว่าเกิดความล้มเหลวหรือไม่ เมื่อไอซีเกิดความล้มเหลวจะนำมาวิเคราะห์ความล้มเหลวเพื่อตรวจสอบหาสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลว นั้น ๆ เพื่อนำไปปรับปรุง พัฒนาการผลิตต่อไป การวิเคราะห์ความล้มเหลวนั้นมีหลายวิธีซึ่งจะขอยกตัวอย่างบางวิธีที่นิยมใช้ ดังนี้

- การใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscopy)

เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับไอซี เช่น รอยแตกร้าว ความบกพร่องที่เกิดบนตัวห่อหุ้ม(Package) รอยไหม้บนตัวไอซี ความเสียหายที่ขาของไอซี เป็นต้น ซึ่งอาจมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น

- กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy (SEM))

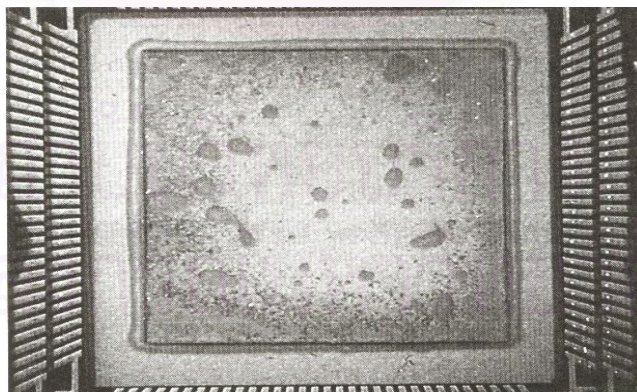
เป็นการสแกนโดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายไปบนพื้นผิวของวัตถุ เป็นการตรวจสอบที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับตัวไอซี อีกทั้งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกความล้มเหลวที่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยอิเล็กตรอน
(Scanning Electron Microscopy (SEM))

- กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยคลื่นเสียง (Scanning Acoustic Microscopy (SAM))

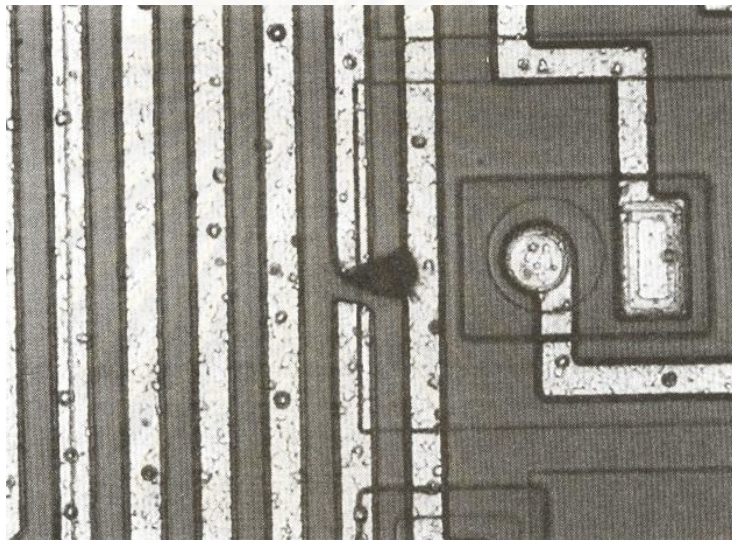
เป็นการตรวจดูความเสียหายที่เกิดขึ้นกับไอซีเช่นดูพื้นผิวหน้าไดน์(Die) รอยแตก ร้าว(Crack) บนหน้าไดน์ เป็นต้น โดยใช้หลักการของการสะท้อนคลื่นเสียง



รูปที่ 3.16 รูปภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยคลื่นเสียง
(Scanning Acoustic Microscopy (SAM))

- การเปิดตัวห่อหุ้ม (Package Opening, Decapsulation)

เป็นการตรวจสอบภายใน (Internal Examination) ซึ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบทำลาย (Destructive Analysis) หลังจากเปิดตัวห่อหุ้มแล้วจึงทำการตรวจดูความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy (SEM)) กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยคลื่นเสียง (Scanning Acoustic Microscopy (SAM)) เป็นต้น เพื่อตรวจดูสิ่งผิดปกติ, ส่วนที่ถูกทำลาย หรือ ส่วนที่เกิดความเสียหาย

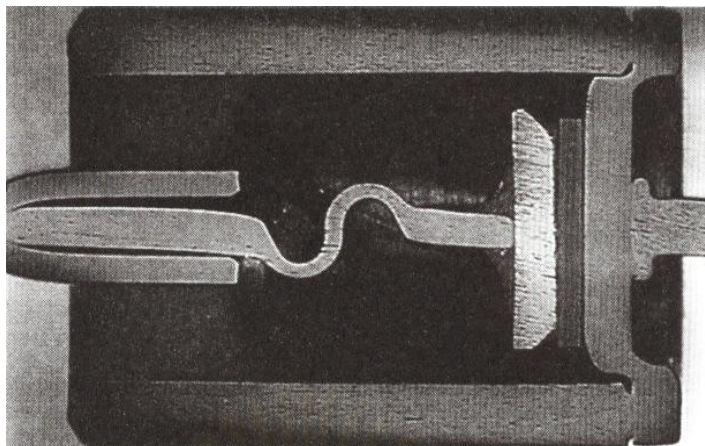


รูปที่ 3.17 ภาพขยายวงจรรายภายในที่ได้จากการเปิดตัวห่อหุ้ม ซึ่งแสดงให้เห็นความเสียหายที่เกิดขึ้น

- การวิเคราะห์การตัดขวาง (Cross-Section Analysis)

เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบทำลาย และมักจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย เพราะไม่สามารถนำไอซีที่ทำการตัดขวางแล้วมาวิเคราะห์ต่อได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.18 ภาพตัดขวางขยาย 5 เท่า ของไดโอด

ในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจความล้มเหลวแบบเสื่อมสภาพที่เกิดจากความล้มเหลวภายใน ซึ่งจะทำการทดสอบอายุ(Life Test) โดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิ และแรงดัน โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่ระดับความเค้นต่าง ๆ วิธีการทดสอบนั้นจะคล้ายกับการทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test) และจะตรวจสอบการเกิดความล้มเหลวโดยการทดสอบทางไฟฟ้า

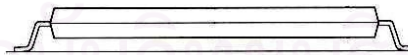
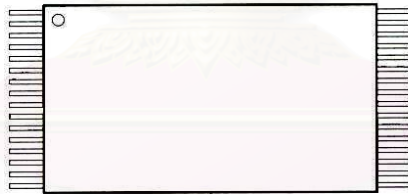
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

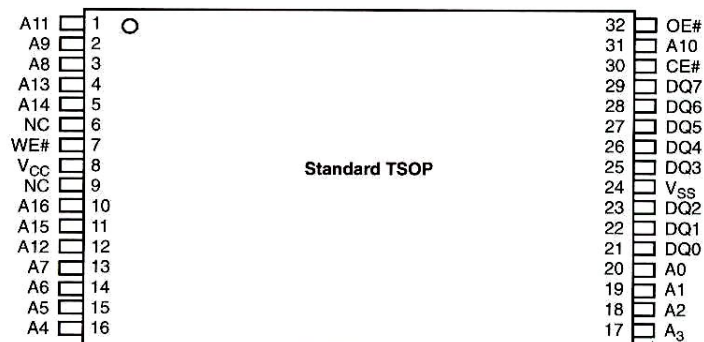
ข้อมูลทั่วไปของไอซีที่นำมาทดสอบและการออกแบบการทดลอง

4.1 ข้อมูลทั่วไปของไอซีที่นำมาทดสอบ [13]

ไอซีที่นำมาใช้ทดสอบเป็นไอซีประเภทหน่วยความจำแบบแฟลช(Flash Memory) ขนาด 1Mbit มีเทคโนโลยีการผลิตเป็นแบบ CMOS แพคเกจแบบ TS032(32-Pin Standard Thin Small Outline Package) ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $5.0 \pm 10\%$ โวลต์ ในการโปรแกรม (Program) อ่าน (Read) และลบ(Erase) กินพลังงานต่ำ(Low Power Consumption) โดยดูจากขนาดกระแสที่วัดจากไอซี ซึ่งตามข้อกำหนด(Specification) ไอซีกินกระแสขณะทำการอ่าน 12 มิลลิแอมป์ และขณะทำการโปรแกรมหรือลบ 30 มิลลิแอมป์ สำหรับความเร็วในการอ่าน ข้อมูลจะอยู่ที่ 90 ns (nanosec)



รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปทางกายภาพของไอซีโดยมองจากด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 4.2 ขาต่าง ๆ ของไอซี



รูปที่ 4.3 ลักษณะภายนอกของไอซี

4.2 การออกแบบการทดสอบ

การทดสอบเพื่อประเมินอายุของไอซี (Life Test) จะใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test) แบบการทำให้เข้าที่แบบพลวัต (Dynamic Burn-in) เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงของไอซี โดยใช้หลักการของการทดสอบเร่ง ความเค้นที่นำมาใช้ทดสอบนั้นมี 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน ซึ่งความเค้นทั้งสองนี้มีแนวโน้มทำให้เกิดความเสียหายต่อไอซีได้เร็วขึ้น ในการทดสอบจะกำหนดเงื่อนไขของการทดสอบไว้ที่อุณหภูมิและแรงดันต่าง ๆ กัน โดยจะกำหนดช่วงเวลาในการทดสอบไว้ที่ระยะเวลาต่างกันด้วย เพื่อนำไอซีที่ผ่านการทดสอบด้วยความเค้นแล้วมาทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น และเป็นการตรวจสอบด้วยว่าไอซีตัวนั้นยังสามารถทำงานได้ปกติหรือไม่ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป หลังจากทดสอบทุกขั้นตอนแล้ว ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินอายุ คือ ช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) ดังนั้นถ้าไอซีตัวใดเกิดความล้มเหลวจะบันทึกเวลาที่ทำการทดสอบไว้เป็นข้อมูลสมบูรณ์ ส่วนไอซีที่ไม่เกิดความล้มเหลวก็จะบันทึกเวลาที่สิ้นสุดการทดสอบไว้เช่น

กันโดยข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลตัดทอน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อประเมินอายุโดยใช้หลักของการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของการทดสอบเร่ง

การออกแบบการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบด้วยกันคือ การทดสอบเบื้องต้น และการทดสอบจริง

4.2.1 การทดสอบเบื้องต้น

เนื่องจากในการวิเคราะห์เพื่อประเมินอายุของไอซีนั้นต้องอาศัยข้อมูลที่เป็นช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) ดังนั้นการทดสอบเบื้องต้นจึงมีจุดประสงค์เพื่อหาแนวโน้มของระดับความเค้นที่ทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลว และเพื่อดูแนวโน้มของลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เนื่องจากไอซีแต่ละแบบ หรืออุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีแนวโน้มที่จะเกิดความล้มเหลวต่างกัน ขึ้นอยู่กับข้อบกพร่องที่เกิดกับตัวไอซีชนิดนั้น ๆ การทดสอบเบื้องต้นจะแบ่งเป็นการทดสอบย่อย 2 การทดสอบ ดังนี้

1) การทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน

สำหรับระดับอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ใช้ทดสอบจะอยู่ในช่วง 125 – 250 องศาเซลเซียส [6] เดิมบริษัททำการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดัน 5.5 โวลต์ ผลการทดสอบแทบจะไม่พบความล้มเหลวของไอซีเลย เนื่องจากอุปกรณ์ทดสอบไม่สามารถทนอุณหภูมิเกิน 180 องศาเซลเซียสได้ จึงไม่สามารถทดสอบที่ระดับอุณหภูมิมากกว่า 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่จะใช้ทดสอบจะอยู่ในช่วง 150 – 180 องศาเซลเซียส ส่วนระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบนั้น โดยทั่วไปจะใช้ระดับแรงดันได้ไม่เกินที่ 50% ของแรงดันมากที่สุด (V_{max}) [6] สำหรับไอซีที่นำมาทดสอบนี้มีระดับแรงดันมากที่สุด 5.5 โวลต์ ($5.0 + 10\%$) ดังนั้นระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบจะอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 8.5 โวลต์

ในการทดสอบเบื้องต้นจะเป็นการทดสอบที่ไม่ละเอียดมากนัก เนื่องจากต้องการดูแนวโน้มของระดับความเค้นที่ทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลวดังที่ได้กล่าวแล้ว จึงทำการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิ 2 ระดับคือ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ส่วนระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบมี 6 ระดับ

ด้วยกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 8.5 โวลต์ โดยจะนำไอซีที่ผ่านการทดสอบด้วยความเค้น(Stress Test) ครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว มาทดสอบทางไฟฟ้า(Electrical Test) จากนั้นนำไอซีที่ผ่านการทดสอบทางไฟฟ้าแล้ว(ชุดเดิม) มาทดสอบด้วยความเค้นที่เงื่อนไขเดิมต่อไปอีกจนครบ กำหนดระยะเวลาเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ กำหนดจำนวนไอซีที่นำมาทดสอบ 50 ตัวต่อชุด

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
150	5.5	24
		48
		48
		48
	6.0	24
		48
		48
		48
	6.5	24
		48
		48
		48
	7.0	24
		48
		48
		48
	8.0	24
		48
		48
		48

ตารางที่ 4.1(ต่อ) เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับคุณวุฒิ 150 องศาเซลเซียส

คุณวุฒิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
150	8.5	24
		48
		48
		48

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับคุณวุฒิ 180 องศาเซลเซียส

คุณวุฒิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
180	5.5	24
		48
		48
		48
	6.0	24
		48
		48
		48
6.5	24	
	48	
	48	
	48	

