การแจกแจงแกมมา — อายุในฐานะจำนวนเหตุการณ์ความเสียหาย และอะไหล่ที่ภารกิจต้องการ

เมนู: ข้อมูลอายุ ▸ การขึ้นกับเวลา ▸ การแจกแจงแกมมา...

ภาค 1 — ฟังก์ชันนี้ทำอะไร

คำนวณอะไร แบบจำลองแกมมาอ่านอายุว่าเป็นเวลาที่ใช้สะสมเหตุการณ์ความเสียหายสุ่ม k ครั้ง ซึ่งมาถึงโดยเฉลี่ยหนึ่งครั้งทุก θ หน่วยเวลา: T ~ แกมมา(k, θ) ReliaEn ฟิตรูปร่าง k (จำนวนแรงกระแทกที่หน่วยรอดได้) และสเกล θ (ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างแรงกระแทก) ด้วยภาวะน่าจะเป็นสูงสุดพร้อมขอบเขต และให้อายุเฉลี่ย MTTF = k·θ มัธยฐาน อายุ B และช่วงบำรุงรักษา จากนั้นบอกว่าหน่วยสึกหรอหรือไม่ คานทางวิศวกรรมใดขยับ B10 ได้มากกว่า การทดสอบที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ขอบเขตแคบลงเท่าใด และเมื่อคุณกำหนดภารกิจ ต้องใช้อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็นกี่หน่วยจึงถึงเป้าหมาย

สิ่งที่ **ReliaEn พิมพ์**	สิ่งที่บอก
k̂ และ **θ̂** พร้อมขอบเขต	หน่วยรอดเหตุการณ์ความเสียหายได้กี่ครั้ง และเหตุการณ์มาถึงบ่อยเพียงใด
MTTF = k·θ มัธยฐาน B10	ตัวเลขอายุของแบบจำลองที่ฟิต
คำตัดสินรูปร่าง	สึกหรอ ล้มเหลวช่วงแรก หรือยังพิสูจน์ไม่ได้ อ่านจากขอบเขตของ k
แบบจำลองคู่แข่ง	ไวบูลล์หรือล็อกนอร์มอลอธิบายข้อมูลได้ดีพอกันหรือไม่ ตาม AIC
เรื่องของแรงกระแทก และ**คุณค่าของข้อมูลเพิ่มเติม**	การแก้ไขใดคุ้มกว่า ระหว่างทนได้อีกหนึ่งครั้งกับชะลอแรงกระแทก และการทดสอบที่ใหญ่ขึ้นจะได้อะไร
แบบสแตนด์บาย	จำนวนอะไหล่สแตนด์บายแบบเย็นที่น้อยที่สุดที่ทำให้ภารกิจถึงความเชื่อถือได้เป้าหมาย

จากข้อมูลใด อายุที่ล้มเหลวในคอลัมน์เดียวของแผ่นงาน หนึ่งแถวต่อหนึ่งหน่วยที่ล้มเหลว อย่างน้อยสองค่า แต่ละค่ามากกว่า 0 อายุของหน่วยที่ยังไม่ล้มเหลว (ถ้ามี) อยู่ในอีกคอลัมน์หนึ่ง

วิศวกรใช้เมื่อใด เมื่อความล้มเหลวเกิดจากความเสียหายที่สะสม เช่น รอบภาระ ภาระอนุภาค หรือหน่วยสแตนด์บายแบบเย็นที่ใช้ต่อกันทีละหน่วย และคำถามคือหน่วยอยู่ได้นานเท่าใด คานใดยืดอายุได้ หรือภารกิจต้องใช้อะไหล่กี่หน่วย

ไม่ควรใช้เมื่อ

สถานการณ์	ใช้แทน
ความล้มเหลวมาจากจุดอ่อนที่สุดของรอยตำหนิจำนวนมาก	ข้อมูลอายุ ▸ การขึ้นกับเวลา ▸ การแจกแจงไวบูลล์ (2P)...
ความล้มเหลวมาจากการเติบโตแบบทวีคูณ (รอยร้าวจากความล้า)	ข้อมูลอายุ ▸ การขึ้นกับเวลา ▸ การแจกแจงล็อกนอร์มอล...
รู้แล้วว่าอัตราความล้มเหลวคงที่	ข้อมูลอายุ ▸ ประมาณฟังก์ชันความล้มเหลว ▸ ข้อมูลสมบูรณ์...

ภาค 2 — ข้อมูลนำเข้าของตัวอย่าง

สถานการณ์. โรงผลิตน้ำใช้ไส้กรอง 25 ชิ้นจนแต่ละชิ้นอุดตัน ไส้กรองแต่ละชิ้นรับภาระอนุภาคหลายครั้งก่อนล้มเหลว วิศวกรความเชื่อถือได้ต้องการรู้อายุของไส้กรอง สึกหรอหรือไม่ และต้องใช้ไส้กรองสำรองกี่ชิ้นเพื่อให้ภารกิจ 100 ชั่วโมงมีความเชื่อถือได้ 90% เมื่อใช้งานทีละชิ้น

ข้อมูลนำเข้า	ค่า
อายุที่ล้มเหลว เป็นชั่วโมงทำงาน (25)	34.2, 37.3, 50.1, ... (ยี่สิบห้าค่าของไฟล์)
ไฟล์ในไฟล์ zip ของตัวอย่างพร้อมวิธีทำ	`2-Gamma-Distribution/Example-1.csv` — หนึ่งคอลัมน์ หัวคอลัมน์ `Failure times` 25 แถว
`เวลาภารกิจ (สแตนด์บาย)`	100 — พิมพ์ในแบบฟอร์ม

ความเชื่อถือได้เป้าหมายของสแตนด์บาย %	90 — พิมพ์ในแบบฟอร์ม
ความเชื่อมั่น % / ระดับอายุ B %	95 / 10 — ค่าที่แบบฟอร์มมีอยู่เมื่อเปิด

	1 A	B
1	34.2	
2	37.3	
3	50.1	
4	58.3	
5	65.5	
6	66.0	
7	77.0	
8	77.9	
9	79.6	
10	107.5	
11	115.9	
12	121.7	
13	129.5	
14	139.9	
15	143.8	
16	149.3	
17	153.8	
18	164.8	
19	168.2	
20	178.4	
21	180.2	
22	186.9	
23	191.5	
24	304.7	
25	402.8	
26		