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) เงื่อนไขการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
180	7.5	24
		48
		48
		48
	8.0	24
		48
		48
		48
	8.5	24
		48
		48
		48

2) การทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน

การทดสอบด้วยความเค้นชนิดเดียวคือแรงดันนั้นเป็นการทดสอบเพื่อดูแนวโน้มความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันให้กับไอซี โดยจะทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 20 องศาเซลเซียส) โดยจะแบ่งเป็นการทดสอบย่อย 2 การทดสอบ ดังนี้

2.1) ทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง

การทดสอบนี้จะทดสอบกับไอซีครั้งละ 1 ตัว เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพลังงานบริโภค (Power Consumption) กับการเพิ่มแรงดัน นอกจากนี้ยังสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตัวไอซีโดยทำการวัดจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดอยู่บนตัวไอซี



เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 4.4 การวัดอุณหภูมิบนตัวไอซีโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล

ลักษณะของการเพิ่มแรงดันจะเป็นลักษณะขั้นบันได โดยจะเพิ่มแรงดันครั้งละ 0.5 โวลต์ ตั้งแต่ 5.5 โวลต์ ถึง 10.0 โวลต์ และจะค้างแรงดันที่แต่ละระดับเป็นเวลา 5 นาที

2.2) ทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันที

การทดสอบนี้จะทดสอบกับไอซีที่ระดับแรงดันละ 1 ตัว เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพลังงานบริโภคกับระดับแรงดันสูง ๆ ซึ่งระดับแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบมี 5 ระดับ ดังนี้ 8.0, 8.5 , 9.0 , 9.5 และ 10.0 โวลต์ โดยแต่ละระดับแรงดันจะใช้เวลาทดสอบประมาณ 20 นาที

4.2.2 การทดสอบจริง

การทดสอบจริงเป็นการทดสอบโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน เพื่อบันทึกข้อมูลช่วงเวลาก่อนล้มเหลว (Time-to-failure Data) และสังเกตดูความล้มเหลวที่เกิดขึ้น โดยจะทดสอบที่ระดับความเค้นที่มีแนวโน้มทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลวซึ่งสังเกตได้จากผลการทดสอบเบื้องต้น นอกจากนี้ยังทำการทดสอบที่ระดับความเค้นอื่น ๆ ที่อาจจะไม่มีผลทำให้เกิดความล้มเหลว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ละเอียดมากขึ้น โดยจะกำหนดระยะ

เวลาการทดสอบต่าง ๆ กัน จากนั้นนำไอซีที่ผ่านการทดสอบด้วยความเค้นแล้วมาทดสอบทางไฟฟ้า เพื่อตรวจดูความล้มเหลวที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
150	7.0	336
	8.0	48
	8.0	108
	8.0	168
	8.0	336
	8.25	48
	8.25	108
	8.25	168
	8.5	48
	8.5	108
	8.5	168
	8.5	336

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
165	5.5	168
	6.5	168
	7.0	168
	7.0	336
	8.0	48
	8.0	108
	8.0	168
	8.0	336
	8.25	48
	8.25	108
	8.25	168
	8.5	48
	8.5	108
	8.5	168
8.5	336	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

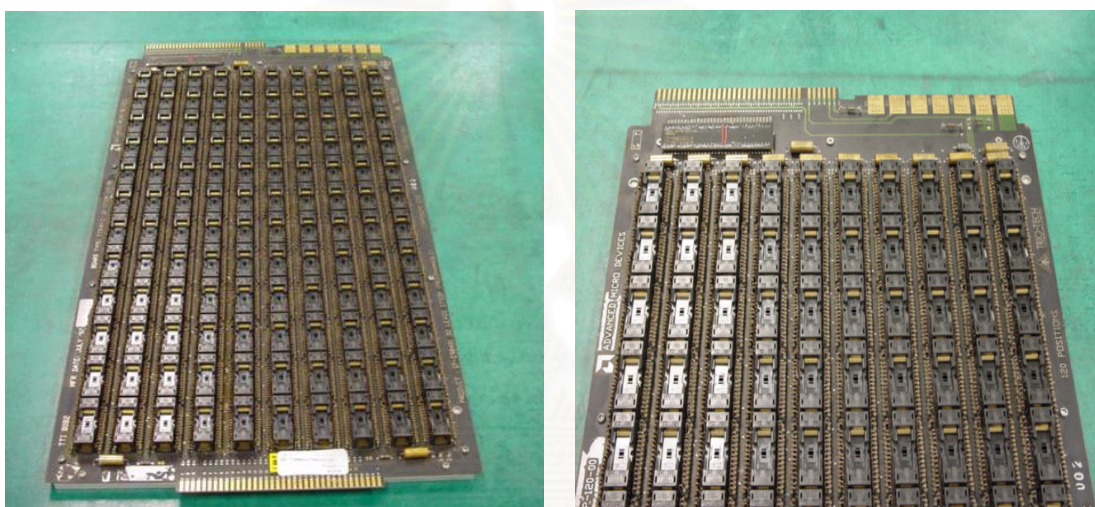
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดสอบจริงที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)
180	5.5	168
	5.5	336
	6.5	168
	6.5	336
	7.0	168
	7.0	336
	8.0	48
	8.0	108
	8.0	168
	8.0	336
	8.25	48
	8.25	108
	8.25	168
	8.5	48
	8.5	108
	8.5	168
	8.5	336

4.3 ขั้นตอนการนำไอซีเข้าทดสอบ

การนำไอซีเข้าทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใส่ไอซีลงบนบอร์ดที่ออกแบบโดยเฉพาะสำหรับไอซีแต่ละแบบ ซึ่งจะมีวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันและสัญญาณนาฬิกา และต้องเป็นบอร์ดที่ทนความร้อนได้ จากนั้นตรวจสอบความเรียบร้อยของไอซีที่ใส่ลงบนบอร์ด

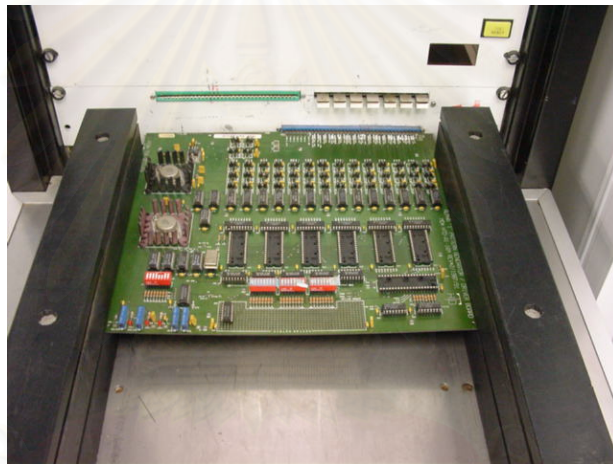


รูปที่ 4.5 บอร์ดที่ใช้สำหรับใส่ไอซี

- 2) ทดสอบสัญญาณเบื้องต้น (Bench Test) เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของไอซีในเบื้องต้น โดยจะทำการตรวจสอบดูสัญญาณทางไฟฟ้า(แรงดันและสัญญาณนาฬิกา) เหมือนขณะทดสอบจริง โดยมีแผ่นวงจร (Driver) สำหรับจ่ายสัญญาณนาฬิกาให้กับบอร์ดโดยเฉพาะ เพื่อจ่ายสัญญาณนาฬิกาให้กับไอซีในบอร์ด และมีแหล่งจ่ายแรงดันให้กับไอซีในบอร์ดด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.6 เครื่องทดสอบสัญญาณเบื้องต้น



รูปที่ 4.7 แผ่นวงจร Driver สำหรับจ่ายสัญญาณนาฬิกา

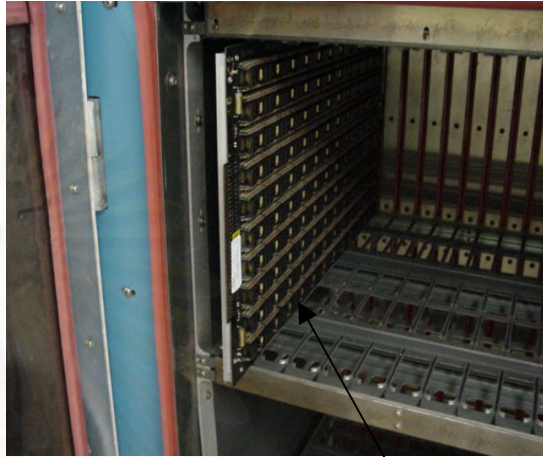


รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายแรงดันให้กับไอซีในบอร์ด

- 3) หลังจากตรวจสอบความเรียบร้อยเรียบร้อยแล้ว นำบอร์ดเข้าทดสอบในตู้อบ ซึ่งจะมีช่องสำหรับนำบอร์ดเข้าไปเสียบได้พอดี และจะมีแผ่นวงจร(Driver) เพื่อจ่ายสัญญาณนาฬิกาอยู่ข้างหลังตู้ จากนั้นทำการตรวจสอบสัญญาณทางไฟฟ้าอีกครั้ง



ช่องสำหรับเสียบบอร์ดไอซี



บอร์ดที่มีไอซีอยู่

รูปที่ 4.9 การนำบอร์ดเข้าทดสอบในตู้อบ

- 4) เปิดแหล่งจ่ายแรงดัน และเปิดตัวทำความร้อน เพื่อปรับอุณหภูมิการทดสอบให้ได้ตามที่กำหนด



ส่วนควบคุมอุณหภูมิ



ส่วนแหล่งจ่ายแรงดัน

รูปที่ 4.10 ส่วนควบคุมอุณหภูมิและแหล่งจ่ายแรงดัน

เมื่อทำการทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จะมีขั้นตอนการนำบอร์ด
ออกจากตู้ทดสอบดังนี้

- 1) ปิดตัวทำความร้อน และรอให้อุณหภูมิเย็นลง จากนั้นทำการตรวจสอบสัญญาณทางไฟ
ฟ้าอีกครั้ง
- 2) นำบอร์ดออกจากตู้ทดสอบและนำไอซีออกจากบอร์ด บรจุและเตรียมส่งเพื่อทำการ
ทดสอบทางไฟฟ้า ซึ่งมีโปรแกรมทดสอบโดยเฉพาะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบทั้งหมดจะกำหนดให้ระดับอุณหภูมิปกติในสภาวะใช้งานจริง(Field Temperature) เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส (328 K) และแรงดันปกติในสภาวะใช้งานจริง (Operating Voltage) เท่ากับ 5.5 โวลต์ [9],[13]

5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นและการวิเคราะห์ผล

สำหรับการทดสอบเบื้องต้นจะแบ่งเป็นผลการทดสอบย่อย 2 การทดสอบ คือ ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน และ ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน

5.1.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิ และ แรงดัน

จากการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน ซึ่งแบ่งเป็นการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบคือ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบของแต่ละระดับอุณหภูมิเป็นดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนไอซีที่เกิด ความล้มเหลว (ตัว)	ลักษณะของความ ล้มเหลว
150	5.5	24	0	-
		48	0	-
		48	0	-
		48	0	-
	6.0	24	0	-
		48	0	-
		48	0	-
		48	0	-
	6.5	24	0	-
		48	0	-
		48	0	-
		48	0	-
	7.0	24	0	-
		48	0	-
		48	0	-
		48	0	-
	8.0	24	0	-
		48	0	-
		48	0	-
		48	0	-
8.5	24	0	-	
	48	0	-	
	48	0	-	
	48	0	-	

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นที่ระดับอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนไอซีที่เกิดความ ล้มเหลว (ตัว)	ลักษณะของความล้ม เหลว(ตัว)	
180	5.5	48	0	-	
		48	0	-	
		48	0	-	
		48	0	-	
	6.0	48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
	6.5	48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
	7.5	48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	0	0	-
	8.0	48	2	2	SHORT(2)
		48	0	0	-
		48	0	0	-
		48	1	1	SPEED(1)
	8.5	48	4	4	OPEN(1) INLEAK(1) SPEED(2)
		48	7	7	OPEN(6) SPEED(1)
		48	2	2	OPEN(1) SHORT(1)
		48	8	8	OPEN(6) SPEED(2)

*หมายเหตุ ลักษณะความล้มเหลวมีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

SHORT หมายถึง ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการลัดวงจร

OPEN หมายถึง ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการเปิดวงจร

INLEAK หมายถึง ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการรั่วไหลของกระแสในขาอินพุต

SPEED หมายถึง ลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล

การตรวจสอบลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นทำได้โดยการทดสอบทางไฟฟ้า ซึ่งจะถือว่าไอซีจะเกิดความล้มเหลวขึ้นก็ต่อเมื่อค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่ทำการทดสอบตามโปรแกรมทดสอบเฉพาะนั้น ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในข้อกำหนด(Specification)

5.1.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน

สำหรับผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน จะแบ่งเป็นผลการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง และผลการทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันที

1) ผลการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง

ได้ทำการทดสอบกับไอซี จำนวน 3 ตัว ซึ่งกระแสและอุณหภูมิที่วัดได้ ณ ระดับแรงดันต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 5.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง

แรงดัน (โวลต์)	ไอซีตัวที่ 1		ไอซีตัวที่ 2		ไอซีตัวที่ 3	
	กระแส (มิลลิแอมป์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	กระแส (มิลลิแอมป์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	กระแส (มิลลิแอมป์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
5.5	16	28.6	17	30.9	16	27.8
6.0	20	30	20	32.3	20	30
6.5	24	32	26	34.7	23	32.2
7.0	27	34	29	37	27	35.3
7.5	31	37	33	41	32	39.3
8.0	35	40	37	46	35	42
8.5	39	44	40	50	40	46
9.0	43	47	41	54.2	44	51
9.5	46	52.7	50	59.3	60	64.9
10.0	80	75	100	160	70	75.5

2) ผลการทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันที

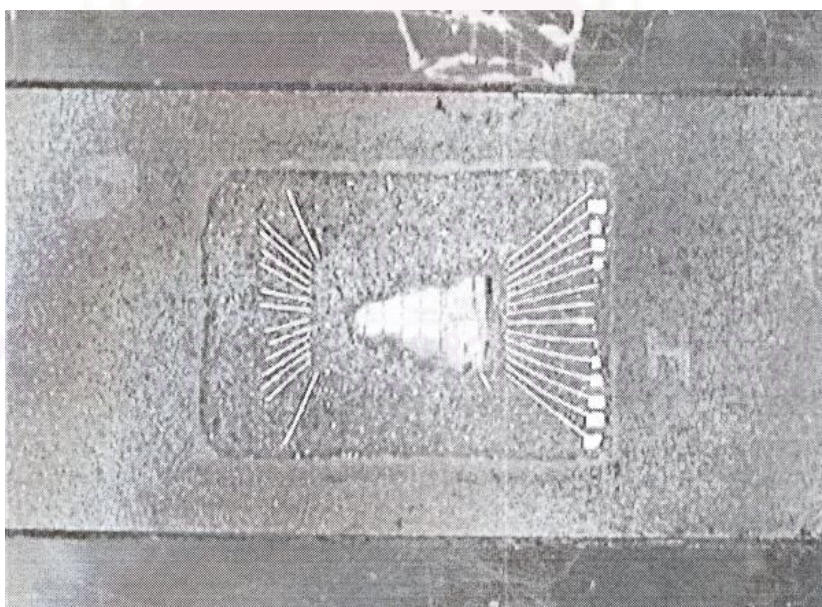
ทำการทดสอบกับไอซีที่ระดับแรงดันละ 1 ตัว ค่ากระแสและอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่า ณ เวลาผ่านไป 20 นาที เป็นดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันที

แรงดัน (โวลต์)	กระแส (มิลลิแอมป์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
8.0	40	39.7
8.5	125	100
9.0	200	166
9.5	96	200
10.0	150	148

5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบเบื้องต้น

จากผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้น 2 ชนิด คืออุณหภูมิและแรงดันนั้น พบว่าจะเกิดความล้มเหลวกับไอซีที่เงื่อนไขการทดสอบที่ใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แรงดันมากกว่า 8.0 โวลต์ขึ้นไป ซึ่งลักษณะการล้มเหลวที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นเพียง 4 ลักษณะ คือ ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการลัดวงจร ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการเปิดวงจร ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการรั่วไหลของกระแสในขาอินพุต และลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล ลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้น 3 ลักษณะแรกนั้นเป็นความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความเค้นที่มากเกินไป ซึ่งเป็นผลให้เกิดความเสียหายภายในตัวไอซีเช่น เกิดรอยไหม้ที่หน้าไดน์ (Die Surface) หรือเกิดการเปลี่ยนรูปของสารประกอบ (Compound Deformation) ที่หน้าไดน์ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การทำงานของไอซีผิดเพี้ยนไปจากเดิม ส่วนลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูลนั้น ไม่ทำให้เกิดความเสียหายที่เป็นลักษณะเด่นใด ๆ แต่เป็นลักษณะความล้มเหลวที่เกิดจากความบกพร่องภายใน จึงทำให้ความเร็วในการอ่านข้อมูลผิดเพี้ยนไป ซึ่งความล้มเหลวลักษณะนี้จะเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับประสิทธิภาพในการทำงานของไอซี ลักษณะความล้มเหลวประเภทนี้มีแนวโน้มจะเกิดขึ้นได้ในช่วงระยะเวลาใช้งาน จึงเป็นลักษณะความล้มเหลวประเภทหนึ่งที่น่าสนใจ



รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนรูปของสารประกอบบนหน้าไดน์ (Die Surface)



รูปที่ 5.2 รอยไหม้ที่หน้าไดน์

สำหรับผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ความเค้นชนิดเดียวคือแรงดัน พบว่าจากผลการทดสอบโดยเพิ่มระดับแรงดันอย่างต่อเนื่องนั้น กระแสจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 มิลลิแอมป์ที่ระดับแรงดันมากกว่า 7.5 โวลต์ (ตามข้อกำหนดแล้วไอซีจะกินกระแสมากที่สุดขณะทำการโปรแกรมหรือลบที่ 30 มิลลิแอมป์) และอุณหภูมิบนตัวไอซีจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระดับแรงดันเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบโดยจ่ายระดับแรงดันสูงให้กับไอซีโดยทันทีพบว่าที่ระดับแรงดันมากกว่า 8.5 โวลต์ขึ้นไป กระแสและอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามาก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไอซีตัวนี้มีแนวโน้มจะเกิดความล้มเหลวได้ที่ระดับอุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส และระดับแรงดันมากกว่า 7.5 โวลต์ สำหรับลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ใน 4 ลักษณะดังได้กล่าวมาแล้ว

5.2 ผลการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ผล

5.2.1 ผลการทดสอบจริง

การทดสอบจริงเป็นการทดสอบโดยใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน ซึ่งผลการทดสอบแบ่งตามอุณหภูมิ ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนไอซีที่เกิด ความล้มเหลว (ตัว)	ลักษณะของความ ล้มเหลว(ตัว)
150	7.0	336	0	—
	8.0	48	0	—
	8.0	108	0	—
	8.0	168	0	—
	8.0	336	0	—
	8.25	48	0	—
	8.25	108	0	—
	8.25	168	0	—
	8.5	48	0	—
	8.5	108	0	—
	8.5	168	0	—
	8.5	336	0	—

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนไอซีที่เกิด ความล้มเหลว (ตัว)	ลักษณะของความ ล้มเหลว(ตัว)
165	5.5	168	0	-
	6.5	168	0	-
	7	168	0	-
	7	336	0	-
	8	48	0	-
	8	108	0	-
	8	168	0	-
	8	336	0	-
	8.25	48	0	-
	8.25	108	0	-
	8.25	168	0	-
	8.5	48	0	-
	8.5	108	2	SPEED(2)
	8.5	168	0	-
	8.5	336	4	OPEN(1) SPEED(3)

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนไอซีที่เกิด ความล้มเหลว (ตัว)	ลักษณะของความ ล้มเหลว(ตัว)
180	5.5	168	0	-
	5.5	336	0	-
	6.5	168	0	-
	6.5	336	0	-
	7.0	168	0	-
	7.0	336	1	SPEED(1)
	8.0	48	0	-
	8.0	108	0	-
	8.0	168	0	-
	8.0	336	23	OPEN,SHORT(17) SPEED(6)
	8.25	48	0	-
	8.25	108	1	SPEED(1)
	8.25	168	0	-
	8.5	48	2	OPEN(2)
	8.5	108	6	OPEN(3) SPEED(3)
	8.5	168	0	-
	8.5	336	43	OPEN(42) SPEED(1)

5.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบจริง

จากผลการทดสอบจริงพบว่าจำนวนไอซีที่เกิดความล้มเหลวที่เงื่อนไขการทดสอบต่าง ๆ สรุปได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการทดสอบที่ทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลว

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดัน (โวลต์)	เวลา (ชั่วโมง)	ลักษณะของความล้มเหลว(ตัว)	
165	8.5	108		SPEED(2)
165	8.5	336	OPEN(1)	SPEED (3)
180	7	336		SPEED (1)
180	8	336	OPEN,SHORT(17)	SPEED (6)
180	8.25	108		SPEED (1)
180	8.5	48	OPEN(2)	
180	8.5	108	OPEN(3)	SPEED (3)
180	8.5	336	OPEN(42)	SPEED (1)

ลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการลัดวงจร ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการเปิดวงจร และลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล จะสังเกตได้ว่าลักษณะความล้มเหลว 2 ลักษณะแรกนั้นมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง(มากกว่า 165 องศาเซลเซียส) และแรงดันสูง(ส่วนใหญ่ มักจะเกิดความล้มเหลวที่ระดับแรงดัน 8.5 โวลต์) จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นลักษณะความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นที่มากเกินไป (Overstress) ดังได้กล่าวแล้ว

สำหรับลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูลนั้นจะสังเกตได้ว่าพบการเกิดความล้มเหลวเกือบทุกเงื่อนไขการทดสอบที่เกิดความล้มเหลวดังตารางที่ 5.8 ดังนั้นไอซีที่นำมาทดสอบนี้อาจมีแนวโน้มว่าจะเกิดความบกพร่องในลักษณะนี้ขึ้นได้ในช่วง

ระยะเวลาใช้งาน และจากผลการทดสอบที่ได้มีเพียงเงื่อนไขเดียวที่ไม่เกิดความล้มเหลวในลักษณะนี้คือที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แรงดัน 8.5 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 48 ชั่วโมง ซึ่งระยะเวลาในการทดสอบเป็นช่วงระยะสั้นมากจึงไม่สามารถทำให้แสดงความบกพร่อง (Defect) ของไอซีออกมาได้

ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลจะพิจารณาข้อมูลจากลักษณะความล้มเหลวชนิดเดียว (Single Failure Mode) คือลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล เป็นเกณฑ์ในการประเมินอายุเฉลี่ย เนื่องจากเป็นลักษณะความล้มเหลวที่เป็นการเสื่อมสภาพตามเวลา และมีความสัมพันธ์กับอายุของไอซี ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่มีลักษณะความล้มเหลวของไอซีแบบอื่น ๆ และไอซีที่ไม่เกิดความล้มเหลวจะถือเป็นข้อมูลตัดทอนทั้งหมด

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินอายุนั้นจะเลือกใช้การแจกแจงอายุแบบไวบูลล์ เพราะเป็นการแจกแจงที่ใช้อธิบายถึงอายุของไอซีได้ดี มีความยืดหยุ่นสามารถใช้ได้กับข้อมูลเกือบทุกแบบ เช่น ข้อมูลสมบูรณ์ ข้อมูลตัดทอน ข้อมูลที่ไม่มีล้มเหลวเกิดขึ้นเลย (No Failure Data) ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวนน้อย (Small Sample) เป็นต้น อีกทั้งเป็นการแจกแจงอายุที่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์จากกลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนน้อยนั้นทำให้การวิเคราะห์ความล้มเหลว (Failure Analysis) และการพยากรณ์ความล้มเหลว (Failure Forecast) มีความถูกต้องมากขึ้นด้วย [1], [14]

สำหรับความสัมพันธ์ของอายุผลิตภัณฑ์กับความเค้นจะเลือกใช้ความสัมพันธ์แบบ T-NT เนื่องจากในการทดสอบใช้ความเค้น 2 ชนิดคืออุณหภูมิและแรงดัน ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นจะใช้วิธีการประมาณ 2 วิธีควบคู่กันไปคือวิธีเชิงกราฟและวิธีเชิงเลข โดยวิธีเชิงเลขนั้นจะใช้วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) เนื่องจากข้อมูลที่น่ามาพิจารณานั้นเป็นข้อมูลตัดทอน

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้จะอาศัยซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ทางสถิติ คือ โปรแกรม ALTA VERSION 6 ซึ่งเป็นโปรแกรมของบริษัท Reliasoft เพื่อช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ซึ่งมีความซับซ้อนในการคำนวณมาก โปรแกรมนี้มีความสามารถในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง และสามารถพล็อตกราฟของแบบจำลองต่าง ๆ ได้

จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถนำข้อมูลมาแบ่งประเภทเป็นข้อมูลสมบูรณ์ (ใช้สัญลักษณ์ F) และข้อมูลตัดทอน (ใช้สัญลักษณ์ S) ตามเงื่อนไขการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิและระดับแรงดันต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.9