ข้อมูลตัวอย่างในแผ่นงาน

- ① คอลัมน์ A: อายุที่ล้มเหลว 25 ค่า หนึ่งค่าต่อแถว เป็นชั่วโมงทำงาน

ภาค 3 — วิธีใช้ ทีละขั้นตอน

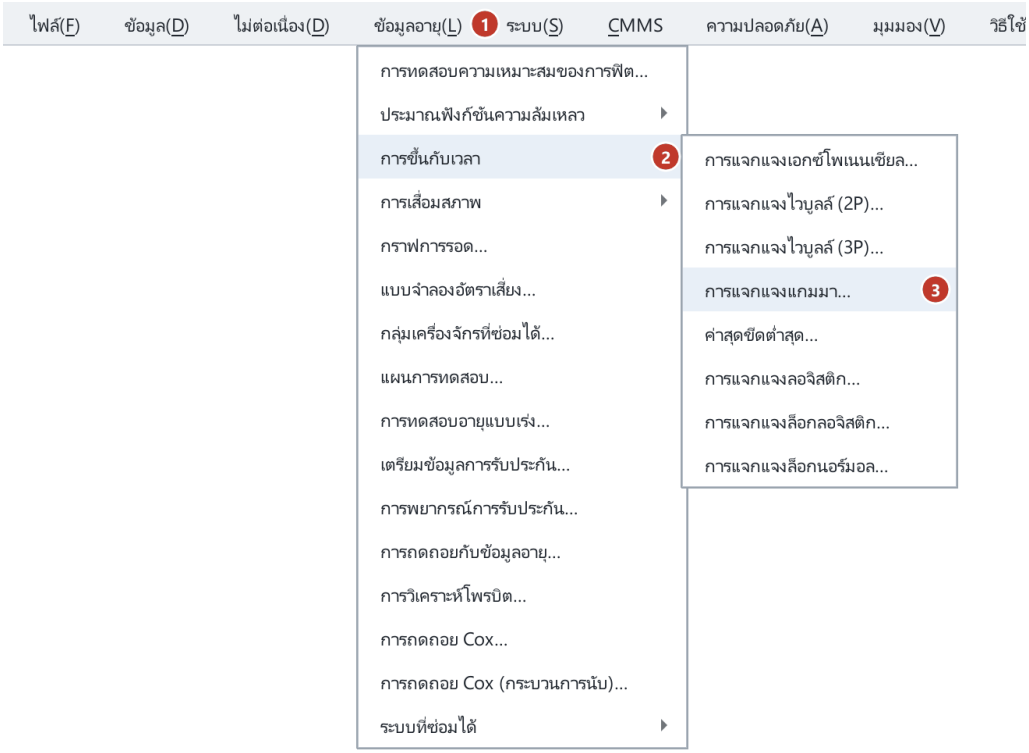
1. **ใส่อายุที่ล้มเหลวในคอลัมน์ A** คัดลอกค่า 25 ค่าของ Example-1.csv ที่อยู่ใต้หัวคอลัมน์ Failure times ลงในคอลัมน์ A ของแผ่นงาน เริ่มที่แถว 1

	① A	B
1	34.2	
2	37.3	
3	50.1	
4	58.3	
5	65.5	
6	66.0	
7	77.0	
8	77.9	
9	79.6	
10	107.5	
11	115.9	
12	121.7	
13	129.5	
14	139.9	
15	143.8	
16	149.3	
17	153.8	
18	164.8	
19	168.2	
20	178.4	
21	180.2	
22	186.9	
23	191.5	
24	304.7	
25	402.8	
26		

ขั้นตอนที่ 1 — อายุที่ล้มเหลวในคอลัมน์ A

- ① คอลัมน์ A: อายุที่ล้มเหลว 25 ค่า ตั้งแต่ 34.2 ถึง 402.8

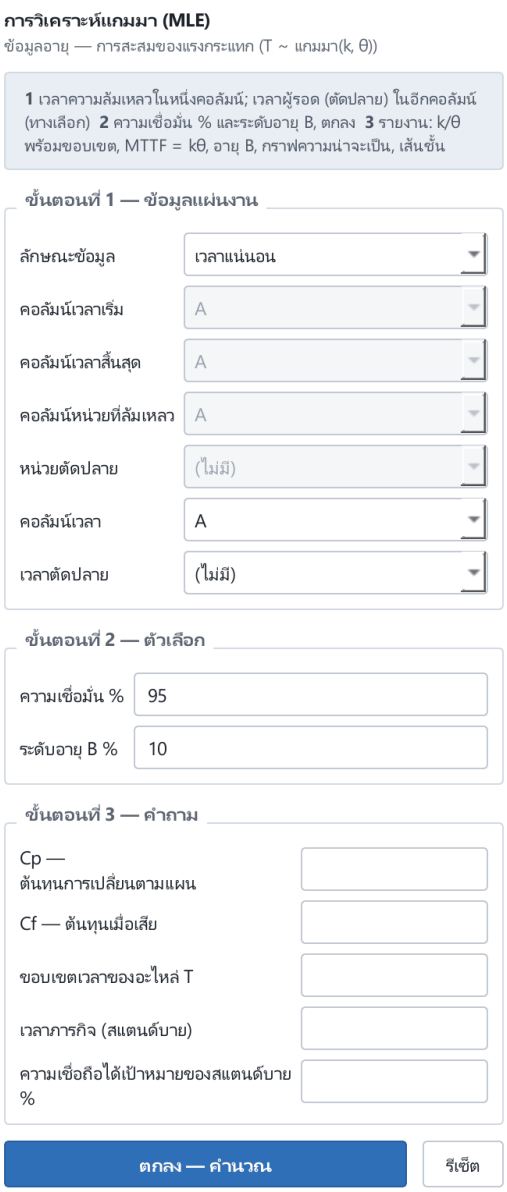
2. **เลือก** ข้อมูลอายุ ▸ **การขึ้นกับเวลา** ▸ **การแจกแจงแกมมา...** ในแถบเมนู แบบฟอร์ม การวิเคราะห์แกมมา (MLE) เปิดขึ้นในแผงด้านซ้าย