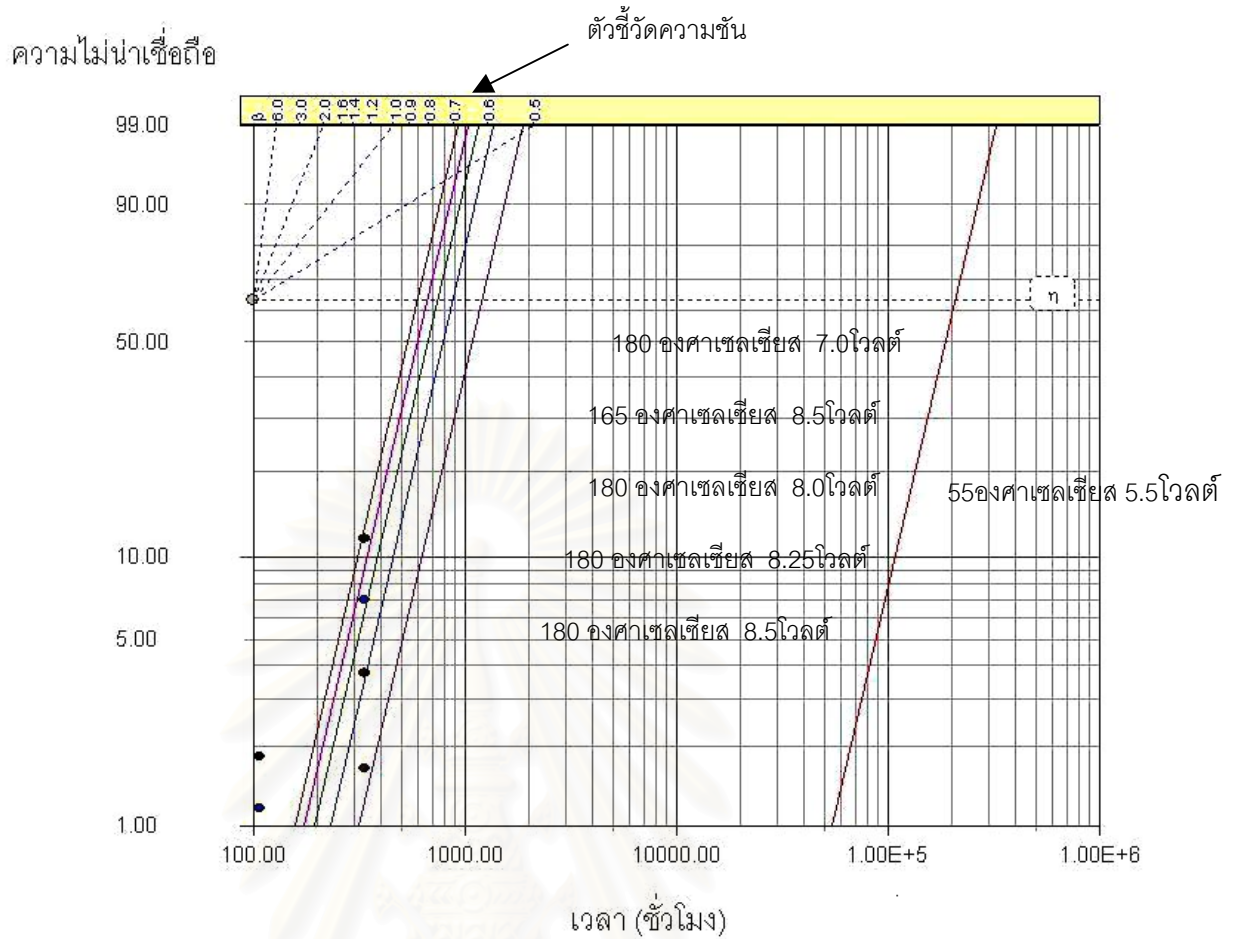
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบและข้อมูลทั้งหมด

จำนวน (ตัว)	ชนิดข้อมูล	ระยะเวลาสิ้นสุดการ ทดสอบ(ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	แรงดัน (โวลต์)
50	S	336	423	7
50	S	48	423	8
50	S	108	423	8
50	S	168	423	8
50	S	336	423	8
50	S	48	423	8.25
50	S	108	423	8.25
50	S	168	423	8.25
50	S	48	423	8.5
50	S	108	423	8.5
50	S	168	423	8.5
50	S	336	423	8.5
50	S	168	438	5.5
50	S	168	438	6.5
50	S	168	438	7
50	S	336	438	7
50	S	48	438	8
50	S	108	438	8
50	S	168	438	8
50	S	336	438	8
50	S	48	438	8.25
50	S	108	438	8.25
50	S	168	438	8.25
50	S	48	438	8.5
2	F	108	438	8.5
48	S	108	438	8.5
50	S	168	438	8.5
3	F	336	438	8.5
47	S	336	438	8.5

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) ผลการทดสอบและข้อมูลทั้งหมด

จำนวน (ตัว)	ชนิดข้อมูล	ระยะเวลาสิ้นสุดการ ทดสอบ(ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	แรงดัน (โวลต์)
50	S	168	453	5.5
50	S	336	453	5.5
50	S	168	453	6.5
50	S	336	453	6.5
50	S	168	453	7
1	F	336	453	7
49	S	336	453	7
50	S	48	453	8
50	S	108	453	8
50	S	168	453	8
6	F	336	453	8
44	S	336	453	8
37	S	48	453	8.25
1	F	108	453	8.25
49	S	108	453	8.25
50	S	168	453	8.25
50	S	48	453	8.5
3	F	108	453	8.5
47	S	108	453	8.5
50	S	168	453	8.5
1	F	336	453	8.5
49	S	336	453	8.5

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาพล็อตกราฟแสดงการแจกแจงอายุของไอซีที่เกิดความล้มเหลว (Life Distribution Probability Plotting) และ การแจกแจงอายุของไอซีที่ความเค้นปกติ โดยมีการแจกแจงแบบไวบูลล์ ได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์แบบไวบูลล์

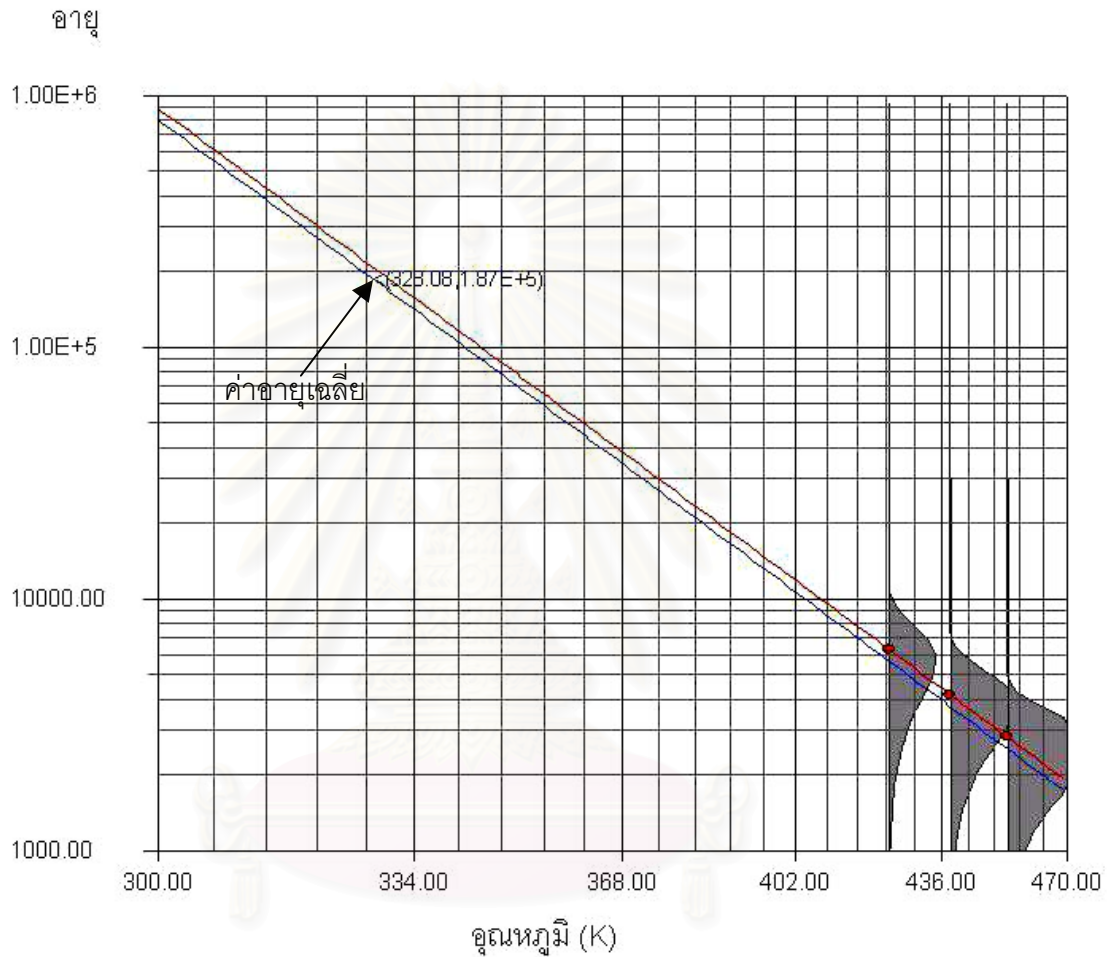
จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงเลขโดยใช้วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟังก์ชันการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์แบบ ไวบูลล์ ดังนี้

$$\beta = 3.4305$$

ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นสามารถหาค่า β จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งสามารถหาได้จากตัวชี้วัดความชันนั่นเอง จะได้

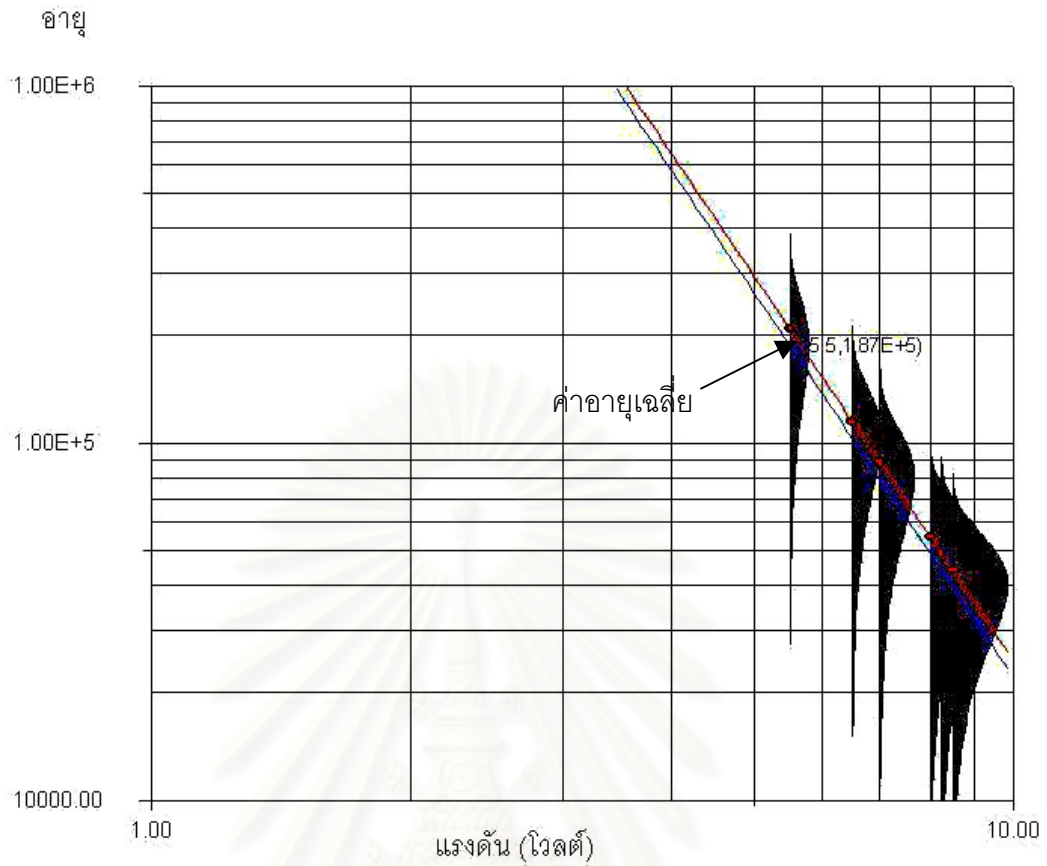
$$\beta = 3.0714$$

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น (Life-Stress Relationship Plotting) นั้นจะแบ่งเป็น 2 กราฟ เนื่องจากใช้ความเค้น 2 ชนิดในการทดสอบ คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิ และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงดัน ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงดัน

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิ ด้วยวิธีเชิงเลขโดยใช้วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) จะได้

$$B = 5111.3216$$

ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นสามารถหาค่า B ได้จากความชันของกราฟนั่นเอง (ดูสมการ 2.62) ซึ่งจะได้

$$B = 5121.5231$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับแรงดันด้วยวิธีเชิงเลขโดยใช้วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) จะได้

$$n = 3.5701$$

ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นสามารถหาค่า n ได้จากความชันของกราฟนั่นเอง (ดูสมการ 2.63) ซึ่งจะได้

$$n = 3.5867$$

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ คือ C และ η จะได้จากการแทนค่าในสมการที่ 2.62 (หรือ สมการที่ 2.63) และสมการที่ 2.60 ตามลำดับ โดยการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงเลขจะได้

$$C = 15.6826$$

$$\eta = 208924.4985$$

ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นจะได้

$$C = 18.2506$$

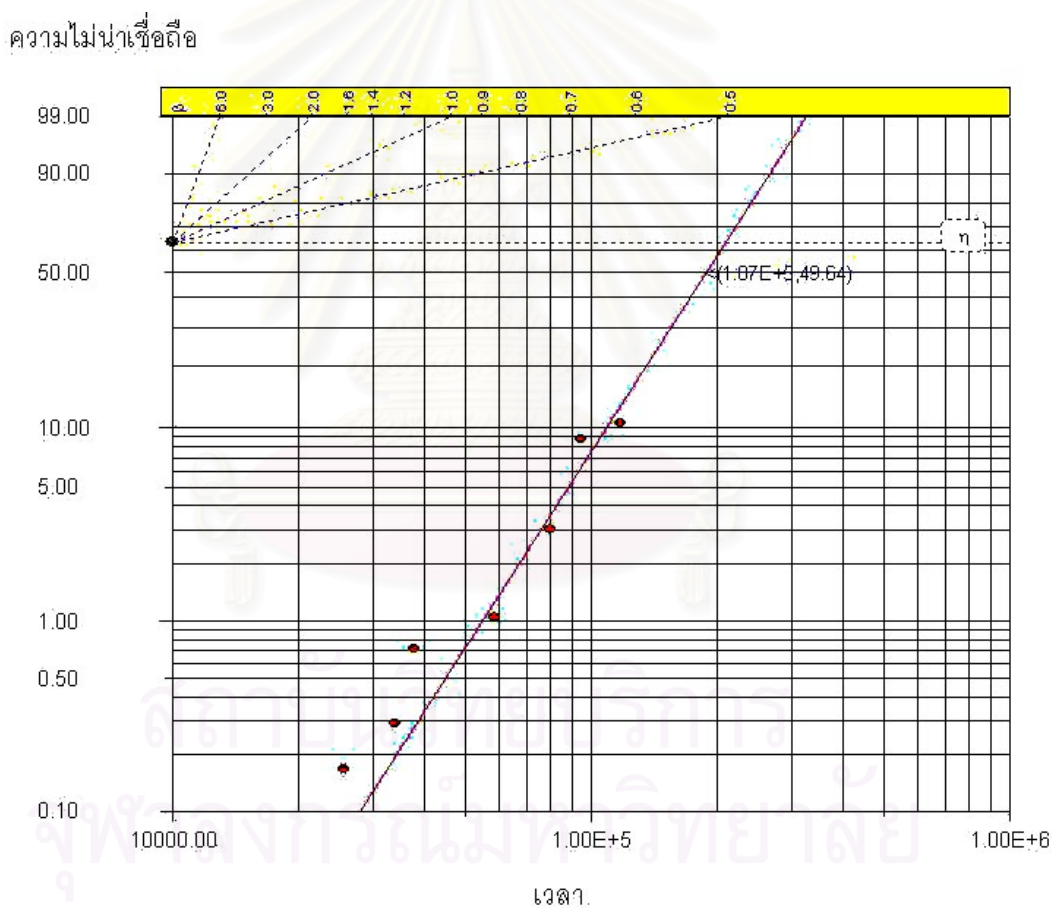
$$\eta = 243818.1636$$

จะสังเกตได้ว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีเชิงเลขและวิธีเชิงกราฟนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน

โดยทั่วไปการประเมินอายุจะประเมินเป็นอายุเฉลี่ย (Mean Time to Failure) หรือ อายุมัธยฐาน (Median Life) แต่ส่วนใหญ่การประเมินอายุของไอซีนิยมประเมินเป็นอายุเฉลี่ย โดยที่ค่าอายุเฉลี่ยและอายุมัธยฐานนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน การประเมินอายุของไอซีด้วยวิธีเชิงเลขทำได้โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณทั้งหมดมาคำนวณหาอายุเฉลี่ยและอายุมัธยฐานได้ตามสมการที่ 2.74 และ 2.75 ตามลำดับ จะได้

อายุเฉลี่ย ; $\bar{T} = 187,790$ ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี)
 อายุมัธยฐาน ; $T^* = 187,768$ ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี)

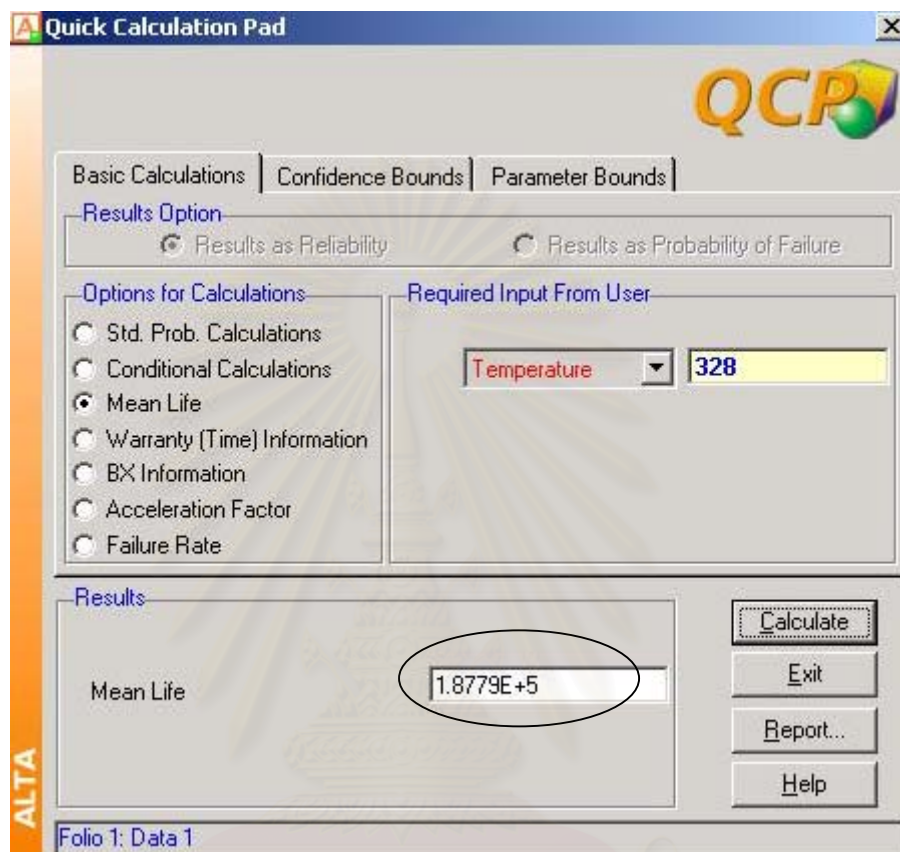
เมื่อพิจารณาการประเมินค่าอายุเฉลี่ยด้วยวิธีเชิงกราฟ จากรูปที่ 5.4 ที่ระดับ
 อุณหภูมิปกติ(55 องศาเซลเซียส) จะมีค่าอายุเฉลี่ยเท่ากับ 187,000 ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี)
 และจากรูปที่ 5.5 ที่ระดับแรงดันปกติ(5.5 โวลต์) จะมีค่าอายุเฉลี่ยเท่ากับ 187,000 ชั่วโมง
 (ประมาณ 21 ปี) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีเชิงเลข จากข้อมูลดังกล่าว
 สามารถนำไปพล็อตกราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้นปกติ (อุณหภูมิ 55
 องศาเซลเซียส แรงดัน 5.5 โวลต์) ได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้นปกติ

ที่อายุเฉลี่ยจากการประมาณด้วยวิธีเชิงเลข(187,790 ชั่วโมง) สามารถหาค่า
 ความเชื่อถือได้ (Reliability) จากการนำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปแทนค่าในสมการที่ 2.23 จะได้ค่า
 ความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.9 สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ด้วยวิธีเชิงกราฟนั้น

สามารถทำได้โดยการดูค่าจากกราฟการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้นปกติ (รูปที่ 5.6) จะได้ค่าความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.64 เห็นได้ว่าค่าความเชื่อถือได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขและวิธีเชิงกราฟนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.7 แสดงผลการประมาณค่าอายุเฉลี่ยจากซอฟต์แวร์

5.3 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นกับไอซีจะแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะคือ ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการลัดวงจร ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการเปิดวงจร ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการรั่วไหลของกระแสในขาอินพุต และ ลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล แต่ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการรั่วไหลของกระแสในขาอินพุตนั้นจะเกิดขึ้นน้อยมากหรือแทบไม่เกิดขึ้นเลยเมื่อเทียบกับลักษณะความล้มเหลวอีก 3 ลักษณะ

- 2) ลักษณะความล้มเหลวที่มีลักษณะของการลัดวงจรและเปิดวงจรนั้น มักจะเกิดที่ระดับความเค้นสูง ๆ (อุณหภูมิและแรงดันสูง) อาจกล่าวได้ว่าเป็นลักษณะความล้มเหลวที่เกิดจากความเค้นในการทดสอบที่มากเกินไป(Overstress) จึงไม่น่าลักษณะความล้มเหลวประเภทนี้มาพิจารณา และถือว่าเป็นข้อมูลตัดทอน
- 3) ลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับความเร็วในการอ่านข้อมูลจะเกิดขึ้นเกือบทุกเงื่อนไขการทดสอบที่มีความล้มเหลวเกิดขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าลักษณะความล้มเหลวประเภทนี้เป็นการเสื่อมสภาพตามเวลาของไอซีชนิดนี้ และมีความสัมพันธ์กับอายุของไอซี
- 4) ที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน (ระดับอุณหภูมิและแรงดันเดียวกัน) ถ้าระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มว่าจะเกิดความล้มเหลวมากขึ้น
- 5) การวิเคราะห์ข้อมูลจะพิจารณาข้อมูลจากลักษณะความล้มเหลวชนิดเดียว (Single Failure Mode) และ การแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์แบบไวบูลล์มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลชุดนี้
- 6) การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงเลขและวิธีเชิงกราฟนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาประเมินอายุเฉลี่ยได้ โดยค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขมีค่าเท่ากับ 187,790 ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี) ค่าความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.9 ส่วนค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงกราฟมีค่าเท่ากับ 187,000 ชั่วโมง ค่าความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.64 โดยกำหนดให้ลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับความเร็วในการอ่านข้อมูลเป็นเกณฑ์การกำหนดอายุเฉลี่ย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การประเมินอายุของไอซีด้วยการทดสอบแรงนั้นเป็นวิธีหนึ่งในการประเมินความเชื่อถือได้ (Reliability) อีกทั้งเป็นวิธีทดสอบที่ทำให้ทราบถึงลักษณะข้อบกพร่องต่าง ๆ ของไอซีในการประเมินอายุของไอซีนั่นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกคือจะใช้ลักษณะความล้มเหลวประเภทใดเป็นเกณฑ์กำหนดอายุของไอซี ซึ่งสามารถกำหนดได้จากการทดสอบเบื้องต้นก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของลักษณะความล้มเหลวประเภทต่าง ๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ และเป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบจริง

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินอายุ จำนวนข้อมูลยิ่งมากจะทำให้การประเมินมีความละเอียด และถูกต้องมากขึ้น การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีเชิงกราฟ และ วิธีเชิงเลข ซึ่งค่าที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นควรใช้ทั้งสองวิธีควบคู่กันไปเนื่องจากแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันได้กล่าวแล้ว

โดยทั่วไปการประเมินอายุจะนิยมประเมินเป็นค่าอายุเฉลี่ย ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงกราฟ โดยค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงเลขมีค่าเท่ากับ 187,790 ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี) มีค่าความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.9 ส่วนค่าอายุเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงกราฟมีค่าเท่ากับ 187,000 ชั่วโมง (ประมาณ 21 ปี) มีค่าความเชื่อถือได้ประมาณร้อยละ 49.64

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงเช่น อายุเฉลี่ย ลักษณะความบกพร่องของผลิตภัณฑ์ และค่าความเชื่อถือได้นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายอย่างเช่น นำไปเป็นข้อมูลใน

การวางนโยบายการบริการและซ่อมบำรุง(Service and Maintenance) กำหนดระยะเวลาการรับประกันสินค้า(Warranty Period) หรืออาจนำไปพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อให้เหมาะสมกับไอซีชนิดนั้น ๆ มากขึ้น เช่นนำข้อมูลมาพิจารณาเพื่อลดระยะเวลาการทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test) ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

การทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test) เดิมจะทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดัน 5.5 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 168 ชั่วโมง ผลการทดสอบแทบจะไม่พบความล้มเหลวของไอซีเลย จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบเร่งนั้นพบว่าสามารถลดระยะเวลาการทดสอบลงได้ โดยเพิ่มระดับอุณหภูมิและแรงดัน การเพิ่มระดับอุณหภูมินั้นจะส่งผลกระทบต่อไอซีน้อยกว่าการเพิ่มระดับแรงดัน เนื่องจากการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิสูง (165 - 180 องศาเซลเซียส) และระดับแรงดันต่ำ(5.5 - 6.5 โวลต์) ผลการทดสอบไม่พบความล้มเหลวของไอซี ส่วนการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิสูง และระดับแรงดันสูง(มากกว่า 7 โวลต์) จะเริ่มพบความล้มเหลวของไอซี ดังนั้นเงื่อนไขใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test) นั้นควรมีระดับอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ระดับแรงดัน 6.0 - 6.5 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับความเค้นที่ไม่มีผลกระทบต่อกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่(Main Population) และยังสามารถทำให้ตรวจพบไอซีที่มีความบกพร่อง ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างส่วนน้อย(Sub-Population) อีกด้วย (ดูภาคผนวก ค.)

การศึกษากการประเมินอายุของไอซีโดยการทดสอบเร่งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นเท่านั้น และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้นอาจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยเพิ่มเงื่อนไขการทดสอบให้มากขึ้น สิ่งสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาด้วยคือการควบคุมกลุ่มตัวอย่างให้เป็นล็อตเดียวกัน เพื่อลดความแตกต่างที่เกิดจากการผลิตต่างเวลา

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทดสอบกับไอซีที่เป็นเทคโนโลยีแบบ CMOS และการห่อหุ้ม(Packaging) แบบ TSOP(Thin Small Outline Package) ดังนั้นหากจะทำการทดสอบกับไอซีที่มีเทคโนโลยีการผลิตหรือมีการห่อหุ้มแบบอื่น ๆ เช่น BGA(Ball Grid Array) ควรต้องทำการศึกษาถึงลักษณะการเกิดความล้มเหลวของเทคโนโลยีการผลิตหรือการห่อหุ้มแบบนั้น ๆ ด้วย เพราะไอซีแต่ละแบบจะมีลักษณะความล้มเหลวแตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

1. Wayne Nelson, Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses , John Wiley & Sons (1990)
2. Accelerated Life testing Reference , Reliasoft Publishing (2001)
3. Life Data Analysis Reference , Reliasoft Publishing (2001)
4. Elsayed A. Elsayed, Reliability Engineering, Addison Wesley Longman, Inc. (1996)
5. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ , คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2538)
6. E.A.Amerasekera & D.S.Campbell, Failure Mechanisms in Semiconductor Devices ,
John Wiley & Sons Ltd. (1987)
7. Perry L.Martin, Electronic Failure Analysis Handbook , McGraw-Hill (1999)
8. ผศ.พนม เพชรจตุพร, เอกสารประกอบการอบรม Electrostatic Discharge ,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (2545)
9. AMD, Reliability Evaluation Methodology , Internal Document
10. JESD22-A108-B, Temperature, Bias, and Operating Life , Jecdec Standard
11. What is Burn-in? [Online]. Available from: <http://www.aehr.com> [30/7/2003]
12. AMD, High Temperature Operating Life (HTOL) Tests , Internal Document
13. AMD, Datasheet , Internal Document
14. An Overview of Weibull Analysis [Online] . Available from: www.barringer1.com
[15/11/2002]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



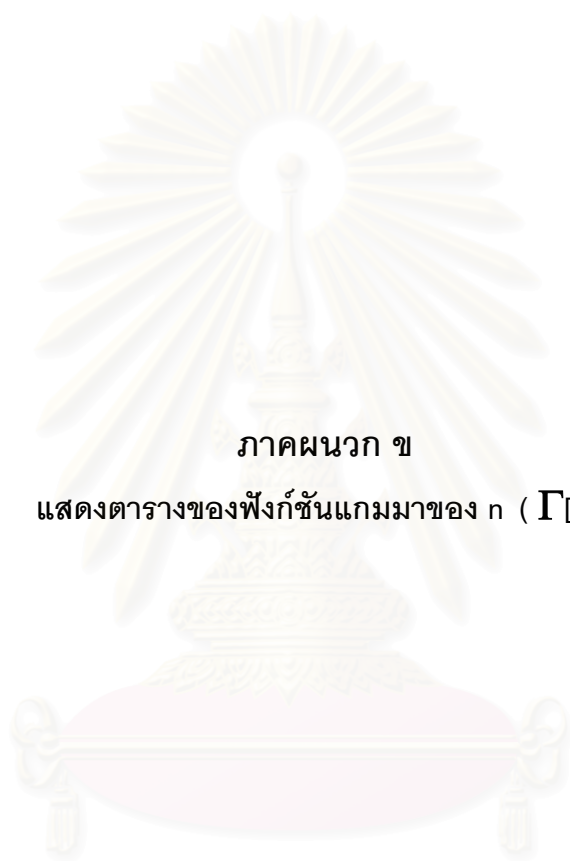
ภาคผนวก ก
แสดงตารางของ $\Phi[u]$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

u	·00	·01	·02	·03	·04	·05	·06	·07	·08	·09
- 0	·5000	·4960	·4920	·4880	·4840	·4801	·4761	·4721	·4681	·4641
- 1	·4602	·4562	·4522	·4483	·4443	·4404	·4364	·4325	·4286	·4247
- 2	·4207	·4168	·4129	·4090	·4052	·4013	·3974	·3936	·3897	·3859
- 3	·3821	·3783	·3745	·3707	·3669	·3632	·3594	·3557	·3520	·3483
- 4	·3446	·3409	·3372	·3336	·3300	·3264	·3228	·3192	·3156	·3121
- 5	·3085	·3050	·3015	·2981	·2946	·2912	·2877	·2843	·2810	·2776
- 6	·2743	·2709	·2676	·2643	·2611	·2578	·2546	·2514	·2483	·2451
- 7	·2420	·2389	·2358	·2327	·2297	·2266	·2236	·2206	·2177	·2148
- 8	·2119	·2090	·2061	·2033	·2005	·1977	·1949	·1922	·1894	·1867
- 9	·1841	·1814	·1788	·1762	·1736	·1711	·1685	·1660	·1635	·1611
-10	·1587	·1562	·1539	·1515	·1492	·1469	·1446	·1423	·1401	·1379
-11	·1357	·1335	·1314	·1292	·1271	·1251	·1230	·1210	·1190	·1170
-12	·1151	·1131	·1112	·1093	·1075	·1056	·1038	·1020	·1003	·9853
-13	·0968c	·09510	·09342	·09176	·09012	·08851	·08691	·08534	·08379	·08226
-14	·08076	·07927	·07780	·07636	·07493	·07353	·07215	·07078	·06944	·06811
-15	·06681	·06552	·06426	·06301	·06178	·06057	·05938	·05821	·05705	·05592
-16	·05480	·05370	·05262	·05155	·05050	·04947	·04846	·04746	·04648	·04551
-17	·04457	·04363	·04272	·04182	·04093	·04006	·03920	·03836	·03754	·03673
-18	·03593	·03515	·03438	·03362	·03288	·03210	·03144	·03074	·03005	·02938
-19	·02872	·02807	·02743	·02680	·02619	·02559	·02500	·02442	·02385	·02330
-20	·02275	·02222	·02169	·02118	·02068	·02018	·01970	·01923	·01876	·01831
-21	·01786	·01743	·01700	·01659	·01618	·01578	·01539	·01500	·01463	·01426
-22	·01390	·01355	·01321	·01287	·01255	·01222	·01191	·01160	·01130	·01101
-23	·01072	·01044	·01017	·009903	·009642	·009387	·009137	·008894	·008656	·008424
-24	·008198	·007976	·007760	·007549	·007344	·007143	·006947	·006756	·006569	·006387
-25	·006210	·006037	·005868	·005703	·005543	·005386	·005234	·005085	·004940	·004799
-26	·004661	·004527	·004396	·004269	·004145	·004025	·003907	·003793	·003681	·003573
-27	·003467	·003364	·003264	·003167	·003072	·002980	·002890	·002803	·002718	·002635
-28	·002555	·002477	·002401	·002327	·002256	·002186	·002118	·002052	·001988	·001926
-29	·001866	·001807	·001750	·001695	·001641	·001589	·001538	·001489	·001441	·001395
-30	·001350	·001306	·001264	·001223	·001183	·001144	·001107	·001070	·001035	·001001
-31	·009676	·009354	·009043	·008740	·008447	·008164	·007888	·007622	·007364	·007114
-32	·006871	·006637	·006410	·006190	·005976	·005770	·005571	·005377	·005190	·005009
-33	·004834	·004665	·004501	·004342	·004189	·004041	·003897	·003758	·003624	·003495
-34	·003369	·003248	·003131	·003018	·002909	·002803	·002701	·002602	·002507	·002415
-35	·002326	·002241	·002158	·002078	·002001	·001926	·001854	·001785	·001718	·001653
-36	·001591	·001531	·001473	·001417	·001363	·001311	·001261	·001213	·001166	·001121
-37	·001078	·001036	·009961	·009574	·009201	·008842	·008496	·008162	·007841	·007532
-38	·007235	·006948	·006673	·006407	·006152	·005906	·005669	·005442	·005223	·005012
-39	·004810	·004615	·004427	·004247	·004074	·003908	·003747	·003594	·003446	·003304
-40	·003167	·003036	·002910	·002789	·002673	·002561	·002454	·002351	·002252	·002157
-41	·002066	·001978	·001894	·001814	·001737	·001662	·001591	·001523	·001458	·001395
-42	·001335	·001277	·001222	·001168	·001118	·001069	·001022	·009774	·009345	·008934
-43	·008540	·008163	·007801	·007455	·007124	·006807	·006503	·006212	·005934	·005668
-44	·005413	·005169	·004935	·004712	·004498	·004294	·004098	·003911	·003732	·003561
-45	·003398	·003241	·003092	·002949	·002813	·002682	·002558	·002439	·002325	·002216
-46	·002112	·002013	·001919	·001828	·001742	·001660	·001581	·001506	·001434	·001366
-47	·001301	·001239	·001179	·001123	·001069	·001017	·009680	·009211	·008765	·008339
-48	·007933	·007547	·007178	·006827	·006492	·006173	·005869	·005580	·005304	·005042
-49	·004792	·004554	·004327	·004111	·003906	·003711	·003525	·003348	·003179	·003019

<i>u</i>	<i>-00</i>	<i>-01</i>	<i>-02</i>	<i>-03</i>	<i>-04</i>	<i>-05</i>	<i>-06</i>	<i>-07</i>	<i>-08</i>	<i>-09</i>
0	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
1	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
2	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
3	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
4	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
5	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
6	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
7	7580	7611	7642	7673	7703	7734	7764	7794	7823	7852
8	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
9	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
10	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
11	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
12	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	90147
13	90320	90490	90658	90824	90988	91149	91309	91466	91621	91774
14	91924	92073	92220	92364	92507	92647	92785	92922	93056	93189
15	93319	93448	93574	93699	93822	93943	94062	94179	94295	94408
16	94520	94630	94738	94845	94950	95053	95154	95254	95352	95449
17	95543	95637	95728	95818	95907	95994	96080	96164	96246	96327
18	96407	96485	96562	96638	96712	96784	96856	96926	96995	97062
19	97128	97193	97257	97320	97381	97441	97500	97558	97615	97670
20	97725	97778	97831	97882	97932	97982	98030	98077	98124	98169
21	98214	98257	98300	98341	98382	98422	98461	98500	98537	98574
22	98610	98645	98679	98713	98745	98778	98809	98840	98870	98899
23	98928	98956	98983	990097	990358	990613	990863	991106	991344	991576
24	991802	992024	992240	992451	992656	992857	993053	993244	993431	993613
25	993790	993963	994132	994297	994457	994614	994766	994915	995060	995201
26	995339	995473	995604	995731	995855	995975	996093	996207	996319	996427
27	996533	996636	996736	996833	996928	997020	997110	997197	997282	997365
28	997445	997523	997599	997673	997744	997814	997882	997948	998012	998074
29	998134	998193	998250	998305	998359	998411	998462	998511	998559	998605
30	998650	998694	998736	998777	998817	998856	998893	998930	998965	998999
31	9990324	9990646	9990957	9991260	9991553	9991836	9992112	9992378	9992636	9992886
32	9993129	9993363	9993590	9993810	9994024	9994230	9994429	9994623	9994810	9994991
33	9995166	9995335	9995499	9995658	9995811	9995959	9996103	9996242	9996376	9996505
34	9996631	9996752	9996869	9996982	9997091	9997197	9997299	9997398	9997493	9997585
35	9997674	9997759	9997842	9997922	9997999	9998074	9998146	9998215	9998282	9998347
36	9998409	9998469	9998527	9998583	9998637	9998689	9998739	9998787	9998834	9998879
37	9998922	9998964	99990039	99990426	99990799	99991158	99991504	99991838	99992159	99992468
38	99992765	99993052	99993327	99993593	99993848	99994094	99994331	99994558	99994777	99994988
39	99995190	99995385	99995573	99995753	99995926	99996092	99996253	99996406	99996554	99996696
40	99996833	99996964	99997090	99997211	99997327	99997439	99997546	99997649	99997748	99997843
41	99997934	99998022	99998106	99998186	99998263	99998338	99998409	99998477	99998542	99998605
42	99998665	99998723	99998778	99998832	99998882	99998931	99998978	999990226	999990655	999991066
43	999991460	999991837	999992199	999992545	999992876	999993193	999993497	999993788	999994066	999994332
44	999994587	999994831	999995065	999995288	999995502	999995706	999995902	999996089	999996268	999996439
45	999996602	999996759	999996908	999997051	999997187	999997318	999997442	999997561	999997675	999997784
46	999997888	999997987	999998081	999998172	999998258	999998340	999998419	999998494	999998566	999998634
47	999998699	999998761	999998821	999998877	999998931	999998983	9999990320	9999990789	9999991235	9999991661
48	9999992067	9999992453	9999992822	9999993173	9999993508	9999993827	9999994131	9999994420	9999994696	9999994958
49	9999995208	9999995446	9999995673	9999995889	9999996094	9999996289	9999996475	9999996652	9999996821	9999996981

From A. Hald, *Statistical Tables and Formulas*, Wiley, New York, 1952, Table II. Reproduced by permission.



ภาคผนวก ข

แสดงตารางของฟังก์ชันแกมมาของ n ($\Gamma[n]$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Gamma Function