ขั้นตอนที่ 2 — เส้นทางเมนู

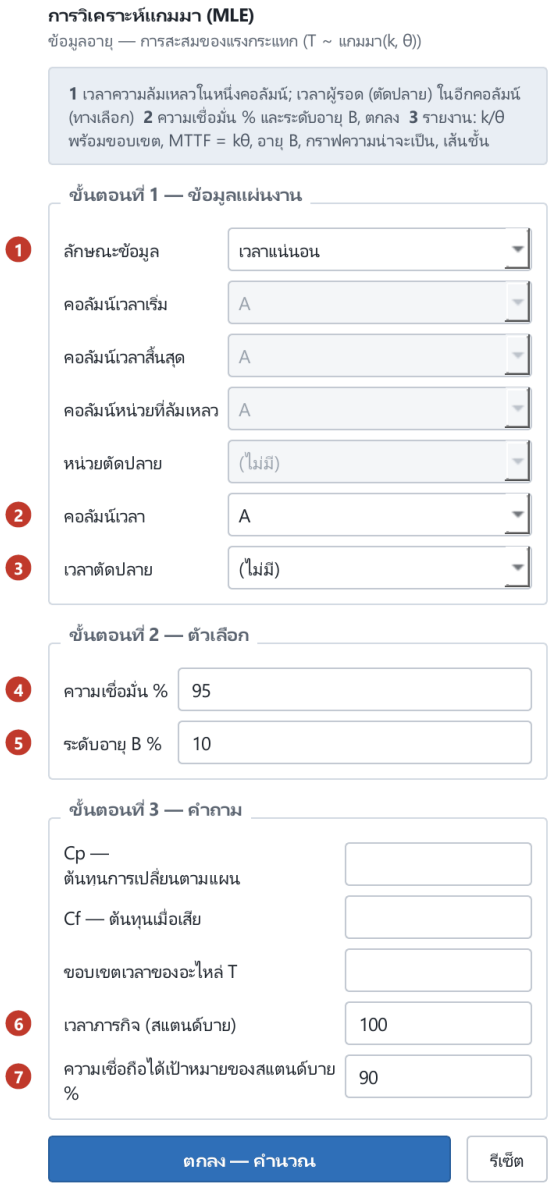
- ① ข้อมูลอายุ: เมนู
- ② การขึ้นกับเวลา: เมนูย่อย
- ③ การแจกแจงแกมมา...: รายการที่ต้องคลิก

แบบฟอร์มเมื่อเปิด ก่อนตั้งค่าช่องใด:



ขั้นตอนที่ 2 — แบบฟอร์มเมื่อเปิด

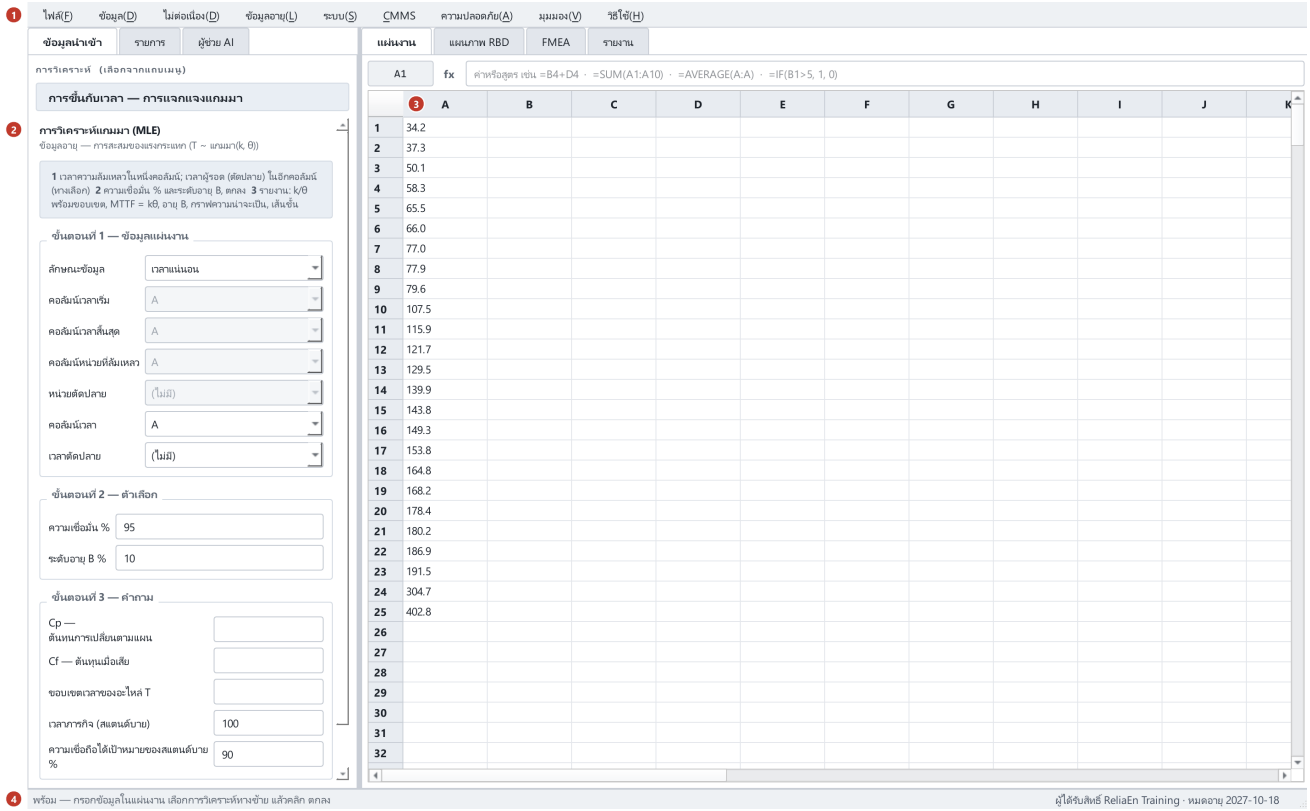
ขั้นตอนที่ 3 ถึง 9 ตั้งค่าเจ็ดช่องของแบบฟอร์ม ซึ่งมีเครื่องหมาย ① ถึง ⑦ ในภาพ:



ขั้นตอนที่ 3 ถึง 9 — แบบฟอร์มที่ตั้งค่าสำหรับตัวอย่างนี้

3. ① **ตรวจว่า** ลักษณะข้อมูล **เป็น** เวลาแน่นอน หนึ่งอายุต่อหนึ่งหน่วย สี่ช่องที่อยู่ใต้ช่องนี้ ตั้งแต่ คอลัมน์เวลาเริ่ม ถึง หน่วยตัดปลาย ใช้กับช่วงการตรวจ และเป็นสีเทาอยู่
4. ② **ใน** คอลัมน์เวลา **เลือก A** คอลัมน์ที่มีอายุที่ล้มเหลว
5. ③ **ปล่อย** เวลาตัดปลาย **ไว้ที่** (ไม่มี) ไส้กรองทุกชิ้นใช้จนอุดตัน
6. ④ **ตรวจว่า** ความเชื่อมั่น % **เป็น 95** ค่านี้กำหนดทุกขอบเขตในรายงาน
7. ⑤ **ตรวจว่า** ระดับอายุ B % **เป็น 10** อายุ B ที่พิมพ์ในผลลัพธ์
8. ⑥ **ใน** เวลาภารกิจ (สแตนด์บาย) **พิมพ์ 100** ภารกิจที่ตัวออกแบบสแตนด์บายใช้คำนวณจำนวนอะไหล่ Cp — ต้นทุนการเปลี่ยนตามแผน Cf — ต้นทุนเมื่อเสีย และ ขอบเขตเวลาของอะไหล่ T ว่างไว้ในตัวอย่างนี้
9. ⑦ **ใน** ความเชื่อถือได้เป้าหมายของสแตนด์บาย % **พิมพ์ 90** ความเชื่อถือได้ที่ภารกิจต้องถึง เป็นร้อยละ

10. **คลิก ตกลง — คำนวณ** ที่ท้ายแบบฟอร์ม (② ในภาพด้านล่าง) ReliaEn คำนวณและแสดงรายงาน



ขั้นตอนที่ 10 — หน้าต่างก่อนกดตกลง

- ① แถบเมนู: ไฟล์, ข้อมูล, ไม่ต่อเนื่อง, ข้อมูลอายุ, ระบบ, CMMS, มุมมอง, วิธีใช้
- ② แบบฟอร์มที่ตั้งค่าตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 9 มี ตกลง — คำนวณ อยู่ที่ท้าย
- ③ คอลัมน์ A: อายุที่ล้มเหลว 25 ค่า
- ④ แถบสถานะ: พร้อม — กรอกข้อมูลในแผ่นงาน เลือกการวิเคราะห์ทางซ้าย แล้วคลิก ตกลง และ ผู้ได้รับสิทธิ์ ReliaEn Training · หมดอายุ 2027-10-18

ภาค 4 — รายงาน ทีละการ์ด

ข้อมูลอายุ — แกมมา (2P) — การขึ้นกับเวลา

2026-11-13 15:13:39

$T \sim \text{แกมมา}(k, \theta)$; $R(t) = Q(k, t/\theta)$; $B_q = \theta \cdot P^{-1}(k, q)$; $MTTF = k \cdot \theta$

ส่วนหัวของรายงาน

- ชื่อเรื่อง ข้อมูลอายุ — แกมมา (2P) — การขึ้นกับเวลา วันที่และเวลาที่คำนวณ และแบบจำลองในหนึ่งบรรทัด: T ~ แกมมา(k, θ); R(t) = Q(k, t/θ); B_q = θ·P⁻¹(k, q); MTTF = k·θ

ข้อมูลนำเข้า

1	n — หน่วยที่ทดสอบ	25
2	r — ความล้มเหลว	25
3	ตัดปลาย (หน่วยที่ยังไม่ล้มเหลว)	0
4	การประมาณค่า	MLE โปรไฟล์ (ข้อมูลสมบูรณ์)

ข้อมูลนำเข้า

- ① n — หน่วยที่ทดสอบ 25
- ② r — ความล้มเหลว 25 ตรวจ r ก่อน: เซลล์ว่างถูกข้ามไป
- ③ ตัดปลาย (หน่วยที่ยังไม่ล้มเหลว) 0
- ④ การประมาณค่า MLE โปรไฟล์ (ข้อมูลสมบูรณ์): การฟิตรักษา $\hat{k}\cdot\hat{\theta}$ ให้เท่ากับอายุที่ล้มเหลวเฉลี่ย และค้นหาเฉพาะ k

ผลลัพธ์

1	$\hat{k}$ — รูปร่าง (จำนวนแรงกระแทก)	3.08544 [1.82136, 5.22683]
2	$\hat{\theta}$ — สเกล (ระยะห่างเฉลี่ยของแรงกระแทก)	43.881 [24.7563, 77.7796]
3	MTTF = $k\cdot\theta$	135.39
4	อายุมัธยฐาน	121.08
5	อายุ B10	50.67 [33.61, 76.38]

ผลลัพธ์

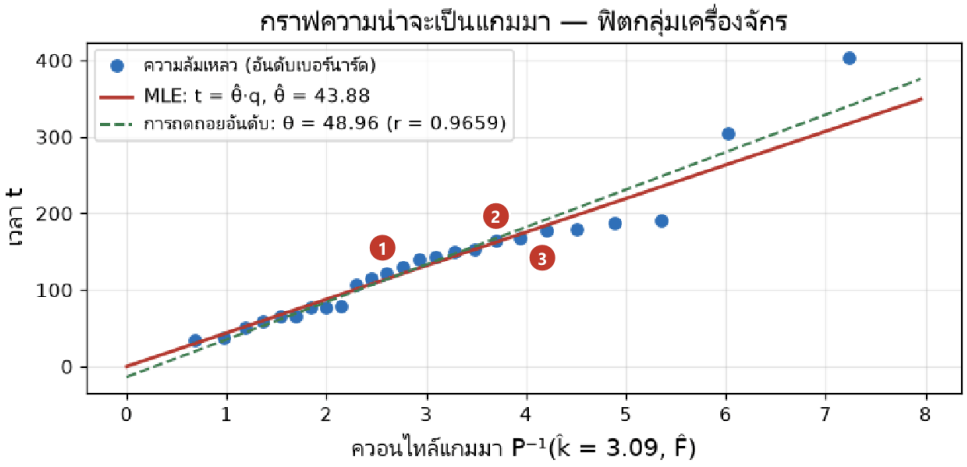
- ① $\hat{k}$ — รูปร่าง (จำนวนแรงกระแทก) 3.08544 [1.82136, 5.22683]: ไส้กรองรอดภาระอนุภาคได้ประมาณสามครั้ง
- ② $\hat{\theta}$ — สเกล (ระยะห่างเฉลี่ยของแรงกระแทก) 43.881 [24.7563, 77.7796]: ภาระหนึ่งครั้งประมาณทุก 44 ชั่วโมง
- ③ MTTF = $k\cdot\theta$ 135.39: เท่ากับค่าเฉลี่ยของอายุทั้ง 25 ค่าพอดี
- ④ อายุมัธยฐาน 121.08: ไส้กรองครึ่งหนึ่งอุดตันภายในอายุนี้
- ⑤ อายุ B10 50.67 [33.61, 76.38]: ไส้กรองหนึ่งในสิบอุดตันภายในอายุนี้

การตีความ

1	แบบจำลองการสะสมแรงกระแทก: หน่วยล้มเหลวหลังเหตุการณ์ความเสียหายสุ่ม k ≈ 3.09 ครั้ง มาถึงราวหนึ่งครั้งต่อ 43.88 หน่วยเวลา — T ~ แกมมา(k, θ), R(t) = Q(k, t/θ) MTTF = kθ = 135.39; 10% ของหน่วยล้มเหลวภายใน B10 = 50.67 ช่องฟิสิกส์: แรงกระแทก/สแตนด์บาย (แกมมา) กับจุดอ่อนที่สุด (ไวบูลล์) กับการเติบโตแบบทวีคูณ (ล็อกนอร์มอล)

การตีความ

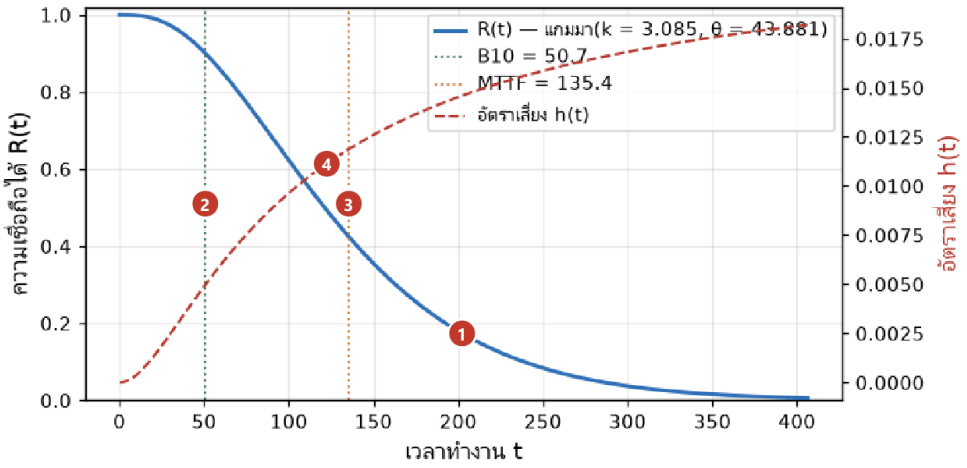
- ① การอ่านของ ReliaEn: แบบจำลองการสะสมแรงกระแทก: หน่วยล้มเหลวหลังเหตุการณ์ความเสียหายสุ่ม k ≈ 3.09 ครั้ง มาถึงราวหนึ่งครั้งต่อ 43.88 หน่วยเวลา — T ~ แกมมา(k, θ), R(t) = Q(k, t/θ) MTTF = kθ = 135.39; 10% ของหน่วยล้มเหลวภายใน B10 = 50.67 ช่องฟิสิกส์: แรงกระแทก/สแตนด์บาย (แกมมา) กับจุดอ่อนที่สุด (ไวบูลล์) กับการเติบโตแบบทวีคูณ (ล็อกนอร์มอล)



กราฟแบบโต้ตอบ

กราฟความน่าจะเป็นแกมมา

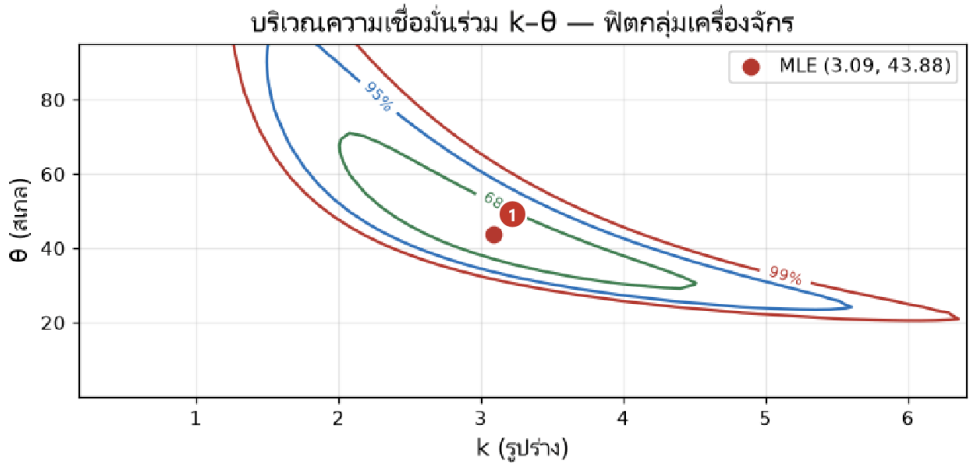
- ① ความล้มเหลว (อันดับเบอร์นาร์ด): อายุ 25 ค่าบนกราฟความน่าจะเป็นแกมมาที่รูปร่างที่ฟิต
- ② MLE: t = θ̂·q, θ̂ = 43.88: เส้นที่ฟิต ผ่านจุดกำเนิด
- ③ การถดถอยอันดับ: θ = 48.96 (r = 0.9659): เส้นตรงที่ฟิตจากกราฟเอง เพื่อเปรียบเทียบ



กราฟแบบโต้ตอบ

ความเชื่อถือได้และอัตราเสี่ยง

- ① R(t) — แกมมา(k = 3.085, θ = 43.881): สัดส่วนของไส้กรองที่ยังทำงานอยู่ ณ แต่ละอายุ
- ② B10 = 50.7: จุดที่ R ตัด 90%
- ③ MTTF = 135.4: อายุเฉลี่ยบนเส้นโค้ง
- ④ อัตราเสี่ยง h(t): เพิ่มขึ้นตามอายุเข้าหาเพดาน 1/θ̂



🔍 กราฟแบบโต้ตอบ

บริเวณความเชื่อมั่นร่วมของ k และ θ

- ① MLE (3.09, 43.88): ค่าประมาณ อยู่ภายในบริเวณ 68%, 95% และ 99% โดย k และ θ แลกเปลี่ยนกันตามแกนยาวของบริเวณ

คำตัดสินรูปร่าง — k บอกอะไร (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

1. สึกหรอ (ทั้งช่วงความเชื่อมั่น): k̂ = 3.085 และแม้ขอบล่าง (1.821) ก็เกิน 1 — ความเสี่ยงความล้มเหลวโตขึ้นตามอายุ สังเกตความละเอียดอ่อนของแกมมา: อัตราเสี่ยงเพิ่มขึ้นสู่เพดาน 1/θ̂ = 0.02279 ต่างจากอัตราเสี่ยงไวบูลล์ที่โตไร้ขอบเขต — หน่วยเก่าเข้าใกล้อัตราความล้มเหลวคงที่ (เลวร้ายสุด) ไม่ใช่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

คำตัดสินรูปร่าง — k บอกอะไร (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

- ① สึกหรอ (ทั้งช่วงความเชื่อมั่น): k̂ = 3.085 และแม้ขอบล่าง (1.821) ก็เกิน 1 — ความเสี่ยงความล้มเหลวโตขึ้นตามอายุ สังเกตความละเอียดอ่อนของแกมมา: อัตราเสี่ยงเพิ่มขึ้นสู่เพดาน 1/θ̂ = 0.02279 ต่างจากอัตราเสี่ยงไวบูลล์ที่โตไร้ขอบเขต — หน่วยเก่าเข้าใกล้อัตราความล้มเหลวคงที่ (เลวร้ายสุด) ไม่ใช่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

การเปรียบเทียบวิธีประมาณค่า — ฟิตกลุ่มเครื่องจักร

1. MLE เป็นแบบจำลองที่รายงาน; เส้น RR คือฟิตของกราฟความน่าจะเป็นเองที่รูปร่างของ MLE — แสดงเพื่อตรวจสอบไขว้กับซอฟต์แวร์ที่ใช้การถดถอยอันดับ ช่องว่างของจุดตัดหรือความชันที่ใหญ่บ่งชี้ว่าแบบจำลองไม่เหมาะ

2 วิธี	3 θ (สเกล)	4 จุดตัดแกน	5 r
6 MLE (ที่รายงาน)	43.8810	0 (โดยโครงสร้าง)	–
7 การถดถอยอันดับ (เส้นบนกราฟ)	48.9558	-13.71	0.9659

การเปรียบเทียบวิธีประมาณค่า — ฟิตกลุ่มเครื่องจักร

- ① MLE เป็นแบบจำลองที่รายงาน; เส้น RR คือฟิตของกราฟความน่าจะเป็นเองที่รูปร่างของ MLE — แสดงเพื่อตรวจสอบไขว้กับซอฟต์แวร์ที่ใช้การถดถอยอันดับ ช่องว่างของจุดตัดหรือความชันที่ใหญ่บ่งชี้ว่าแบบจำลองไม่เหมาะ
- ② ถึง ⑤ คอลัมน์ วิธี, θ (สเกล), จุดตัดแกน, r
- ⑥ MLE (ที่รายงาน): θ 43.8810, จุดตัดแกน 0 (โดยโครงสร้าง)
- ⑦ การถดถอยอันดับ (เส้นบนกราฟ): θ 48.9558, จุดตัดแกน -13.71, r 0.9659

การตรวจสอบการฟิตของกราฟความน่าจะเป็น (PPCC, ระดับ 5%) — ฟิตกลุ่มเครื่องจักร

1. ไม่ปฏิเสธความตรง (r = 0.9659 ≥ ค่าวิกฤต 0.9482)
2. การจำลองแบบมีค่าเริ่มต้นสุ่มที่รูปร่างที่ฟิต (ถือว่าทราบค่า — การประมาณที่ระบุไว้ ไม่ปิดบัง)

การตรวจสอบการฟิตของกราฟความน่าจะเป็น (PPCC, ระดับ 5%) — ฟิตกลุ่มเครื่องจักร

- ① ไม่ปฏิเสธความตรง (r = 0.9659 ≥ ค่าวิกฤต 0.9482) กราฟไม่ปฏิเสธแบบจำลองแกมมา
- ② การจำลองแบบมีค่าเริ่มต้นสุ่มที่รูปร่างที่ฟิต (ถือว่าทราบค่า — การประมาณที่ระบุไว้ ไม่ปิดบัง)

แบบจำลองคู่แข่ง — แกมมากับไวบูลล์กับล็อกนอร์มอล (ข้อมูลเดียวกัน)

1. ล็อกนอร์มอล(μ = 4.737, σ = 0.597) อธิบายข้อมูลนี้ได้ดีที่สุดตาม AIC

2 แบบจำลอง	3 ln ภาวะน่าจะเป็น	4 AIC	
5 แกมมา (การวิเคราะห์นี้)	-141.168	286.3	
6 ไวบูลล์(β = 1.782, η = 153.014)	-142.052	288.1	
7 ล็อกนอร์มอล(μ = 4.737, σ = 0.597)	-141.014	286.0	◄ ดีที่สุด

8. ด้วยตัวอย่างเล็ก ทั้งสามมักแทบแยกไม่ออกด้วยสถิติการฟิต — กลไกเป็นตัวตัดสิน: การสะสมความเสียหาย/สแตนด์บาย → แกมมา; จุดอ่อนที่สุดของรอยตำหนิจำนวนมาก → ไวบูลล์; การเติบโตแบบทวีคูณ (รอยร้าวจากความล้า เวลาซ่อม) → ล็อกนอร์มอล

แบบจำลองคู่แข่ง — แกมมากับไวบูลล์กับล็อกนอร์มอล (ข้อมูลเดียวกัน)

- ① ล็อกนอร์มอล(μ = 4.737, σ = 0.597) อธิบายข้อมูลนี้ได้ดีที่สุดตาม AIC
- ② ถึง ④ คอลัมน์ แบบจำลอง, ln ภาวะน่าจะเป็น, AIC
- ⑤ แกมมา (การวิเคราะห์นี้): -141.168, AIC 286.3
- ⑥ ไวบูลล์(β = 1.782, η = 153.014): -142.052, AIC 288.1
- ⑦ ล็อกนอร์มอล(μ = 4.737, σ = 0.597): -141.014, AIC 286.0, ◄ ดีที่สุด
- ⑧ ด้วยตัวอย่างเล็ก ทั้งสามมักแทบแยกไม่ออกด้วยสถิติการฟิต — กลไกเป็นตัวตัดสิน: การสะสมความเสียหาย/สแตนด์บาย → แกมมา; จุดอ่อนที่สุดของรอยตำหนิจำนวนมาก → ไวบูลล์; การเติบโตแบบทวีคูณ (รอยร้าวจากความล้า เวลาซ่อม) → ล็อกนอร์มอล

เรื่องของแรงกระแทก — การแก้ไขใดคุ้มกว่า (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

1. การฟิตอ่านได้ว่า: หน่วยรอดเหตุการณ์ความเสียหาย ≈ 3.09 ครั้ง ราวหนึ่งครั้งทุก 43.88 หน่วยเวลา คานทางวิศวกรรมสองอันที่ต่างกันขยับ B10: เพิ่มความทนต่อความเสียหาย (วัสดุ ส่วนเผื่อออกแบบ → k) และชะลอการมาถึงของความเสียหาย (ความเครียดใช้งาน สภาพแวดล้อม → θ)

2 สถานการณ์	3 พารามิเตอร์	4 B10
5 วันนี้	k = 3.09, θ = 43.88	50.7
6 ทนได้อีกหนึ่งครั้ง (ส่วนเผื่อออกแบบ)	k + 1 = 4.09	79.1
7 ลดอัตราแรงกระแทก 10%	θ × 1.1	55.7
8 ลดอัตราแรงกระแทก 20%	θ × 1.2	60.8
9 ลดอัตราแรงกระแทก 30%	θ × 1.3	65.9

10. B10 สเกลตาม θ พอดี; คุณค่าของคาน k ขึ้นกับว่า k อยู่ที่ใดแล้ว (ผลได้ต่อครั้งลดลงเมื่อ k โต)

เรื่องของแรงกระแทก — การแก้ไขใดคุ้มกว่า (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

- ① การฟิตอ่านได้ว่า: หน่วยรอดเหตุการณ์ความเสียหาย ≈ 3.09 ครั้ง ราวหนึ่งครั้งทุก 43.88 หน่วยเวลา คานทางวิศวกรรมสองอันที่ต่างกันขยับ B10: เพิ่มความทนต่อความเสียหาย (วัสดุ ส่วนเผื่อออกแบบ → k) และชะลอการมาถึงของความเสียหาย (ความเครียดใช้งาน สภาพแวดล้อม → θ)
- ② ถึง ④ คอลัมน์ สถานการณ์, พารามิเตอร์, B10
- ⑤ วันนี้: k = 3.09, θ = 43.88, B10 50.7
- ⑥ ทนได้อีกหนึ่งครั้ง (ส่วนเผื่อออกแบบ): k + 1 = 4.09, B10 79.1
- ⑦ ลดอัตราแรงกระแทก 10%: θ × 1.1, B10 55.7
- ⑧ ลดอัตราแรงกระแทก 20%: θ × 1.2, B10 60.8
- ⑨ ลดอัตราแรงกระแทก 30%: θ × 1.3, B10 65.9
- ⑩ B10 สเกลตาม θ พอดี; คุณค่าของคาน k ขึ้นกับว่า k อยู่ที่ใดแล้ว (ผลได้ต่อครั้งลดลงเมื่อ k โต)

คุณค่าของข้อมูลเพิ่มเติม — B10 ที่ยืนยันได้ (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

1. ค่าประมาณจุดวันนี้: 50.7 ขอบเขตแคบลงตาม √n — คิดราคาการทดสอบรอบถัดไปก่อนซื้อ

รอบการทดสอบ	B10 ที่ยืนยันได้ (ขอบล่าง)
วันนี้	33.6
n = 30	34.8
n = 35	35.8
n = 40	36.6
n = 50	37.9

7. การฉายภาพสมมติว่าค่าประมาณคงอยู่

คุณค่าของข้อมูลเพิ่มเติม — B10 ที่ยืนยันได้ (ฟิตกลุ่มเครื่องจักร)

- ① ค่าประมาณจุดวันนี้: 50.7 ขอบเขตแคบลงตาม √n — คิดราคาการทดสอบรอบถัดไปก่อนซื้อ
- ② วันนี้: ขอบล่างของ B10 33.6
- ③ n = 30: 34.8
- ④ n = 35: 35.8
- ⑤ n = 40: 36.6
- ⑥ n = 50: 37.9
- ⑦ การฉายภาพสมมติว่าค่าประมาณคงอยู่

แบบสแตนด์บาย — อะไหล่ที่ต้องการสำหรับภารกิจ (จาก k̂ และ θ̂)

1. n* = 1 อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็น (+ หน่วยที่ทำงาน — อายุระบบ แกมมา(2·k̂, θ̂)) ทำให้ R(ภารกิจ 100) ≥ 90%

2 n — อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็น	3 R_sys(ภารกิจ)	4 ผลได้ส่วนเพิ่ม
0	0.6222	+0.6222
1	0.9762	+0.3539
2	0.9996	+0.0234
3	1.0000	+0.0004

9. สแตนด์บายแบบเย็น: หนึ่งหน่วยทำงาน + อะไหล่ n หน่วย แต่ละหน่วยมีอายุตามที่ประมาณได้ แกมมา(k̂, θ̂) → อายุระบบเป็นแกมมา((n + 1)·k̂, θ̂) อย่างแม่นตรง (อายุแกมมาที่เป็นอิสระกันและมีสเกลเดียวกันรวมพารามิเตอร์รูปร่างเข้าด้วยกัน); R = Q((n + 1)·k̂, t/θ̂) รูปปิด — ไม่ต้องจำลอง

แบบสแตนด์บาย — อะไหล่ที่ต้องการสำหรับภารกิจ (จาก k̂ และ θ̂)

- ① n* = 1 อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็น (+ หน่วยที่ทำงาน — อายุระบบ แกมมา(2·k̂, θ̂)) ทำให้ R(ภารกิจ 100) ≥ 90% อะไหล่หนึ่งหน่วยก็พอ
- ② n — อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็น: อะไหล่ที่อยู่ข้างไส้กรองที่ทำงาน
- ③ R_sys(ภารกิจ): ความเชื่อถือได้ของกลุ่มตลอดภารกิจ 100 ชั่วโมง
- ④ ผลได้ส่วนเพิ่ม: สิ่งที่อะไหล่แต่ละหน่วยที่เพิ่มให้
- ⑤ ไม่มีอะไหล่: 0.6222 - ไส้กรองที่ทำงานอยู่เพียงชิ้นเดียว
- ⑥ อะไหล่หนึ่งหน่วย: 0.9762 เพิ่มขึ้น +0.3539 - แถวแรกที่ถึงหรือเกิน 90%
- ⑦ อะไหล่สองหน่วย: 0.9996 เพิ่มขึ้นเพียง +0.0234
- ⑧ อะไหล่สามหน่วย: 1.0000 เพิ่มขึ้น +0.0004
- ⑨ สแตนด์บายแบบเย็น: หนึ่งหน่วยทำงาน + อะไหล่ n หน่วย แต่ละหน่วยมีอายุตามที่ประมาณได้ แกมมา(k̂, θ̂) → อายุระบบเป็นแกมมา((n + 1)·k̂, θ̂) อย่างแม่นตรง (อายุแกมมาที่เป็นอิสระกันและมีสเกลเดียวกันรวมพารามิเตอร์รูปร่างเข้าด้วยกัน); R = Q((n + 1)·k̂, t/θ̂) รูปปิด — ไม่ต้องจำลอง

ช่วงบำรุงรักษา — เวลาทำงานเพื่อคงอยู่ที่หรือเหนือความเชื่อถือได้เป้าหมาย

1 แบบจำลอง: แกมมา(k = 3.085, θ = 43.881) — ซ่อมบำรุงก่อนที่หน่วยจะสะสมเวลาทำงานเท่านี้ เพื่อรักษาความเชื่อถือได้ไว้ที่หรือเหนือเป้าหมาย

2 R เป้าหมาย	3 เวลาทำงาน t
95%	37.8
4 90%	50.7
85%	61.0
80%	70.1
75%	78.8
70%	87.1
65%	95.4
60%	103.7
55%	112.2
50%	121.1
45%	130.4
40%	140.3
35%	151.1
30%	163.0
25%	176.5
20%	192.5
15%	212.2
10%	238.7
5%	281.9

ช่วงบำรุงรักษา — เวลาทำงานเพื่อคงอยู่ที่หรือเหนือความเชื่อถือได้เป้าหมาย

- ① แบบจำลอง: แกมมา(k = 3.085, θ = 43.881) — ซ่อมบำรุงก่อนที่หน่วยจะสะสมเวลาทำงานเท่านี้ เพื่อรักษาความเชื่อถือได้ไว้ที่หรือเหนือเป้าหมาย
- ② R เป้าหมาย: ความเชื่อถือได้ที่ต้องการคงไว้ ตั้งแต่ 95% ลงไปถึง 5%
- ③ เวลาทำงาน t: ระยะทำงานนานที่สุดที่ยังคงความเชื่อถือได้นั้น
- ④ แถว 90%: 50.7 ชั่วโมง คือ B10

ตารางเปอร์เซ็นไทล์ — อายุ B พร้อมขอบเขต

1 B_p = อายุที่ p% ของหน่วยล้มเหลวแล้ว ขอบเขตโดยกลไกช่วงของแต่ละตระกูลเอง; ช่องที่เป็น — หมายความว่าตระกูลนั้นไม่มีกลไกขอบเขต — แสดงเฉพาะค่าประมาณจุด

2 เปอร์เซ็นไทล์	3 อายุ B	4 ขอบเขต 95%
1%	20.44	[9.778, 42.73]
5%	37.82	[22.81, 62.69]
5 10%	50.67	[33.61, 76.38]
25%	78.77	[58.65, 105.8]
50%	121.1	[96.08, 152.6]
75%	176.5	[140.7, 221.5]
90%	238.7	[185.8, 306.7]
95%	281.9	[215.4, 368.9]
99%	375.2	[276.7, 508.8]

ตารางเปอร์เซ็นไทล์ — อายุ B พร้อมขอบเขต

- ① B_p = อายุที่ p% ของหน่วยล้มเหลวแล้ว ขอบเขตโดยกลไกช่วงของแต่ละตระกูลเอง; ช่องที่เป็น — หมายความว่าตระกูลนั้นไม่มีกลไกขอบเขต — แสดงเฉพาะค่าประมาณจุด
- ② ถึง ④ คอลัมน์ เปอร์เซ็นไทล์, อายุ B, ขอบเขต 95%
- ⑤ แถว 10%: 50.67 [33.61, 76.38] คือ B10 ของการ์ดผลลัพธ์

1 ผู้ได้รับสิทธิ์ ReliaEn Training · RL-2026-0017

ท้ายรายงาน

- ① บรรทัดสิทธิ์การใช้งาน ผู้ได้รับสิทธิ์ ReliaEn Training · RL-2026-0017: สิทธิ์การใช้งานที่ใช้สร้างรายงานนี้

ภาค 5 — วิธีตีความผลลัพธ์

การฟิตบอกอะไร ไส้กรองรอดภาระอนุภาคได้ประมาณสามครั้ง ($\hat{k}$ = 3.08544) ภาระหนึ่งครั้งประมาณทุก 43.881 ชั่วโมง ($\hat{\theta}$) แม้ขอบล่างของ k คือ 1.82136 ก็มากกว่า 1 ไส้กรองจึงสึกหรอ อายุเฉลี่ย 135.39 ชั่วโมงเท่ากับค่าเฉลี่ยของอายุทั้ง 25 ค่าพอดี ไส้กรองหนึ่งในสิบอุดตันภายใน 50.67 ชั่วโมง (B10) และตัวเลขที่ยืนยันได้สำหรับข้อผูกพันคือขอบล่าง 33.61

การแก้ไขใดคุ้มกว่า การทนภาระได้อีกหนึ่งครั้งยก B10 จาก 50.7 เป็น 79.1 ชั่วโมง ส่วนการลดอัตราแรงกระแทก 30% ($\theta \times 1.3$) ให้เพียง 65.9 ไส้กรองที่ทนกว่าจึงคุ้มกว่าการใช้งานที่เบาลงในกรณีนี้ การทดสอบที่ใหญ่ขึ้นขยับ B10 ที่ยืนยันได้เพียงช้า ๆ จาก 33.6 วันนี้เป็น 37.9 ที่ไส้กรอง 50 ชิ้น

ตระกูลใด ล็อกนอร์มอลชนะแกมมาเล็กน้อยตาม AIC คือ 286.0 เทียบกับ 286.3 ช่องว่างที่เล็กเช่นนี้ไม่ได้พิสูจน์อะไร ให้เลือกตระกูลตามกลไก ซึ่งในที่นี้คือการสะสมภาระ คือแกมมา

อะไหล่สำหรับภารกิจ อะไหล่สแตนด์บายแบบเย็นหนึ่งชิ้นข้างไส้กรองที่ทำงานทำให้ภารกิจ 100 ชั่วโมงถึง 90% (R = 0.9762) ถ้าไม่มีอะไหล่ ภารกิจถึงเพียง 0.6222 อ่านผลได้ส่วนเพิ่มก่อนซื้อเพิ่ม: ชิ้นที่สองเพิ่มเพียง +0.0234