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
0.0100	99.4327	0.5100	1.7384	1.0100	0.9943	1.5100	0.8866
0.0200	49.4423	0.5200	1.7058	1.0200	0.9888	1.5200	0.8870
0.0300	32.7850	0.5300	1.6747	1.0300	0.9836	1.5300	0.8876
0.0400	24.4610	0.5400	1.6448	1.0400	0.9784	1.5400	0.8882
0.0500	19.4701	0.5500	1.6161	1.0500	0.9735	1.5500	0.8889
0.0600	16.1457	0.5600	1.5886	1.0600	0.9687	1.5600	0.8896
0.0700	13.7736	0.5700	1.5623	1.0700	0.9642	1.5700	0.8905
0.0800	11.9966	0.5800	1.5369	1.0800	0.9597	1.5800	0.8914
0.0900	10.6162	0.5900	1.5126	1.0900	0.9555	1.5900	0.8924
0.1000	9.5135	0.6000	1.4892	1.1000	0.9513	1.6000	0.8935
0.1100	8.6127	0.6100	1.4667	1.1100	0.9474	1.6100	0.8947
0.1200	7.8632	0.6200	1.4450	1.1200	0.9436	1.6200	0.8959
0.1300	7.2302	0.6300	1.4242	1.1300	0.9399	1.6300	0.8972
0.1400	6.6887	0.6400	1.4041	1.1400	0.9364	1.6400	0.8986
0.1500	6.2203	0.6500	1.3848	1.1500	0.9330	1.6500	0.9001
0.1600	5.8113	0.6600	1.3662	1.1600	0.9298	1.6600	0.9017
0.1700	5.4512	0.6700	1.3482	1.1700	0.9267	1.6700	0.9033
0.1800	5.1318	0.6800	1.3309	1.1800	0.9237	1.6800	0.9050
0.1900	4.8468	0.6900	1.3142	1.1900	0.9209	1.6900	0.9068
0.2000	4.5908	0.7000	1.2981	1.2000	0.9182	1.7000	0.9086
0.2100	4.3599	0.7100	1.2825	1.2100	0.9156	1.7100	0.9106
0.2200	4.1505	0.7200	1.2675	1.2200	0.9131	1.7200	0.9126
0.2300	3.9598	0.7300	1.2530	1.2300	0.9108	1.7300	0.9147
0.2400	3.7855	0.7400	1.2390	1.2400	0.9085	1.7400	0.9168
0.2500	3.6256	0.7500	1.2254	1.2500	0.9064	1.7500	0.9191
0.2600	3.4785	0.7600	1.2123	1.2600	0.9044	1.7600	0.9214
0.2700	3.3426	0.7700	1.1997	1.2700	0.9025	1.7700	0.9238
0.2800	3.2169	0.7800	1.1875	1.2800	0.9007	1.7800	0.9262
0.2900	3.1001	0.7900	1.1757	1.2900	0.8990	1.7900	0.9288
0.3000	2.9916	0.8000	1.1642	1.3000	0.8975	1.8000	0.9314
0.3100	2.8903	0.8100	1.1532	1.3100	0.8960	1.8100	0.9341
0.3200	2.7958	0.8200	1.1425	1.3200	0.8946	1.8200	0.9368
0.3300	2.7072	0.8300	1.1322	1.3300	0.8934	1.8300	0.9397
0.3400	2.6242	0.8400	1.1222	1.3400	0.8922	1.8400	0.9426
0.3500	2.5461	0.8500	1.1125	1.3500	0.8912	1.8500	0.9456
0.3600	2.4727	0.8600	1.1031	1.3600	0.8902	1.8600	0.9487
0.3700	2.4036	0.8700	1.0941	1.3700	0.8893	1.8700	0.9518
0.3800	2.3383	0.8800	1.0853	1.3800	0.8885	1.8800	0.9551
0.3900	2.2765	0.8900	1.0768	1.3900	0.8879	1.8900	0.9584
0.4000	2.2182	0.9000	1.0686	1.4000	0.8873	1.9000	0.9618
0.4100	2.1628	0.9100	1.0607	1.4100	0.8868	1.9100	0.9652
0.4200	2.1104	0.9200	1.0530	1.4200	0.8864	1.9200	0.9688
0.4300	2.0605	0.9300	1.0456	1.4300	0.8860	1.9300	0.9724
0.4400	2.0132	0.9400	1.0384	1.4400	0.8858	1.9400	0.9761
0.4500	1.9681	0.9500	1.0315	1.4500	0.8857	1.9500	0.9799
0.4600	1.9252	0.9600	1.0247	1.4600	0.8856	1.9600	0.9837
0.4700	1.8843	0.9700	1.0182	1.4700	0.8856	1.9700	0.9877
0.4800	1.8453	0.9800	1.0119	1.4800	0.8857	1.9800	0.9917
0.4900	1.8080	0.9900	1.0059	1.4900	0.8859	1.9900	0.9958
0.5000	1.7725	1.0000	1.0000	1.5000	0.8862	2.0000	1.0000

Gamma Function

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
2.0100	1.0043	2.5100	1.3388	3.0100	2.0186	3.5100	3.3603
2.0200	1.0086	2.5200	1.3483	3.0200	2.0374	3.5200	3.3977
2.0300	1.0131	2.5300	1.3580	3.0300	2.0565	3.5300	3.4357
2.0400	1.0176	2.5400	1.3678	3.0400	2.0759	3.5400	3.4742
2.0500	1.0222	2.5500	1.3777	3.0500	2.0955	3.5500	3.5132
2.0600	1.0269	2.5600	1.3878	3.0600	2.1153	3.5600	3.5529
2.0700	1.0316	2.5700	1.3981	3.0700	2.1355	3.5700	3.5930
2.0800	1.0365	2.5800	1.4084	3.0800	2.1559	3.5800	3.6338
2.0900	1.0415	2.5900	1.4190	3.0900	2.1766	3.5900	3.6751
2.1000	1.0465	2.6000	1.4296	3.1000	2.1976	3.6000	3.7170
2.1100	1.0516	2.6100	1.4404	3.1100	2.2189	3.6100	3.7595
2.1200	1.0568	2.6200	1.4514	3.1200	2.2405	3.6200	3.8027
2.1300	1.0621	2.6300	1.4625	3.1300	2.2623	3.6300	3.8464
2.1400	1.0675	2.6400	1.4738	3.1400	2.2845	3.6400	3.8908
2.1500	1.0730	2.6500	1.4852	3.1500	2.3069	3.6500	3.9358
2.1600	1.0786	2.6600	1.4968	3.1600	2.3297	3.6600	3.9814
2.1700	1.0842	2.6700	1.5085	3.1700	2.3528	3.6700	4.0277
2.1800	1.0900	2.6800	1.5204	3.1800	2.3762	3.6800	4.0747
2.1900	1.0959	2.6900	1.5325	3.1900	2.3999	3.6900	4.1223
2.2000	1.1018	2.7000	1.5447	3.2000	2.4240	3.7000	4.1707
2.2100	1.1078	2.7100	1.5571	3.2100	2.4483	3.7100	4.2197
2.2200	1.1140	2.7200	1.5696	3.2200	2.4731	3.7200	4.2694
2.2300	1.1202	2.7300	1.5824	3.2300	2.4981	3.7300	4.3199
2.2400	1.1266	2.7400	1.5953	3.2400	2.5235	3.7400	4.3711
2.2500	1.1330	2.7500	1.6084	3.2500	2.5493	3.7500	4.4230
2.2600	1.1395	2.7600	1.6216	3.2600	2.5754	3.7600	4.4757
2.2700	1.1462	2.7700	1.6351	3.2700	2.6018	3.7700	4.5291
2.2800	1.1529	2.7800	1.6487	3.2800	2.6287	3.7800	4.5833
2.2900	1.1598	2.7900	1.6625	3.2900	2.6559	3.7900	4.6384
2.3000	1.1667	2.8000	1.6765	3.3000	2.6834	3.8000	4.6942
2.3100	1.1738	2.8100	1.6907	3.3100	2.7114	3.8100	4.7508
2.3200	1.1809	2.8200	1.7051	3.3200	2.7398	3.8200	4.8083
2.3300	1.1882	2.8300	1.7196	3.3300	2.7685	3.8300	4.8666
2.3400	1.1956	2.8400	1.7344	3.3400	2.7976	3.8400	4.9257
2.3500	1.2031	2.8500	1.7494	3.3500	2.8272	3.8500	4.9857
2.3600	1.2107	2.8600	1.7646	3.3600	2.8571	3.8600	5.0466
2.3700	1.2184	2.8700	1.7799	3.3700	2.8875	3.8700	5.1084
2.3800	1.2262	2.8800	1.7955	3.3800	2.9183	3.8800	5.1711
2.3900	1.2341	2.8900	1.8113	3.3900	2.9495	3.8900	5.2348
2.4000	1.2422	2.9000	1.8274	3.4000	2.9812	3.9000	5.2993
2.4100	1.2503	2.9100	1.8436	3.4100	3.0133	3.9100	5.3648
2.4200	1.2586	2.9200	1.8600	3.4200	3.0459	3.9200	5.4313
2.4300	1.2670	2.9300	1.8767	3.4300	3.0789	3.9300	5.4988
2.4400	1.2756	2.9400	1.8936	3.4400	3.1124	3.9400	5.5673
2.4500	1.2842	2.9500	1.9108	3.4500	3.1463	3.9500	5.6368
2.4600	1.2930	2.9600	1.9281	3.4600	3.1807	3.9600	5.7073
2.4700	1.3019	2.9700	1.9457	3.4700	3.2156	3.9700	5.7789
2.4800	1.3109	2.9800	1.9636	3.4800	3.2510	3.9800	5.8515
2.4900	1.3201	2.9900	1.9817	3.4900	3.2869	3.9900	5.9252
2.5000	1.3293	3.0000	2.0000	3.5000	3.3233	4.0000	6.0000

Gamma Function							
n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
4.0100	6.0759	4.5100	11.7945	5.0100	24.3645	5.5100	53.1933
4.0200	6.1530	4.5200	11.9599	5.0200	24.7351	5.5200	54.0589
4.0300	6.2312	4.5300	12.1280	5.0300	25.1118	5.5300	54.9396
4.0400	6.3106	4.5400	12.2986	5.0400	25.4948	5.5400	55.8358
4.0500	6.3912	4.5500	12.4720	5.0500	25.8843	5.5500	56.7477
4.0600	6.4730	4.5600	12.6482	5.0600	26.2803	5.5600	57.6757
4.0700	6.5560	4.5700	12.8271	5.0700	26.6829	5.5700	58.6200
4.0800	6.6403	4.5800	13.0089	5.0800	27.0922	5.5800	59.5809
4.0900	6.7258	4.5900	13.1936	5.0900	27.5085	5.5900	60.5588
4.1000	6.8126	4.6000	13.3813	5.1000	27.9317	5.6000	61.5539
4.1100	6.9008	4.6100	13.5719	5.1100	28.3621	5.6100	62.5666
4.1200	6.9902	4.6200	13.7656	5.1200	28.7997	5.6200	63.5972
4.1300	7.0811	4.6300	13.9624	5.1300	29.2448	5.6300	64.6460
4.1400	7.1733	4.6400	14.1624	5.1400	29.6973	5.6400	65.7135
4.1500	7.2669	4.6500	14.3655	5.1500	30.1575	5.6500	66.7998
4.1600	7.3619	4.6600	14.5720	5.1600	30.6255	5.6600	67.9054
4.1700	7.4584	4.6700	14.7817	5.1700	31.1014	5.6700	69.0306
4.1800	7.5563	4.6800	14.9948	5.1800	31.5853	5.6800	70.1758
4.1900	7.6557	4.6900	15.2114	5.1900	32.0775	5.6900	71.3414
4.2000	7.7567	4.7000	15.4314	5.2000	32.5781	5.7000	72.5277
4.2100	7.8592	4.7100	15.6550	5.2100	33.0872	5.7100	73.7352
4.2200	7.9632	4.7200	15.8822	5.2200	33.6049	5.7200	74.9642
4.2300	8.0689	4.7300	16.1131	5.2300	34.1314	5.7300	76.2152
4.2400	8.1762	4.7400	16.3478	5.2400	34.6670	5.7400	77.4884
4.2500	8.2851	4.7500	16.5862	5.2500	35.2117	5.7500	78.7845
4.2600	8.3957	4.7600	16.8285	5.2600	35.7656	5.7600	80.1038
4.2700	8.5080	4.7700	17.0748	5.2700	36.3291	5.7700	81.4467
4.2800	8.6220	4.7800	17.3250	5.2800	36.9022	5.7800	82.8136
4.2900	8.7378	4.7900	17.5794	5.2900	37.4851	5.7900	84.2052
4.3000	8.8554	4.8000	17.8378	5.3000	38.0780	5.8000	85.6216
4.3100	8.9747	4.8100	18.1005	5.3100	38.6811	5.8100	87.0636
4.3200	9.0960	4.8200	18.3675	5.3200	39.2946	5.8200	88.5315
4.3300	9.2191	4.8300	18.6389	5.3300	39.9186	5.8300	90.0259
4.3400	9.3441	4.8400	18.9147	5.3400	40.5534	5.8400	91.5472
4.3500	9.4711	4.8500	19.1950	5.3500	41.1991	5.8500	93.0960
4.3600	9.6000	4.8600	19.4800	5.3600	41.8559	5.8600	94.6727
4.3700	9.7309	4.8700	19.7696	5.3700	42.5241	5.8700	96.2780
4.3800	9.8639	4.8800	20.0640	5.3800	43.2039	5.8800	97.9122
4.3900	9.9989	4.8900	20.3632	5.3900	43.8953	5.8900	99.5761
4.4000	10.1361	4.9000	20.6674	5.4000	44.5988	5.9000	101.2701
4.4100	10.2754	4.9100	20.9765	5.4100	45.3145	5.9100	102.9949
4.4200	10.4169	4.9200	21.2908	5.4200	46.0426	5.9200	104.7509
4.4300	10.5606	4.9300	21.6103	5.4300	46.7833	5.9300	106.5389
4.4400	10.7065	4.9400	21.9351	5.4400	47.5370	5.9400	108.3594
4.4500	10.8548	4.9500	22.2652	5.4500	48.3037	5.9500	110.2129
4.4600	11.0053	4.9600	22.6009	5.4600	49.0838	5.9600	112.1003
4.4700	11.1583	4.9700	22.9420	5.4700	49.8775	5.9700	114.0219
4.4800	11.3136	4.9800	23.2889	5.4800	50.6850	5.9800	115.9787
4.4900	11.4714	4.9900	23.6415	5.4900	51.5067	5.9900	117.9711
4.5000	11.6317	5.0000	24.0000	5.5000	52.3427	6.0000	120.0000

Gamma Function

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
6.0100	122.0661	6.5100	293.0953	7.0100	733.6171	7.5100	1908.0504
6.0200	124.1700	6.5200	298.4052	7.0200	747.5034	7.5200	1945.6019
6.0300	126.3123	6.5300	303.8161	7.0300	761.6632	7.5300	1983.9192
6.0400	128.4940	6.5400	309.3305	7.0400	776.1037	7.5400	2023.0216
6.0500	130.7156	6.5500	314.9500	7.0500	790.8292	7.5500	2062.9221
6.0600	132.9781	6.5600	320.6770	7.0600	805.8471	7.5600	2103.6414
6.0700	135.2820	6.5700	326.5134	7.0700	821.1620	7.5700	2145.1926
6.0800	137.6285	6.5800	332.4616	7.0800	836.7813	7.5800	2187.5977
6.0900	140.0181	6.5900	338.5236	7.0900	852.7099	7.5900	2230.8706
6.1000	142.4518	6.6000	344.7020	7.1000	868.9559	7.6000	2275.0332
6.1100	144.9303	6.6100	350.9986	7.1100	885.5239	7.6100	2320.1006
6.1200	147.4546	6.6200	357.4164	7.1200	902.4222	7.6200	2366.0967
6.1300	150.0255	6.6300	363.9571	7.1300	919.6564	7.6300	2413.0356
6.1400	152.6441	6.6400	370.6239	7.1400	937.2346	7.6400	2460.9426
6.1500	155.3111	6.6500	377.4185	7.1500	955.1622	7.6500	2509.8330
6.1600	158.0274	6.6600	384.3443	7.1600	973.4484	7.6600	2559.7332
6.1700	160.7941	6.6700	391.4035	7.1700	992.0996	7.6700	2610.6589
6.1800	163.6120	6.6800	398.5985	7.1800	1011.1224	7.6800	2662.6379
6.1900	166.4825	6.6900	405.9326	7.1900	1030.5265	7.6900	2715.6887
6.2000	169.4060	6.7000	413.4079	7.2000	1050.3174	7.7000	2769.8330
6.2100	172.3841	6.7100	421.0280	7.2100	1070.5054	7.7100	2825.0981
6.2200	175.4175	6.7200	428.7951	7.2200	1091.0967	7.7200	2881.5032
6.2300	178.5075	6.7300	436.7129	7.2300	1112.1016	7.7300	2939.0776
6.2400	181.6549	6.7400	444.7835	7.2400	1133.5264	7.7400	2997.8406
6.2500	184.8612	6.7500	453.0110	7.2500	1155.3823	7.7500	3057.8242
6.2600	188.1272	6.7600	461.3976	7.2600	1177.6760	7.7600	3119.0474
6.2700	191.4543	6.7700	469.9473	7.2700	1200.4185	7.7700	3181.5435
6.2800	194.8435	6.7800	478.6527	7.2800	1223.6171	7.7800	3245.3328
6.2900	198.2962	6.7900	487.5479	7.2900	1247.2832	7.7900	3310.4497
6.3000	201.8134	6.8000	496.6054	7.3000	1271.4244	7.8000	3376.9170
6.3100	205.3968	6.8100	505.8398	7.3100	1296.0537	7.8100	3444.7686
6.3200	209.0471	6.8200	515.2535	7.3200	1321.1777	7.8200	3514.0283
6.3300	212.7661	6.8300	524.8511	7.3300	1346.8097	7.8300	3584.7332
6.3400	216.5549	6.8400	534.6356	7.3400	1372.9580	7.8400	3656.9072
6.3500	220.4150	6.8500	544.6116	7.3500	1399.6354	7.8500	3730.5891
6.3600	224.3476	6.8600	554.7819	7.3600	1426.8507	7.8600	3805.8037
6.3700	228.3544	6.8700	565.1516	7.3700	1454.6176	7.8700	3882.5908
6.3800	232.4366	6.8800	575.7236	7.3800	1482.9451	7.8800	3960.9780
6.3900	236.5959	6.8900	586.5032	7.3900	1511.8477	7.8900	4041.0063
6.4000	240.8335	6.9000	597.4933	7.4000	1541.3342	7.9000	4122.7036
6.4100	245.1514	6.9100	608.6996	7.4100	1571.4203	7.9100	4206.1133
6.4200	249.5509	6.9200	620.1256	7.4200	1602.1152	7.9200	4291.2651
6.4300	254.0334	6.9300	631.7754	7.4300	1633.4349	7.9300	4378.2036
6.4400	258.6011	6.9400	643.6547	7.4400	1665.3906	7.9400	4466.9629
6.4500	263.2550	6.9500	655.7667	7.4500	1697.9950	7.9500	4557.5786
6.4600	267.9975	6.9600	668.1176	7.4600	1731.2637	7.9600	4650.0986
6.4700	272.8297	6.9700	680.7109	7.4700	1765.2081	7.9700	4744.5557
6.4800	277.7539	6.9800	693.5528	7.4800	1799.8456	7.9800	4840.9985
6.4900	282.7716	6.9900	706.6470	7.4900	1835.1874	7.9900	4939.4629
6.5000	287.8849	7.0000	720.0000	7.5000	1871.2517	8.0000	5040.0000

Gamma Function

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
8.0100	5142.6606	8.5100	14329.4697	9.0100	41192.7070	9.5100	121943.7969
8.0200	5247.4688	8.5200	14630.9121	9.0200	42084.6953	9.5200	124655.3359
8.0300	5354.4927	8.5300	14938.9092	9.0300	42996.5742	9.5300	127428.8906
8.0400	5463.7700	8.5400	15253.5820	9.0400	43928.7188	9.5400	130265.6094
8.0500	5575.3521	8.5500	15575.0781	9.0500	44881.5820	9.5500	133164.9062
8.0600	5689.2749	8.5600	15903.5146	9.0600	45855.5547	9.5600	136134.0625
8.0700	5805.6143	8.5700	16239.1074	9.0700	46851.3047	9.5700	139169.1562
8.0800	5924.4116	8.5800	16581.9902	9.0800	47869.2461	9.5800	142273.4688
8.0900	6045.7188	8.5900	16932.3242	9.0900	48909.8711	9.5900	145448.6562
8.1000	6169.5806	8.6000	17290.2344	9.1000	49973.5977	9.6000	148696.0156
8.1100	6296.0747	8.6100	17655.9668	9.1100	51061.1602	9.6100	152017.8594
8.1200	6425.2466	8.6200	18029.6543	9.1200	52173.0078	9.6200	155415.6406
8.1300	6557.1558	8.6300	18411.4805	9.1300	53309.6797	9.6300	158891.0625
8.1400	6691.8481	8.6400	18801.5801	9.1400	54471.6328	9.6400	162445.6406
8.1500	6829.4102	8.6500	19200.2207	9.1500	55659.6914	9.6500	166081.8906
8.1600	6969.8911	8.6600	19607.5547	9.1600	56874.3047	9.6600	169801.4062
8.1700	7113.3540	8.6700	20023.7734	9.1700	58116.1055	9.6700	173606.1250
8.1800	7259.8521	8.6800	20449.0371	9.1800	59385.5820	9.6800	177497.6250
8.1900	7409.4775	8.6900	20883.6270	9.1900	60683.6133	9.6900	181478.7188
8.2000	7562.2842	8.7000	21327.7109	9.2000	62010.7266	9.7000	185551.0938
8.2100	7718.3447	8.7100	21781.5059	9.2100	63367.6016	9.7100	189716.9219
8.2200	7877.7256	8.7200	22245.2266	9.2200	64754.9023	9.7200	193977.9688
8.2300	8040.4858	8.7300	22719.0449	9.2300	66173.1953	9.7300	198337.2812
8.2400	8206.7314	8.7400	23203.2871	9.2400	67623.4688	9.7400	202796.7500
8.2500	8376.5215	8.7500	23698.1367	9.2500	69106.3047	9.7500	207358.7031
8.2600	8549.9346	8.7600	24203.8340	9.2600	70622.4609	9.7600	212025.5625
8.2700	8727.0332	8.7700	24720.5664	9.2700	72172.5547	9.7700	216799.3438
8.2800	8907.9307	8.7800	25248.6895	9.2800	73757.6641	9.7800	221683.4844
8.2900	9092.6934	8.7900	25788.4023	9.2900	75378.4297	9.7900	226680.0938
8.3000	9281.4092	8.8000	26339.9766	9.3000	77035.6953	9.8000	231791.7969
8.3100	9474.1416	8.8100	26903.6133	9.3100	78730.1172	9.8100	237020.8281
8.3200	9671.0205	8.8200	27479.7012	9.3200	80462.8984	9.8200	242370.9844
8.3300	9872.1152	8.8300	28068.4609	9.3300	82234.7188	9.8300	247844.5156
8.3400	10077.5205	8.8400	28670.1797	9.3400	84046.5312	9.8400	253444.3906
8.3500	10287.3096	8.8500	29285.0918	9.3500	85899.0312	9.8500	259173.0625
8.3600	10501.6201	8.8600	29913.6172	9.3600	87793.5469	9.8600	265034.6250
8.3700	10720.5322	8.8700	30555.9902	9.3700	89730.8516	9.8700	271031.6250
8.3800	10944.1436	8.8800	31212.5391	9.3800	91711.9297	9.8800	277167.3125
8.3900	11172.5430	8.8900	31883.5117	9.3900	93737.6328	9.8900	283444.3438
8.4000	11405.8721	8.9000	32569.3535	9.4000	95809.3203	9.9000	289867.2188
8.4100	11644.2227	8.9100	33270.3555	9.4100	97927.9297	9.9100	296438.8438
8.4200	11887.7080	8.9200	33986.8477	9.4200	100094.4922	9.9200	303162.7500
8.4300	12136.4102	8.9300	34719.1172	9.4300	102309.9219	9.9300	310041.6562
8.4400	12390.4961	8.9400	35467.6445	9.4400	104575.7812	9.9400	317080.7500
8.4500	12650.0625	8.9500	36232.7461	9.4500	106893.0078	9.9500	324283.0938
8.4600	12915.2285	8.9600	37014.7852	9.4600	109262.8281	9.9600	331652.4688
8.4700	13186.1191	8.9700	37814.1406	9.4700	111686.1875	9.9700	339192.1875
8.4800	13462.8301	8.9800	38631.1328	9.4800	114164.8047	9.9800	346907.5625
8.4900	13745.5537	8.9900	39466.3086	9.4900	116699.7344	9.9900	354802.0625
8.5000	14034.3877	9.0000	40320.0000	9.5000	119292.2969	10.0000	362880.0000



ภาคผนวก ค

แสดงการลดระยะเวลาการทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การลดระยะเวลาการทดสอบอายุการใช้งาน (Life Test)

เงื่อนไขเดิมที่ทำการทดสอบคือ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดัน 5.5 โวลต์ (แรงดันปกติ) ระยะเวลาทดสอบ 168 ชั่วโมง ผลการทดสอบแทบจะไม่พบความล้มเหลวของไอซีเลย ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบที่ได้ทำการทดสอบมาแล้วนั้นพบว่าควรเพิ่มระดับอุณหภูมิเป็น 160 องศาเซลเซียสและเพิ่มระดับแรงดันเป็น 6.0 ถึง 6.5 โวลต์ เนื่องจากเป็นระดับความเค้นที่ไม่ทำให้ไอซีกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เกิดความล้มเหลว นอกจากนี้ยังทำให้ตรวจพบไอซีที่มีความบกพร่อง(Defect) ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างส่วนน้อยอีกด้วย

การเพิ่มระดับความเค้นทำให้ระยะเวลาในการทดสอบสั้นลง เป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และลดต้นทุนการผลิตได้ โดยสามารถคำนวณระยะเวลาในการทดสอบได้จากสมการตัวประกอบเร่ง(Acceleration Factor) (ดูสมการที่ 2.64) ดังนี้

$$L_u = L_a \left(\frac{V_a}{V_u} \right)^n e^{B \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

หรือ

$$T_{b2} = T_{b1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n e^{B \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (1)$$

โดยที่ T_{b2} คือ ระยะเวลาทดสอบที่ระดับความเค้นสูงกว่า(Higher Stress)

T_{b1} คือ ระยะเวลาทดสอบที่ระดับความเค้นต่ำกว่า(Lower Stress)

V_1 คือ ระดับแรงดันที่ต่ำกว่า (Lower Voltage)

V_2 คือ ระดับแรงดันที่สูงกว่า (Higher Voltage)

T_1 คือ ระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (Lower Temperature)

T_2 คือ ระดับอุณหภูมิที่สูงกว่า (Higher Temperature)

B คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง T-NT

n คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง T-NT

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด(Maximum Likelihood Method) จะได้ค่าพารามิเตอร์ B และ n ดังนี้

$$B = 5111.3216$$

$$n = 3.5701$$

แทนค่าในสมการที่ (1) โดยกำหนดระดับความเค้นที่ต่ำกว่า(Lower Stress) คือ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดัน 5.5 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 168 ชั่วโมง (T_1 , V_1 และ T_{b1} ตามลำดับ) ผลการทดสอบที่ได้จะไม่มีความล้มเหลวเกิดขึ้น ส่วนระดับความเค้นที่สูงกว่านั้นอาจทำการทดสอบ 2 เงื่อนไข คือ

1) อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงดัน 6.0 โวลต์ (T_2 และ V_2 ตามลำดับ)

สามารถคำนวณหาระยะเวลาทดสอบที่ระดับความเค้นสูงกว่าได้โดยแทนค่าในสมการที่ (1) จะได้

$$T_{b2} = 93.15 \text{ ชั่วโมง}$$

2) อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงดัน 6.5 โวลต์ (T_2 และ V_2 ตามลำดับ)

สามารถคำนวณหาระยะเวลาทดสอบที่ระดับความเค้นสูงกว่าได้โดยแทนค่าในสมการที่ (1) จะได้

$$T_{b2} = 70 \text{ ชั่วโมง}$$

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการลดระยะเวลาการทดสอบการทำให้เข้าที่ (Burn-in Test) นั้น ควรทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยทดสอบเทียบกับเงื่อนไขการทดสอบที่ทำให้ไอซีเกิดความล้มเหลว ซึ่งต้องเป็นลักษณะความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการอ่านข้อมูล(DB17) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาข้อมูลจากลักษณะความล้มเหลวชนิดเดียว (Single Failure Mode) และไอซีที่นำมาทดสอบนั้นควรเป็นไอซีในล็อตเดียวกัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสมชบา สังกสิทธิเวทย์ เกิดวันที่ 27 เมษายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(ระบบควบคุม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย