ความพร้อมใช้งานแบบมาร์คอฟ — ความพร้อมใช้งานของเครื่องจักรที่ซ่อม เมื่ออัตราความล้มเหลวคงที่หรือสึกหรอ

เมนู: ระบบ ▸ ความพร้อมใช้งานแบบมาร์คอฟ...

ภาค 1 — ฟังก์ชันนี้ทำอะไร

คำนวณอะไร แบบจำลองมาร์คอฟอธิบายเครื่องจักรที่ซ่อมได้เป็นชุดของสถานะ เช่น ทำงาน หยุด สึกหรอ อยู่ระหว่างซ่อม และอัตราที่เครื่องจักรเปลี่ยนระหว่างสถานะ ReliaEn แก้แบบจำลองและตอบสำหรับเครื่องจักรที่คุณอธิบาย

ผลลัพธ์	ReliaEn กำหนดอย่างไร
ความพร้อมใช้งานคงตัว A(∞)	สัดส่วนของเวลาที่เครื่องจักรทำงานในระยะยาว
ความพร้อมใช้งานของภารกิจ A(t)	โอกาสที่เครื่องจักรทำงานอยู่ ณ เวลาภารกิจ t
ความเชื่อถือได้ของภารกิจ R(t)	โอกาสที่เครื่องจักรไม่เคยหยุดเลยจนถึง t
MTTF (การเข้าสู่สถานะหยุดครั้งแรก)	เวลาเฉลี่ยจนถึงความล้มเหลวครั้งแรก
เวลาหยุดทำงานที่คาดหวัง / ปี ที่ A(∞)	(1 − A(∞)) × ชั่วโมงทำงานต่อปี

วิธีแก้แบบจำลองขึ้นกับอัตราความล้มเหลว

แหล่งที่มาของแบบจำลอง	อัตราความล้มเหลว	ReliaEn คำนวณอย่างไร
เครื่องจักรชุดตั้งค่า หรือ กำหนดเอง (แผ่นงาน)	คงที่ (λ ต่อชั่วโมง)	ความน่าจะเป็นของสถานะแบบแม่นตรง P(t) = P(0)·e^(Qt) และสถานะคงตัว πQ = 0
การสึกหรอ (ไวบูลล์ β, η)	เพิ่มขึ้นตามอายุ	สี่วิธีเคียงกัน หนึ่งวิธีต่อสิ่งที่การซ่อมทำกับเครื่องจักรได้ ได้แก่ วิธีที่ 1 การซ่อมขั้นต่ำ ("เหมือนเดิม" แม่นตรง) วิธีที่ 2 ห่วงโซ่ของขั้นการสึกหรอ (การทำใหม่ ค่าประมาณในช่วงเปลี่ยนผ่าน) วิธีที่ 3 กึ่งมาร์คอฟ (การทำใหม่ แม่นตรง) วิธีที่ 4 การจำลองด้วยอายุเสมือน (การซ่อมแบบใดก็ได้ ตั้งแต่เหมือนใหม่ q = 0 ถึงเหมือนเดิม q = 1)

เมื่อมีความพร้อมใช้งานเป้าหมาย รายงานเพิ่มว่าต้องซ่อมเร็วเท่าใด หรือต้องมีกี่หน่วย จึงถึงเป้าหมาย เมื่อมีความสูญเสียการผลิตต่อชั่วโมง รายงานคิดราคาเวลาหยุดทำงาน และการจำลองแบบมีค่าเริ่มต้นสุ่มของแบบจำลองเดียวกันใช้ตรวจคำตอบ

จากข้อมูลใด สำหรับเครื่องจักรชุดตั้งค่าหรือเครื่องจักรที่สึกหรอ ค่าทุกค่าพิมพ์ลงในแบบฟอร์ม ได้แก่ อัตรา หรือรูปร่าง β และสเกล η ของไวบูลล์ เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) เวลาภารกิจ และชั่วโมงทำงานต่อปี สำหรับห่วงโซ่ที่กำหนดเอง ใช้แผ่นงานหนึ่งแถวต่อการเปลี่ยนสถานะหนึ่งครั้ง ได้แก่ สถานะที่ออก สถานะที่เข้า และอัตรา β η และ MTTR อาจมาจากการฟิตที่ทำไว้ก่อนหน้าในเซสชันเดียวกัน

วิศวกรใช้เมื่อใด เมื่อคำถามคือความพร้อมใช้งานของเครื่องจักรที่ซ่อมได้ เช่น งบเวลาหยุดทำงาน เป้าหมายที่ต้องถึง หรือการซ่อมต้องดีเพียงใดสำหรับเครื่องจักรที่สึกหรอ

ไม่ควรใช้เมื่อ

สถานการณ์	ให้ใช้แทน
ระบบที่ไม่ซ่อม และต้องการความเชื่อถือได้จากแผนภาพบล็อก	ระบบ ▸ แผนภาพ RBD (บทที่ 4.1)
ระบบใหญ่ที่มีทีมช่างซ่อม อะไหล่ และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน	ระบบ ▸ การจำลอง RAM... (บทที่ 4.5)
ยังไม่ทราบ β และ η	ฟิตก่อนด้วย ข้อมูลอายุ ▸ การขึ้นกับเวลา ▸ การแจกแจงไวบูลล์ (2P)... หรือจากประวัติการซ่อมด้วย ข้อมูลอายุ ▸ ระบบที่ซ่อมได้ ▸ GRP / Kijima... แล้วเลือกผลการฟิตใน แหล่งที่มาของ λ

ภาค 2 — ข้อมูลนำเข้าของตัวอย่าง

สถานการณ์. กระปุกเกียร์ของสายพานลำเลียงสึกหรอ อายุของมันเป็นการแจกแจงไวบูลล์ที่มีรูปร่าง 2 และสเกล 1,000 ชั่วโมง ซ่อมทุกครั้งที่ล้มเหลว เฉลี่ยครั้งละ 50 ชั่วโมง วิศวกรบำรุงรักษาต้องการความพร้อมใช้งานตลอด 4,000 ชั่วโมงทำงาน และต้องบอกตามจริงว่าการซ่อมทำอะไรกับกระปุกเกียร์

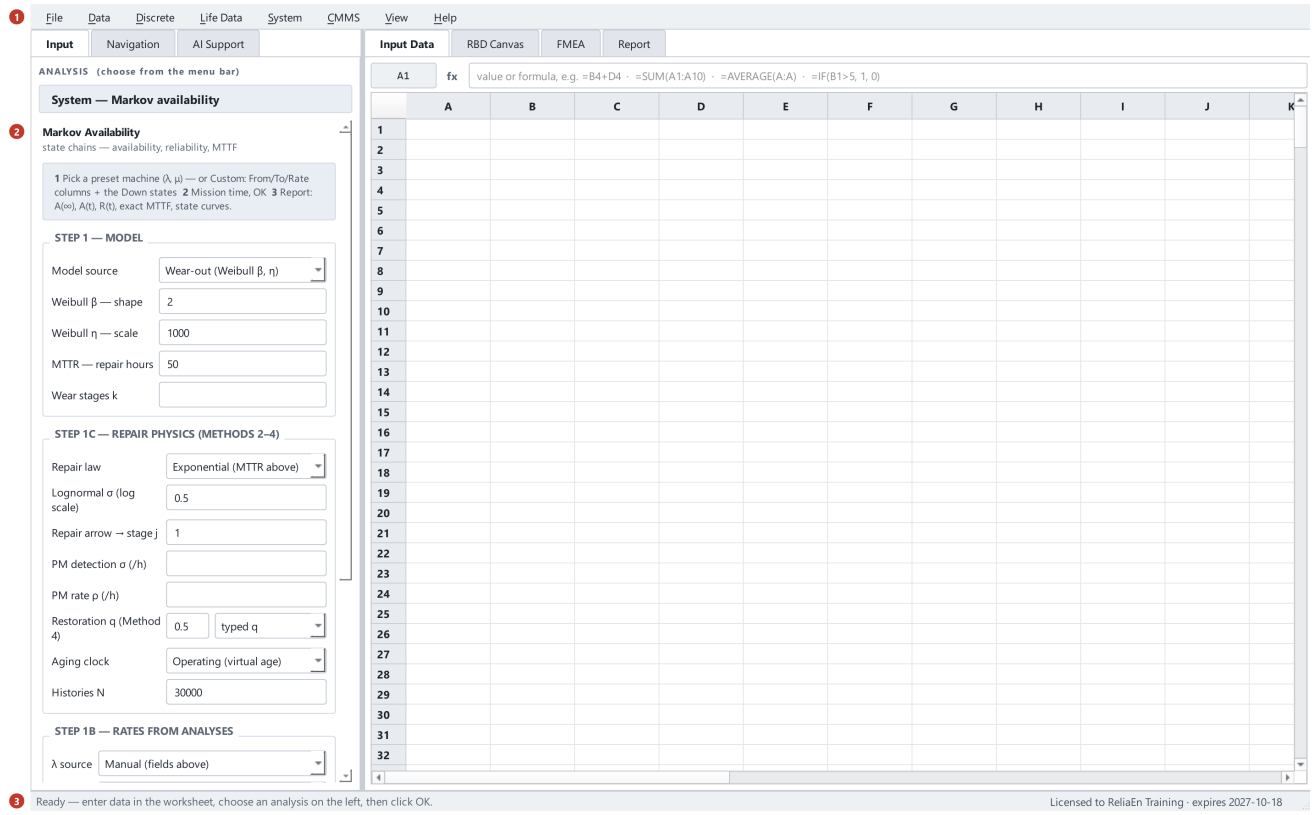
ข้อมูลนำเข้า	ค่า
แหล่งที่มาของแบบจำลอง	การสึกหรอ (ไวบูลล์ β, η)
β ของไวบูลล์ — รูปร่าง η ของไวบูลล์ — สเกล	2, 1000
MTTR — ชั่วโมงซ่อม	50
ขั้นการสึกหรอ k	ว่างไว้ (ReliaEn เลือก)
กฎการซ่อม	เอกซ์โพเนนเชียล (MTTR ด้านบน)
ลูกศรซ่อม → ขั้น j	1
การฟื้นฟู q (วิธีที่ 4)	0.5 (q ที่กรอก)
นาฬิกาการเสื่อมสภาพ	ทำงาน (อายุเสมือน)
จำนวนประวัติ N	30000
เวลาภารกิจ t	4000
ชั่วโมงทำงาน / ปี	8760

ตัวอย่างที่สอง อัตราคงที่. ปั๊มกระบวนการหนึ่งเครื่องล้มเหลวที่อัตรา 0.002 ต่อชั่วโมง และซ่อมที่อัตรา 0.05 ต่อชั่วโมง (ซ่อมเฉลี่ย 20 ชั่วโมง) โรงงานต้องการความพร้อมใช้งาน 99% และเวลาหยุดทำงานหนึ่งชั่วโมงมีต้นทุน 10,000 บาท

ข้อมูลนำเข้า	ค่า
แหล่งที่มาของแบบจำลอง แบบสำเร็จรูป	เครื่องจักรชุดตั้งค่า 1 หน่วย ซ่อมได้
λ — อัตราความล้มเหลว μ — อัตราการซ่อม	0.002, 0.05
เวลาภารกิจ t ชั่วโมงทำงาน / ปี	10000, 8760
ความสูญเสียการผลิต / ชม.	10000
ความพร้อมใช้งานเป้าหมาย %	99

ไม่ใช้แผ่นงานและไม่มีไฟล์ ทั้งสองตัวอย่างพิมพ์ลงในแบบฟอร์มตามภาค 3

แบบฟอร์มของกระปุกเกียร์ที่ตั้งค่าตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 17 ของภาค 3 ในหน้าต่างภาษาอังกฤษ ตามหมายเหตุต้นภาค 3 (แบบฟอร์มของปั๊ม คือภาพของขั้นตอนที่ 19 ถึง 29):



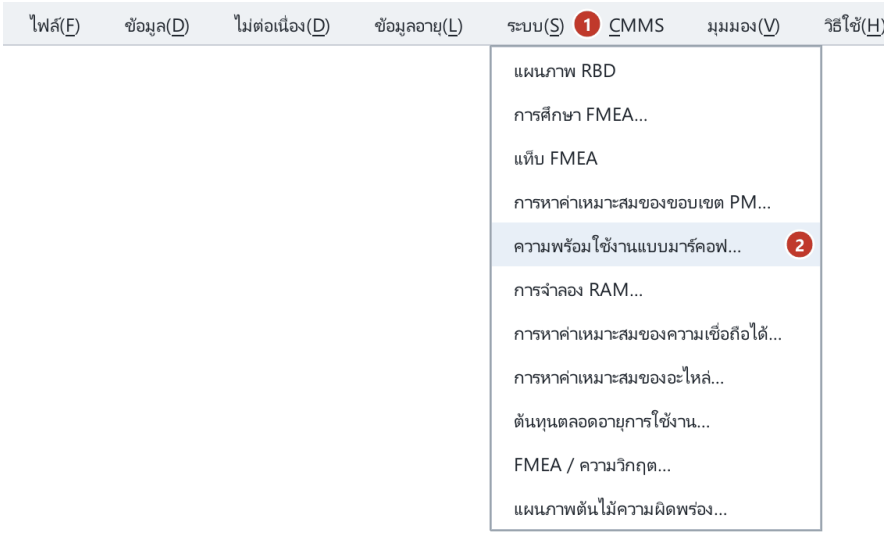
ค่าของกระปุกเกียร์ในหน้าต่าง

- ① แถบเมนู: File, Data, Discrete, Life Data, System, CMMS, View, Help
- ② แบบฟอร์มที่ตั้งค่าตามตารางด้านบน มี OK — Calculate อยู่ด้านล่าง
- ③ แถบสถานะ: Ready — enter data in the worksheet, choose an analysis on the left, then click OK. และ Licensed to ReliaEn Training · expires 2027-10-18

ภาค 3 — วิธีใช้ ทีละขั้นตอน

กระปุกเกียร์ (การสึกหรอ) ใน ReliaEn 1.0.0 เส้นทางการสึกหรอคำนวณได้เฉพาะในส่วนติดต่อภาษาอังกฤษ ในส่วนติดต่อภาษาไทย การคลิกตกลงแสดงข้อความปฏิเสธ ตั้งแต่ ReliaEn 1.0.1 คำนวณได้ในส่วนติดต่อภาษาไทยด้วย ให้อัปเดตผ่าน วิธีใช้ ▸ อัปเดต... หรือสลับเป็นภาษาอังกฤษด้วย ไฟล์ ▸ ภาษา... ภาพของแบบฟอร์มที่ตั้งค่าแล้วและข้อความที่ยกในขั้นตอนที่ 2 ถึง 18 และการ์ดของกระปุกเกียร์ในภาค 4 จึงเป็นข้อความตามที่หน้าจอภาษาอังกฤษแสดง

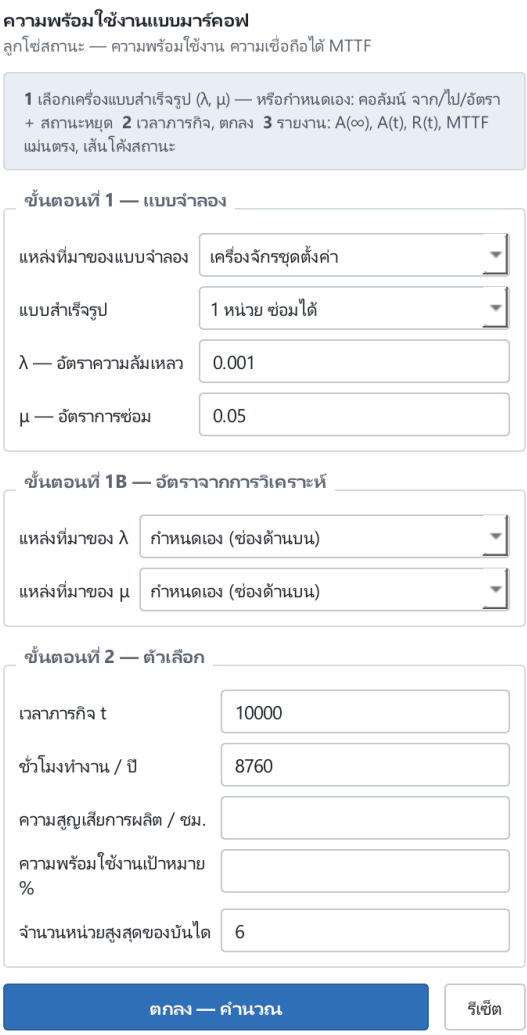
1. **เลือก System ▸ Markov Availability...** ในแถบเมนู (ในส่วนติดต่อภาษาไทยคือ ระบบ ▸ ความพร้อมใช้งานแบบมาร์คอฟ...) แบบฟอร์มจะเปิดขึ้นในแผงด้านซ้าย



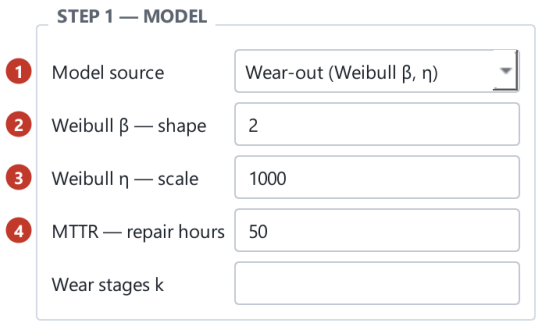
ขั้นตอนที่ 1 — เส้นทางเมนู

- ① ระบบ: เมนู
- ② ความพร้อมใช้งานแบบมาร์คอฟ...: รายการที่ต้องคลิก

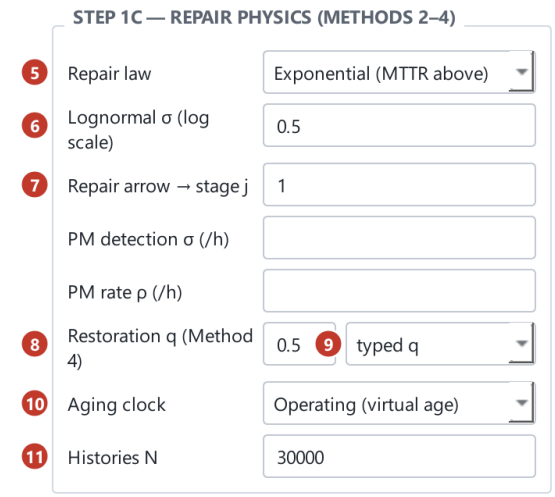
แบบฟอร์มเมื่อเปิดขึ้น ก่อนตั้งค่าช่องใด:



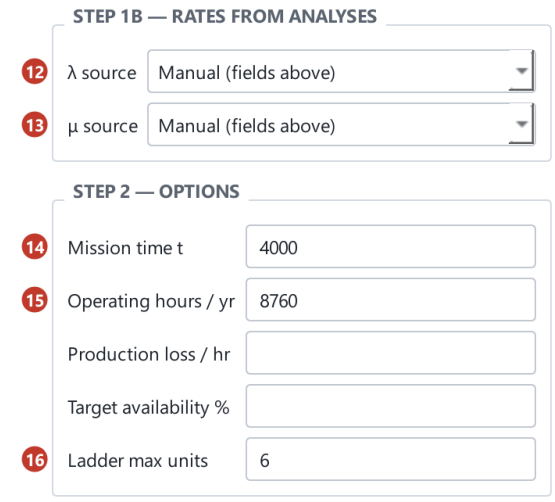
ขั้นตอนที่ 1 — แบบฟอร์มเมื่อเปิดขึ้น



ขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 — ช่องแบบจำลองของกระปุกเกียร์ ① ถึง ④



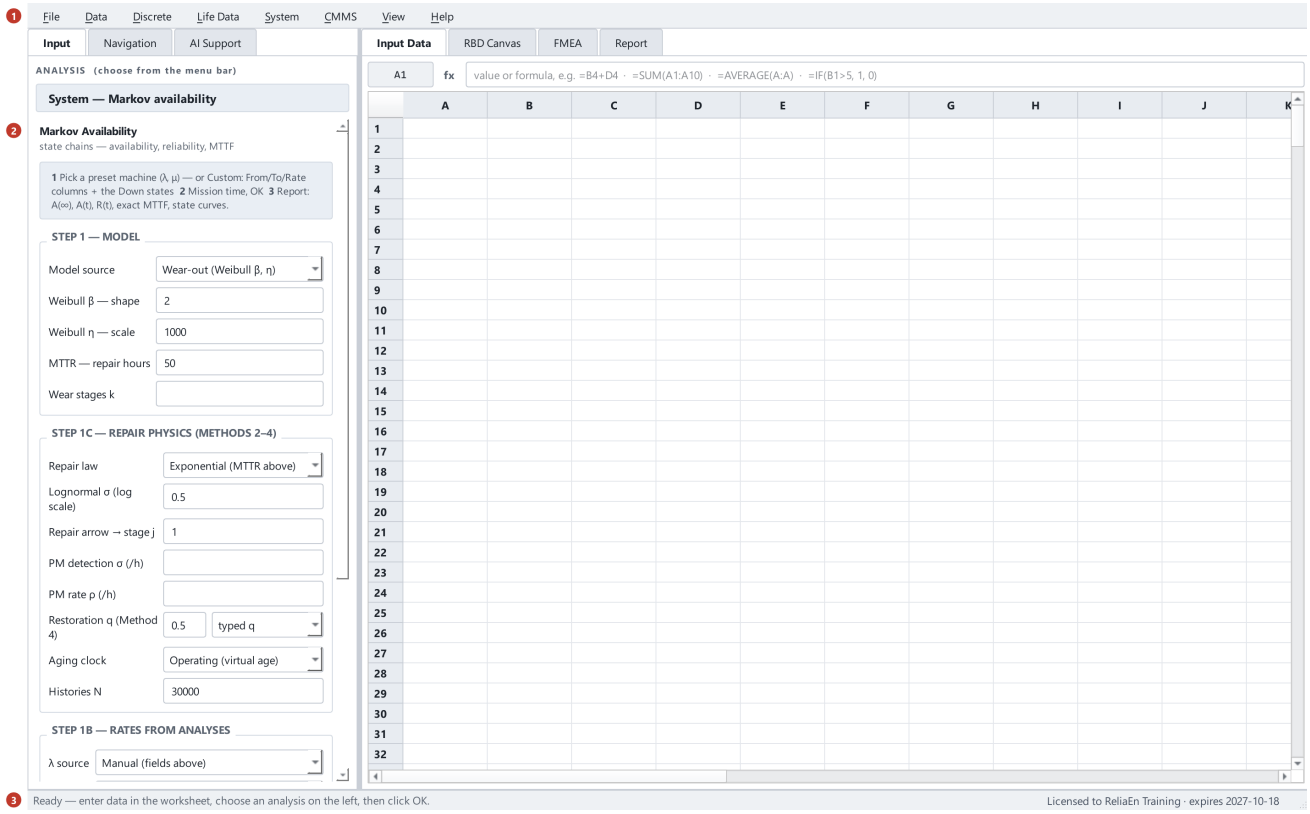
ขั้นตอนที่ 6 ถึง 12 — ช่องการซ่อม ⑤ ถึง ⑪



ขั้นตอนที่ 13 ถึง 17 — แหล่งอัตราและตัวเลือก ⑫ ถึง ⑯

2. ① **ใน Model source เลือก Wear-out (Weibull β, η)** ช่องของการสึกหรอจะปรากฏ
3. ② **ใน Weibull β — shape พิมพ์ 2**
4. ③ **ใน Weibull η — scale พิมพ์ 1000**
5. ④ **ใน MTTR — repair hours พิมพ์ 50** Wear stages k เว้นว่าง ReliaEn เลือก k เอง
6. ⑤ **ใน Repair law คงไว้ที่ Exponential (MTTR above)**
7. ⑥ **Lognormal σ (log scale) คงไว้ที่ 0.5** ใช้เฉพาะกฎการซ่อมแบบล็อกนอร์มอล
8. ⑦ **ใน Repair arrow → stage j คงไว้ที่ 1** การซ่อมทำให้กระปุกเกียร์กลับสู่ขั้นแรก คือเหมือนใหม่
9. ⑧ **ใน Restoration q (Method 4) พิมพ์ 0.5**
10. ⑨ **คงไว้ที่ typed q** เป็นแหล่งที่มาของ q
11. ⑩ **ใน Aging clock คงไว้ที่ Operating (virtual age)**
12. ⑪ **ใน Histories N พิมพ์ 30000**
13. ⑫ **ใน λ source คงไว้ที่ Manual (fields above)**
14. ⑬ **ใน μ source คงไว้ที่ Manual (fields above)**
15. ⑭ **ใน Mission time t พิมพ์ 4000**
16. ⑮ **ใน Operating hours / yr คงไว้ที่ 8760**
17. ⑯ **Ladder max units คงไว้ที่ 6** ใช้เฉพาะเมื่อมีเป้าหมาย ส่วน Production loss / hr และ Target availability % เว้นว่างสำหรับกระปุกเกียร์

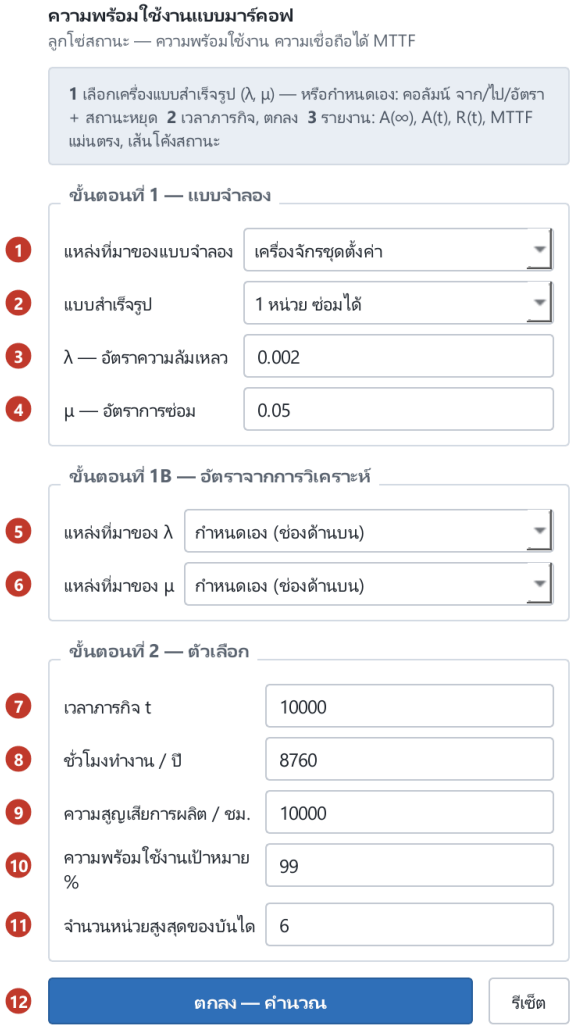
18. **คลิก OK — Calculate** ที่ด้านล่างของแบบฟอร์ม (② ในภาพด้านล่าง) ReliaEn คำนวณทั้งสี่วิธีและแสดงรายงาน (ภาค 4 ครึ่งแรก)



ขั้นตอนที่ 18 — หน้าต่างก่อนกด ตกลง

- ① แถบเมนู: File, Data, Discrete, Life Data, System, CMMS, View, Help
- ② แบบฟอร์มที่ตั้งค่าตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 17 มี OK — Calculate อยู่ด้านล่าง
- ③ แถบสถานะ: Ready — enter data in the worksheet, choose an analysis on the left, then click OK. และ Licensed to ReliaEn Training · expires 2027-10-18

ปั๊ม (อัตราคงที่) ใช้ส่วนติดต่อภาษาไทยได้ แบบฟอร์มเดียวกัน ขั้นตอนที่ 19 ถึง 29 ตั้งค่าช่อง มีเครื่องหมาย ① ถึง ⑪ ⑫ คือปุ่มของขั้นตอนที่ 30:



ขั้นตอนที่ 19 ถึง 29 — แบบฟอร์มที่ตั้งค่าสำหรับปั๊ม

19. ① **ใน แหล่งที่มาของแบบจำลอง เลือก เครื่องจักรชุดตั้งค่า**
20. ② **ใน แบบสำเร็จรูป เลือก 1 หน่วย ซ่อมได้**
21. ③ **ใน λ — อัตราความล้มเหลว พิมพ์ 0.002**
22. ④ **ใน μ — อัตราการซ่อม พิมพ์ 0.05**
23. ⑤ **ใน แหล่งที่มาของ λ คงไว้ที่ กำหนดเอง (ช่องด้านบน)**
24. ⑥ **ใน แหล่งที่มาของ μ คงไว้ที่ กำหนดเอง (ช่องด้านบน)**
25. ⑦ **ใน เวลาภารกิจ t พิมพ์ 10000**
26. ⑧ **ใน ชั่วโมงทำงาน / ปี คงไว้ที่ 8760**
27. ⑨ **ใน ความสูญเสียการผลิต / ชม. พิมพ์ 10000**
28. ⑩ **ใน ความพร้อมใช้งานเป้าหมาย % พิมพ์ 99**
29. ⑪ **ใน จำนวนหน่วยสูงสุดของบันได คงไว้ที่ 6**
30. ⑫ **คลิก ตกลง — คำนวณ** รายงานในครึ่งหลังของภาค 4

ภาค 4 — รายงาน ทีละการ์ด

กระปุกเกียร์ (การสึกหรอ) หลังขั้นตอนที่ 18 รายงานแสดงด้วยส่วนติดต่อภาษาอังกฤษ ข้อความที่ยกจึงตามหน้าจอภาษาอังกฤษ:

	INPUT DATA	
1	Failure model	`Weibull (β = 2, η = 1000) — hazard λ(t) = (β/η)(t/η)^(β−1)`
2	Weibull β / η	`2 / 1000`
3	Repair	`manual MTTR — MTTR = 50 h (μ = 0.02/h)`
4	Mission time t	`4000`
5	Wear stages k	`4 (auto from CV² = 0.2732)`
6	Repair law (Methods 3–4)	`exponential`
7	Repair arrow (Method 2)	`Stage 1`
8	Method 4	`q = 0.5, operating aging, N = 30,000 histories, seed 20260825`

Input data

- ① Failure model Weibull (β = 2, η = 1000) — hazard λ(t) = (β/η)(t/η)^(β−1). กระปุกเกียร์สึกหรอ อัตราความล้มเหลวของมันเพิ่มขึ้นตามอายุ
- ② Weibull β / η 2 / 1000.
- ③ Repair manual MTTR — MTTR = 50 h (μ = 0.02/h). เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และอัตราการซ่อม
- ④ Mission time t 4000.
- ⑤ Wear stages k 4 (auto from CV² = 0.2732). ReliaEn เลือกสี่ขั้นให้ตรงกับการกระจายของอายุแบบไวบูลล์
- ⑥ Repair law (Methods 3–4) exponential. Repair arrow (Method 2) Stage 1: การซ่อมพาเครื่องจักรกลับไปขั้นแรกเหมือนใหม่
- ⑦ Repair arrow (Method 2) Stage 1.
- ⑧ Method 4 q = 0.5, operating aging, N = 30,000 histories, seed 20260825.

	RESULTS	
1	MTTF = η·Γ(1+1/β)	`886.23 h`
2	A(t) — Method 1, MINIMAL repair	`0.7161`
3	A(t) — Method 2, RENEWAL repair	`0.9466`
4	A(∞) — renewal identity MTTF/(MTTF+MTTR)	`0.94659`
5	A(∞) — minimal repair	`none — availability erodes forever`
6	A(t) — Method 3, RENEWAL repair (semi-Markov, exact)	`0.9466`
7	A(t) — Method 4, restoration q = 0.5 (operating aging)	`0.8383 ± 0.0042`

Results

- ① MTTF = η·Γ(1+1/β) 886.23 h. อายุเฉลี่ยของกระปุกเกียร์ใหม่
- ② A(t) — Method 1, MINIMAL repair 0.7161. ความพร้อมใช้งานที่ 4,000 ชั่วโมง ถ้าการซ่อมแต่ละครั้งเพียงปะชิ้นส่วน
- ③ A(t) — Method 2, RENEWAL repair 0.9466. ความพร้อมใช้งานถ้าการซ่อมแต่ละครั้งทำใหม่ทั้งหมด
- ④ A(∞) — renewal identity MTTF/(MTTF+MTTR) 0.94659. A(∞) — minimal repair none — availability erodes forever
- ⑤ A(∞) — minimal repair none — availability erodes forever.
- ⑥ A(t) — Method 3, RENEWAL repair (semi-Markov, exact) 0.9466.
- ⑦ A(t) — Method 4, restoration q = 0.5 (operating aging) 0.8383 ± 0.0042. การซ่อมที่ลบอายุครึ่งหนึ่งที่สะสมมาตั้งแต่การซ่อมครั้งก่อน

INTERPRETATION

① Same machine, two repair philosophies, two answers: with MINIMAL repair (fix the part, keep the age) availability at t = 4000 is 0.7161 and still falling — maintenance is a losing race against the growing hazard. With RENEWAL repair (replace, as good as new) it settles at 0.9466. Neither is 'more correct' — state honestly what your repairs do to the machine, and read that column. Method 3 gives the renewal transient exactly (the same steady state, reached through the failure waves Method 2 blurs); Method 4's restoration dial q spans the two physics — everything between them is imperfect repair, reachable only by simulation.

Interpretation

- ① Same machine, two repair philosophies, two answers: with MINIMAL repair (fix the part, keep the age) availability at t = 4000 is 0.7161 and still falling — maintenance is a losing race against the growing hazard. With RENEWAL repair (replace, as good as new) it settles at 0.9466. Neither is 'more correct' — state honestly what your repairs do to the machine, and read that column. Method 3 gives the renewal transient exactly (the same steady state, reached through the failure waves Method 2 blurs); Method 4's restoration dial q spans the two physics — everything between them is imperfect repair, reachable only by simulation.

WHICH REPAIR PHYSICS? — FOUR METHODS, ONE MACHINE

① Same machine, four answers — each answers a different physical question; the most consequential modelling decision here is not mathematical.

② Method	③ Where the memory lives	④ Repair physics encoded	⑤ Answer quality	⑥ This machine's long-run availability
⑦ 1. Non-homogeneous Markov	Global clock time in the rates, Q(t)	MINIMAL repair (as bad as old)	Exact for its philosophy	0.5006 at 10,000 h
⑧ 2. Method of stages	Which sub-state you occupy	Renewal, or partial (arrow choice)	Approximate (CV² matching)	0.94659
⑨ 3. Semi-Markov	A local clock that resets at each jump	RENEWAL (as good as new), built in	Exact for its philosophy	0.94659
⑩ 4. Simulation, virtual age	A per-component virtual age V	ANY: q dial spans minimal ↔ renewal	Statistical (with CIs)	0.838 at the chosen q = 0.5 (4,000 h)

⑪ Choosing the method is choosing the repair physics — Method 1: minimal repair; Methods 2 and 3: renewal; Method 4: any q.

Which repair physics? — four methods, one machine

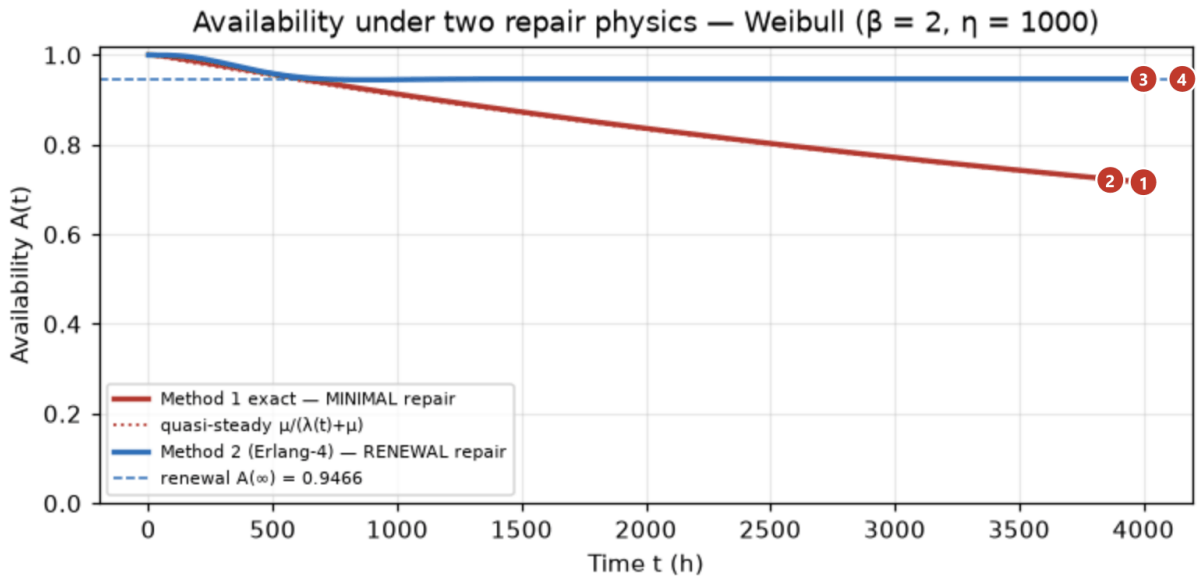
- ① Same machine, four answers — each answers a different physical question; the most consequential modelling decision here is not mathematical.
- ② Method
- ③ Where the memory lives
- ④ Repair physics encoded
- ⑤ Answer quality
- ⑥ This machine's long-run availability
- ⑦ 1. Non-homogeneous Markov · Global clock time in the rates, Q(t) · MINIMAL repair (as bad as old) · Exact for its philosophy · 0.5006 at 10,000 h
- ⑧ 2. Method of stages · Which sub-state you occupy · Renewal, or partial (arrow choice) · Approximate (CV² matching) · 0.94659
- ⑨ 3. Semi-Markov · A local clock that resets at each jump · RENEWAL (as good as new), built in · Exact for its philosophy · 0.94659
- ⑩ 4. Simulation, virtual age · A per-component virtual age V · ANY: q dial spans minimal ↔ renewal · Statistical (with CIs) · 0.838 at the chosen q = 0.5 (4,000 h)
- ⑪ Choosing the method is choosing the repair physics — Method 1: minimal repair; Methods 2 and 3: renewal; Method 4: any q.

METHOD 1 SELF-CHECK — QUASI-STEADY SHORTCUT

1. At mission: exact 0.7161 vs quasi-steady 0.7143.
2. A(t) ≈ μ/(λ(t)+μ) once the chain settles (~150 h). Largest deviation from the exact ODE after settling: **0.0047** — the hazard moves slowly against the repair timescale, the integration self-checks, and the shortcut is engineering-grade here.
3. Every Method-1 figure assumes minimal repair (as bad as old). If the machine is replaced at failure, use Method 3; Method 1 is pessimistic by 7.09× at 4,000 h.

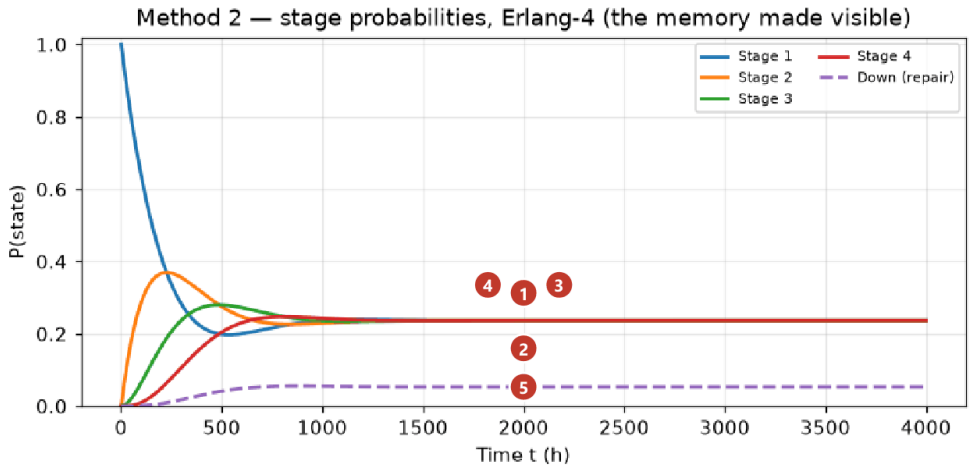
Method 1 self-check — quasi-steady shortcut

- ① At mission: exact 0.7161 vs quasi-steady 0.7143.
- ② A(t) ≈ μ/(λ(t)+μ) once the chain settles (~150 h). Largest deviation from the exact ODE after settling: 0.0047 — the hazard moves slowly against the repair timescale, the integration self-checks, and the shortcut is engineering-grade here.
- ③ Every Method-1 figure assumes minimal repair (as bad as old). If the machine is replaced at failure, use Method 3; Method 1 is pessimistic by 7.09× at 4,000 h. ค่า 7.09 คืออัตราเสี่ยงที่ 4,000 ชั่วโมงคูณ MTTF คือ λ(4000) × MTTF = 0.008 × 886.23 บอกว่ากระปุกเกียร์ที่สึกหรอล้มเหลวเร็วกว่าค่าเฉลี่ยตลอดอายุกี่เท่า ไม่ใช่อัตราส่วนของความไม่พร้อมใช้งานของสองวิธี



กราฟ

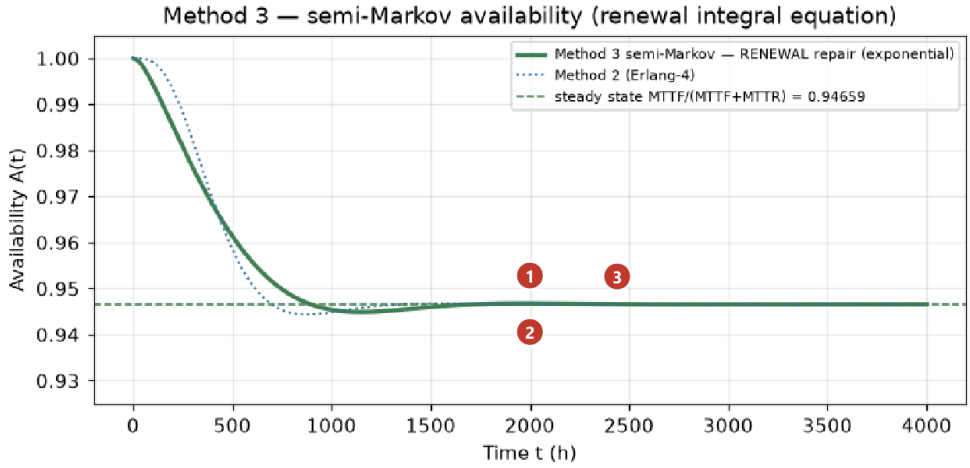
- ① เส้น: Method 1 exact — MINIMAL repair.
- ② เส้น: quasi-steady μ/(λ(t)+μ).
- ③ เส้น: Method 2 (Erlang-4) — RENEWAL repair.
- ④ เส้นแนวนอน: renewal A(∞) = 0.9466.



Interactive Plot

กราฟ

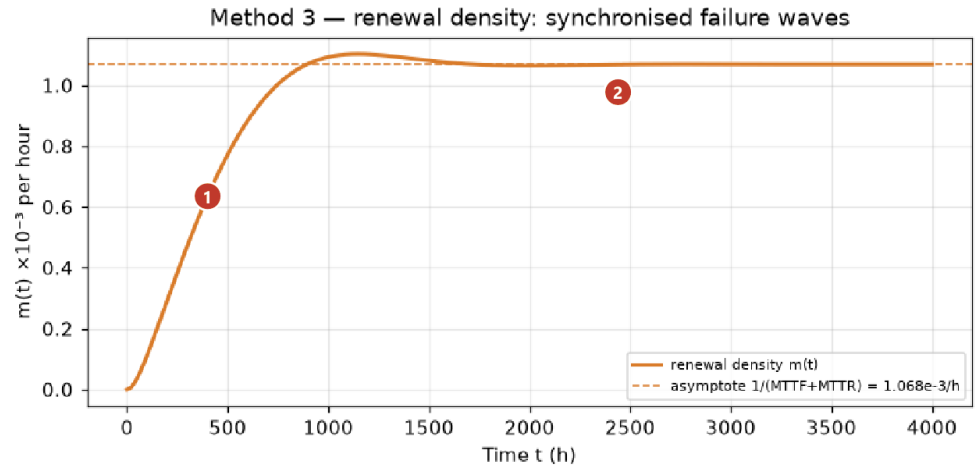
- ① เส้น: Stage 1.
- ② เส้น: Stage 2.
- ③ เส้น: Stage 3.
- ④ เส้น: Stage 4.
- ⑤ เส้น: Down (repair).



Interactive Plot

กราฟ

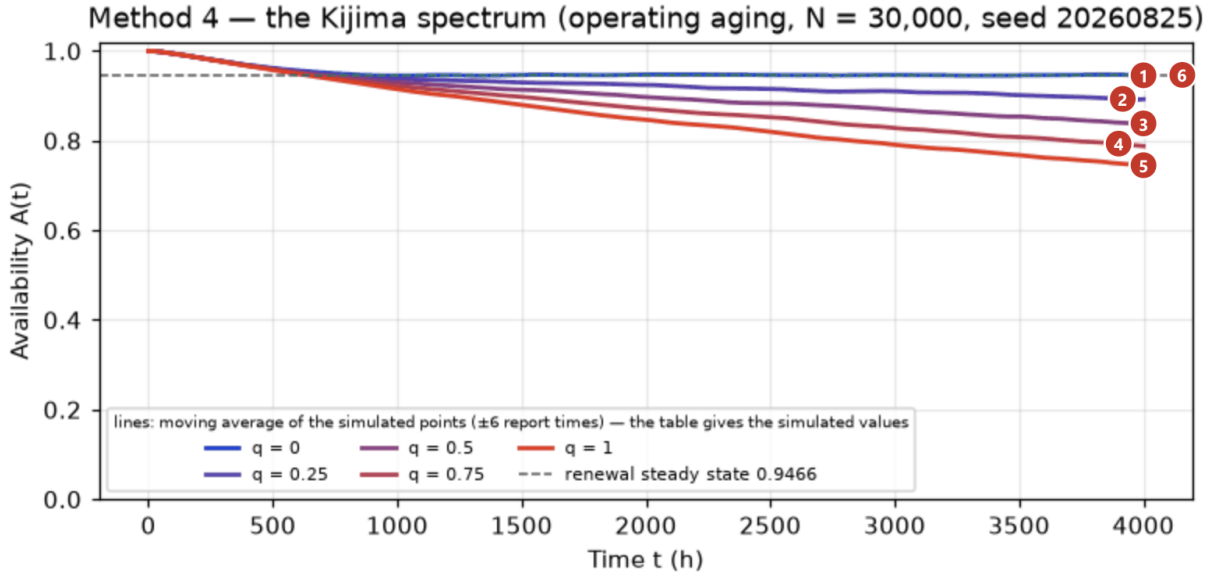
- ① เส้น: Method 3 semi-Markov — RENEWAL repair (exponential).
- ② เส้น: Method 2 (Erlang-4).
- ③ เส้นแนวนอน: steady state MTTF/(MTTF+MTTR) = 0.94659.



Interactive Plot

กราฟ

- ① เส้น: renewal density m(t).
- ② เส้นแนวนอน: asymptote 1/(MTTF+MTTR) = 1.068e-3/h.



กราฟ

- ① เส้น: q = 0.
- ② เส้น: q = 0.25.
- ③ เส้น: q = 0.5.
- ④ เส้น: q = 0.75.
- ⑤ เส้น: q = 1.
- ⑥ เส้นแนวนอน: renewal steady state 0.9466.

STAGE OCCUPANCY — ERLANG-4 STAGE MODEL OF WEIBULL (B = 2, H = 1000)

1 The stage probabilities ARE the model's memory of the machine's age — wear made visible. Each stage hops at ν = 0.004514/h.

2 State	3 P(state) at mission	4 Steady-state π
5 Stage 1	0.236649	0.236649
6 Stage 2	0.236649	0.236649
7 Stage 3	0.236649	0.236649
8 Stage 4	0.236649	0.236649
9 Down (repair)	0.053406	0.053406

Stage occupancy — Erlang-4 stage model of Weibull (β = 2, η = 1000)

- ① The stage probabilities ARE the model's memory of the machine's age — wear made visible. Each stage hops at ν = 0.004514/h.
- ② State
- ③ P(state) at mission
- ④ Steady-state π
- ⑤ Stage 1 · 0.236649 · 0.236649
- ⑥ Stage 2 · 0.236649 · 0.236649
- ⑦ Stage 3 · 0.236649 · 0.236649
- ⑧ Stage 4 · 0.236649 · 0.236649
- ⑨ Down (repair) · 0.053406 · 0.053406

METHOD 2 TRANSIENT — ERLANG-4 STAGE CHAIN, REPAIR ARROW TO STAGE 1

1 Erlang-4 matches the mean exactly and the spread to $CV^2 = 0.25$ against the target 0.2732 — the transient carries that error; the steady state does not.

2 t (h)	3 A(t)	4 Stage 1	5 Stage 2	6 Stage 3	7 Stage 4	8 Down (repair)
9 250	0.9882	0.3365	0.3677	0.2064	0.0775	0.0118
10 500	0.9585	0.1986	0.2752	0.2801	0.2046	0.0415
11 1,000	0.9448	0.2362	0.2295	0.2360	0.2431	0.0552
12 2,000	0.9466	0.2365	0.2366	0.2368	0.2367	0.0534
13 4,000	0.9466	0.2366	0.2366	0.2366	0.2366	0.0534

14 A(∞) = 0.94659; corrective failures 9.36 per year (π_Stage 4 · ν · 8760 h); ν = 0.004514/h. The stage probabilities are plotted above.

Method 2 transient — Erlang-4 stage chain, repair arrow to Stage 1

- ① Erlang-4 matches the mean exactly and the spread to $CV^2 = 0.25$ against the target 0.2732 — the transient carries that error; the steady state does not.
- ② t (h)
- ③ A(t)
- ④ Stage 1
- ⑤ Stage 2
- ⑥ Stage 3
- ⑦ Stage 4
- ⑧ Down (repair)
- ⑨ 250 · 0.9882 · 0.3365 · 0.3677 · 0.2064 · 0.0775 · 0.0118
- ⑩ 500 · 0.9585 · 0.1986 · 0.2752 · 0.2801 · 0.2046 · 0.0415
- ⑪ 1,000 · 0.9448 · 0.2362 · 0.2295 · 0.2360 · 0.2431 · 0.0552
- ⑫ 2,000 · 0.9466 · 0.2365 · 0.2366 · 0.2368 · 0.2367 · 0.0534
- ⑬ 4,000 · 0.9466 · 0.2366 · 0.2366 · 0.2366 · 0.2366 · 0.0534
- ⑭ A(∞) = 0.94659; corrective failures 9.36 per year (π_Stage 4 · ν · 8760 h); ν = 0.004514/h. The stage probabilities are plotted above.

TRUST CHECK — ERLANG-4 STAGE MODEL OF WEIBULL (B = 2, H = 1000)

1. The simulation replays the same chain event by event with a fixed seed (deterministic) — an independent surface, not a re-run of the formula.

2. Analytic A(t = 4000) = **0.946594** · independent seeded simulation = **0.9425 ± 0.0072** (95%, 4,000 histories) — the analytic answer lies inside the simulation interval; two independent computations agree.

Trust check — Erlang-4 stage model of Weibull (β = 2, η = 1000)

- ① The simulation replays the same chain event by event with a fixed seed (deterministic) — an independent surface, not a re-run of the formula.
- ② Analytic A(t = 4000) = 0.946594 · independent seeded simulation = 0.9425 ± 0.0072 (95%, 4,000 histories) — the analytic answer lies inside the simulation interval; two independent computations agree.

METHOD 3 TRANSIENT — SEMI-MARKOV, RENEWAL EQUATION (EXPONENTIAL, MTTR 50 H)

1. One cycle = one life + one repair; m(t) = g(t) + ∫g(t−u)m(u)du and A(t) = R(t) + ∫m(u)R(t−u)du, with the cycle density built mass-preserving from exact CDF differences.

2 t (h)	3 A(t) — Method 3 semi-Markov	4 Method 2 Erlang-4	5 Method 1 minimal repair
6 250	0.9807	0.9882	0.9803
7 500	0.9614	0.9585	0.9568
8 1,000	0.9454	0.9448	0.9129
9 2,000	0.9468	0.9466	0.8363
10 4,000	0.9466	0.9466	0.7161

11. Grid step 0.25 h (16,000 cells, Richardson-extrapolated; largest correction 1.0e-04); cycle mass 1.000000000. Steady state MTTF/(MTTF+MTTR) = 0.94659 — exact for any repair law with this mean.

Method 3 transient — semi-Markov, renewal equation (exponential, MTTR 50 h)

- ① One cycle = one life + one repair; m(t) = g(t) + ∫g(t−u)m(u)du and A(t) = R(t) + ∫m(u)R(t−u)du, with the cycle density built mass-preserving from exact CDF differences.
- ② t (h)
- ③ A(t) — Method 3 semi-Markov
- ④ Method 2 Erlang-4
- ⑤ Method 1 minimal repair
- ⑥ 250 · 0.9807 · 0.9882 · 0.9803
- ⑦ 500 · 0.9614 · 0.9585 · 0.9568
- ⑧ 1,000 · 0.9454 · 0.9448 · 0.9129
- ⑨ 2,000 · 0.9468 · 0.9466 · 0.8363
- ⑩ 4,000 · 0.9466 · 0.9466 · 0.7161
- ⑪ Grid step 0.25 h (16,000 cells, Richardson-extrapolated; largest correction 1.0e-04); cycle mass 1.000000000. Steady state MTTF/(MTTF+MTTR) = 0.94659 — exact for any repair law with this mean.

RENEWAL DENSITY M(T) — THE FAILURE WAVES

1 Synchronised first failures return from repair around one mean life (886 h) and damp toward the long-run cycle rate 1.068e-3/h.

2 t (h)	3 m(t) ×10⁻³ per hour
500	0.7724
886 (MTTF)	1.0659
1,000	1.0924
1,500	1.0805
2,000	1.0641
3,000	1.0684
4,000	1.0681

4 Asymptote 1/(MTTF + MTTR) = 1.068e-3/h — a fleet commissioned together sends workload waves to the repair shop at multiples of the mean life until de-phasing washes them out.

Renewal density m(t) — the failure waves

- ① Synchronised first failures return from repair around one mean life (886 h) and damp toward the long-run cycle rate 1.068e-3/h.
- ② t (h)
- ③ m(t) ×10⁻³ per hour
- ④ Asymptote 1/(MTTF + MTTR) = 1.068e-3/h — a fleet commissioned together sends workload waves to the repair shop at multiples of the mean life until de-phasing washes them out.

METHOD 4 VALIDATION — THE SIMULATOR AGAINST THE EXACT METHODS

1 Validated: q = 0 reproduces Method 3 and q = 1 (calendar aging) reproduces Method 1 within the 95 % intervals at every report time.

2 t (h)	3 Simulated q = 0 (operating) ± 95 %	4 Method 3 exact	5 Simulated q = 1 (calendar) ± 95 %	6 Method 1 exact
7 250	0.9812 ± 0.0015	0.9807	0.9811 ± 0.0015	0.9803
8 500	0.9621 ± 0.0022	0.9614	0.9574 ± 0.0023	0.9568
9 1,000	0.9445 ± 0.0026	0.9454	0.9105 ± 0.0032	0.9129
10 2,000	0.9471 ± 0.0025	0.9468	0.8352 ± 0.0042	0.8363
11 4,000	0.9457 ± 0.0026	0.9466	0.7160 ± 0.0051	0.7161

12 N = 30,000 histories per run, seed 20260825; 95 % intervals with the rule-of-three floor at the extremes. The simulator earns interior answers only by reproducing both exact methods at its extremes.

Method 4 validation — the simulator against the exact methods

- ① Validated: q = 0 reproduces Method 3 and q = 1 (calendar aging) reproduces Method 1 within the 95 % intervals at every report time.
- ② t (h)
- ③ Simulated q = 0 (operating) ± 95 %
- ④ Method 3 exact
- ⑤ Simulated q = 1 (calendar) ± 95 %
- ⑥ Method 1 exact
- ⑦ 250 · 0.9812 ± 0.0015 · 0.9807 · 0.9811 ± 0.0015 · 0.9803
- ⑧ 500 · 0.9621 ± 0.0022 · 0.9614 · 0.9574 ± 0.0023 · 0.9568
- ⑨ 1,000 · 0.9445 ± 0.0026 · 0.9454 · 0.9105 ± 0.0032 · 0.9129
- ⑩ 2,000 · 0.9471 ± 0.0025 · 0.9468 · 0.8352 ± 0.0042 · 0.8363
- ⑪ 4,000 · 0.9457 ± 0.0026 · 0.9466 · 0.7160 ± 0.0051 · 0.7161
- ⑫ N = 30,000 histories per run, seed 20260825; 95 % intervals with the rule-of-three floor at the extremes. The simulator earns interior answers only by reproducing both exact methods at its extremes.

METHOD 4 SPECTRUM — RESTORATION Q = 0 … 1 (OPERATING AGING), THE DECISION VIEW

1 Repair quality changes the breakdown rate 3.0× across q = 0 … 1; moving from q = 0.5 to q = 0 saves 8.7 failures per year.

2 Restoration q	3 A(4,000 h) ± 95 %	4 Failures per year ± SE
5 0	0.9457 ± 0.0026	8.65 ± 0.01
6 0.25	0.8925 ± 0.0035	12.90 ± 0.02
7 0.5 (chosen)	0.8383 ± 0.0042	17.36 ± 0.03
8 0.75	0.7877 ± 0.0046	21.69 ± 0.03
9 1	0.7451 ± 0.0049	25.77 ± 0.03

10 Calendar aging vs operating aging at q = 1: 0.716 vs 0.745 at 4,000 h.

11 Kijima I: after each repair V ← V + q·X (operating clock) — the bay time is added to V on the calendar clock; q = 0 as good as new, q = 1 as bad as old. Price the failures saved against the overhaul premium.

Method 4 spectrum — restoration q = 0 … 1 (operating aging), the decision view

- ① Repair quality changes the breakdown rate 3.0× across q = 0 … 1; moving from q = 0.5 to q = 0 saves 8.7 failures per year.
- ② Restoration q
- ③ A(4,000 h) ± 95 %
- ④ Failures per year ± SE
- ⑤ 0 · 0.9457 ± 0.0026 · 8.65 ± 0.01
- ⑥ 0.25 · 0.8925 ± 0.0035 · 12.90 ± 0.02
- ⑦ 0.5 (chosen) · 0.8383 ± 0.0042 · 17.36 ± 0.03
- ⑧ 0.75 · 0.7877 ± 0.0046 · 21.69 ± 0.03
- ⑨ 1 · 0.7451 ± 0.0049 · 25.77 ± 0.03
- ⑩ Calendar aging vs operating aging at q = 1: 0.716 vs 0.745 at 4,000 h.
- ⑪ Kijima I: after each repair V ← V + q·X (operating clock) — the bay time is added to V on the calendar clock; q = 0 as good as new, q = 1 as bad as old. Price the failures saved against the overhaul premium.

ปั๊ม (อัตราคงที่) หลังขั้นตอนที่ 30:

ข้อมูลนำเข้า

1	แบบจำลอง	**แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05)**
2	สถานะ	**2 (Up, Down)**
3	สถานะทำงาน (พร้อมใช้งาน)	**Up**
4	สถานะเริ่มต้น	**Up**
5	เวลาภารกิจ t	**10000**
6	ชั่วโมงทำงาน / ปี	**8760**

ข้อมูลนำเข้า

- ① แบบจำลอง แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05).
- ② สถานะ 2 (Up, Down). สถานะทำงาน (พร้อมใช้งาน) Up. สถานะเริ่มต้น Up
- ③ สถานะทำงาน (พร้อมใช้งาน) Up.
- ④ สถานะเริ่มต้น Up.
- ⑤ เวลาภารกิจ t 10000. ชั่วโมงทำงาน / ปี 8760
- ⑥ ชั่วโมงทำงาน / ปี 8760.

ผลลัพธ์

1	ความพร้อมใช้งานคงตัว A(∞)	0.961538
2	ความพร้อมใช้งานของภารกิจ A(t)	0.961538
3	ความเชื่อถือได้ของภารกิจ R(t)	0.000000
4	MTTF (การเข้าสู่สถานะหยุดครั้งแรก)	500.0
5	เวลาหยุดทำงานที่คาดหวัง / ปี ที่ A(∞)	336.9 h

ผลลัพธ์

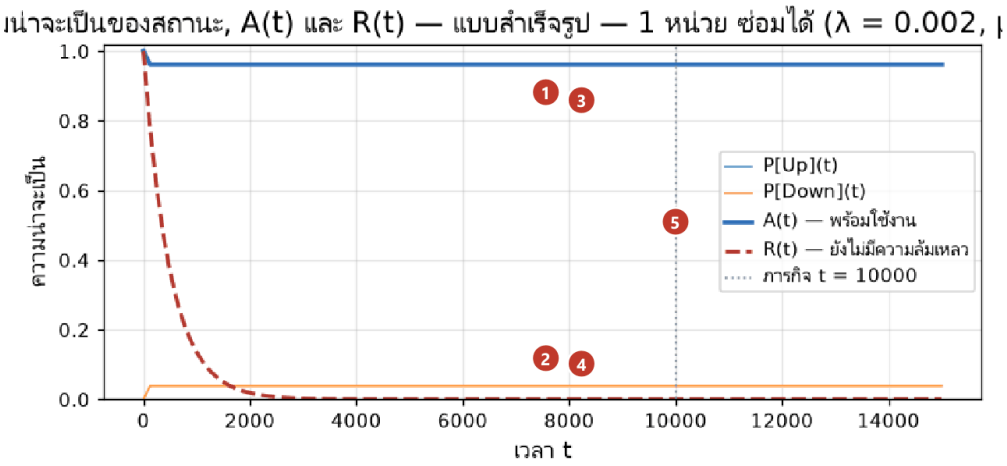
- ① ความพร้อมใช้งานคงตัว A(∞) 0.961538. ในระยะยาวปั๊มทำงาน 0.961538 ของเวลา
- ② ความพร้อมใช้งานของภารกิจ A(t) 0.961538. ที่ 10,000 ชั่วโมงค่านี้เข้าสู่ A(∞) แล้ว
- ③ ความเชื่อถือได้ของภารกิจ R(t) 0.000000. ปั๊มแทบจะแน่นอนว่าล้มเหลวอย่างน้อยหนึ่งครั้งใน 10,000 ชั่วโมง
- ④ MTTF (การเข้าสู่สถานะหยุดครั้งแรก) 500.0. ⑤ เวลาหยุดทำงานที่คาดหวัง / ปี ที่ A(∞) 336.9 h
- ⑤ เวลาหยุดทำงานที่คาดหวัง / ปี ที่ A(∞) 336.9 h.

การตีความ

1 เริ่มจาก 'Up' ระบบพร้อมใช้งานที่ t = 10000 ด้วยความน่าจะเป็น 0.961538; ความน่าจะเป็นที่ระบบไม่เคยหยุดเลยจนถึงตอนนั้นคือ 0.000000 ความพร้อมใช้งานนับการกลับมาใช้งานหลังซ่อม; ความเชื่อถือได้ไม่นับ — ช่องว่างระหว่างสองเส้นโค้งคือสิ่งที่ทีมซ่อมซื้อให้

การตีความ

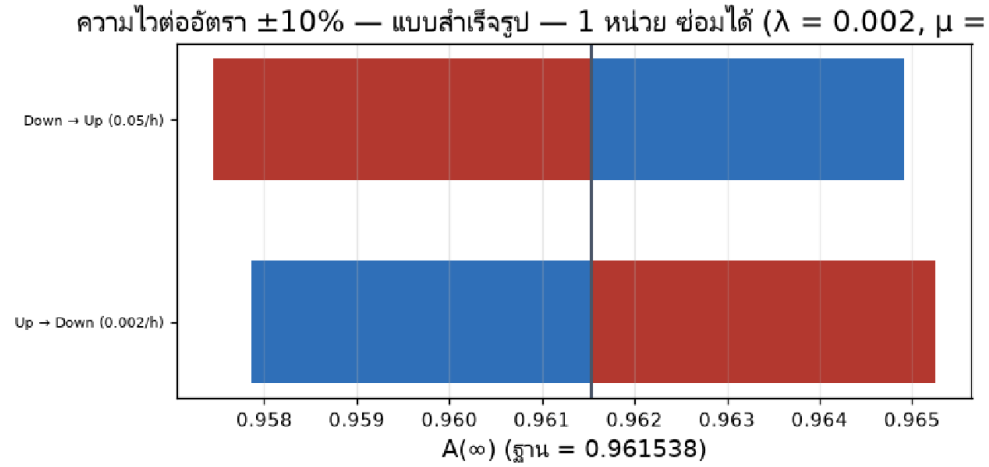
- ① เริ่มจาก 'Up' ระบบพร้อมใช้งานที่ t = 10000 ด้วยความน่าจะเป็น 0.961538; ความน่าจะเป็นที่ระบบไม่เคยหยุดเลยจนถึงตอนนั้นคือ 0.000000 ความพร้อมใช้งานนับการกลับมาใช้งานหลังซ่อม; ความเชื่อถือได้ไม่นับ — ช่องว่างระหว่างสองเส้นโค้งคือสิ่งที่ทีมซ่อมซื้อให้



กราฟแบบโต้ตอบ

กราฟ

- ① เส้น: P[Up](t).
- ② เส้น: P[Down](t).
- ③ เส้น: A(t) — พร้อมใช้งาน.
- ④ เส้น: R(t) — ยังไม่มีความล้มเหลว.
- ⑤ เส้นแนวตั้ง: ภารกิจ t = 10000.



กราฟแบบโต้ตอบ

กราฟ

- ความไวต่ออัตรา: A(∞) เมื่ออัตราแต่ละตัวขยับ ±10%

สถานะที่เวลาภารกิจและสถานะคงตัว — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05)

1. สถานะแรกคือสถานะเริ่มต้น π แก้จาก πQ = 0 โดย Σπ = 1; สำหรับลูกโซ่ที่มีกลุ่มล้มเหลวแบบดูดกลืน π กระจุกอยู่ที่นั่น

2 สถานะ	3 คลาส	4 P(สถานะ) ที่เวลาภารกิจ t	5 สถานะคงตัว π
6 Up	ทำงาน	0.961538	0.961538
7 Down	หยุด	0.038462	0.038462

สถานะที่เวลาภารกิจและสถานะคงตัว — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05)

- ① สถานะแรกคือสถานะเริ่มต้น π แก้จาก πQ = 0 โดย Σπ = 1; สำหรับลูกโซ่ที่มีกลุ่มล้มเหลวแบบดูดกลืน π กระจุกอยู่ที่นั่น
- ② สถานะ
- ③ คลาส
- ④ P(สถานะ) ที่เวลาภารกิจ t
- ⑤ สถานะคงตัว π
- ⑥ Up · ทำงาน · 0.961538 · 0.961538
- ⑦ Down · หยุด · 0.038462 · 0.038462

อัตราการเปลี่ยนสถานะ — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05)

1. ธรรมเนียมของตัวก่อกำเนิด: Q[i][j] = อัตรา i→j, แนวทแยง = −(ผลรวมแถว)

2 จาก	3 ถึง	4 อัตรา (/ชม.)	5 เวลาอยู่เฉลี่ย 1/อัตรา (ชม.)
6 Up	Down	0.002	500.0
7 Down	Up	0.05	20.0

อัตราการเปลี่ยนสถานะ — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05)

- ① ธรรมเนียมของตัวก่อกำเนิด: Q[i][j] = อัตรา i→j, แนวทแยง = −(ผลรวมแถว)
- ② จาก
- ③ ถึง
- ④ อัตรา (/ชม.)
- ⑤ เวลาอยู่เฉลี่ย 1/อัตรา (ชม.)
- ⑥ Up · Down · 0.002 · 500.0
- ⑦ Down · Up · 0.05 · 20.0

ความพร้อมใช้งานกับความเชื่อถือได้ — วิธีอ่านการวิเคราะห์นี้

1. ไม่พบ ≠ พิสูจน์ว่าไม่มี: แบบจำลองมาร์คอฟสมมติอัตราคงที่ — หากข้อมูลความล้มเหลวแสดงการสึกหรอ (ไวบูลล์ β > 1) ให้ถือตัวเลขเหล่านี้เป็นค่าประมาณ

2. **A(t)** คือความน่าจะเป็นที่ระบบอยู่ในสถานะทำงาน ณ ขณะ t — ความล้มเหลวที่ซ่อมเสร็จก่อน t ยังนับว่าพร้อมใช้งาน **R(t)** คือความน่าจะเป็นที่ระบบไม่ล้มเหลวเลยจนถึง t (สถานะหยุดทำงานถูกทำให้เป็นสถานะดูดกลืน) สำหรับแบบจำลองที่ซ่อมไม่ได้ ทั้งสองค่าเท่ากัน; เมื่อมีการซ่อม A(t) จะเข้าสู่ค่าคงตัว A(∞) ขณะที่ R(t) ลดลงเรื่อยๆ เข้าหา 0 ใช้ A(∞) สำหรับงบเวลาหยุดทำงาน ใช้ R(t) สำหรับคำถามภารกิจสำคัญที่ 'ห้ามล้มเหลว' และใช้ MTTF สำหรับค่าเฉลี่ยของความล้มเหลวครั้งแรก

ความพร้อมใช้งานกับความเชื่อถือได้ — วิธีอ่านการวิเคราะห์นี้

- ① ไม่พบ ≠ พิสูจน์ว่าไม่มี: แบบจำลองมาร์คอฟสมมติอัตราคงที่ — หากข้อมูลความล้มเหลวแสดงการสึกหรอ (ไวบูลล์ β > 1) ให้ถือตัวเลขเหล่านี้เป็นค่าประมาณ
- ② A(t) คือความน่าจะเป็นที่ระบบอยู่ในสถานะทำงาน ณ ขณะ t — ความล้มเหลวที่ซ่อมเสร็จก่อน t ยังนับว่าพร้อมใช้งาน R(t) คือความน่าจะเป็นที่ระบบไม่ล้มเหลวเลยจนถึง t (สถานะหยุดทำงานถูกทำให้เป็นสถานะดูดกลืน) สำหรับแบบจำลองที่ซ่อมไม่ได้ ทั้งสองค่าเท่ากัน; เมื่อมีการซ่อม A(t) จะเข้าสู่ค่าคงตัว A(∞) ขณะที่ R(t) ลดลงเรื่อยๆ เข้าหา 0 ใช้ A(∞) สำหรับงบเวลาหยุดทำงาน ใช้ R(t) สำหรับคำถามภารกิจสำคัญที่ 'ห้ามล้มเหลว' และใช้ MTTF สำหรับค่าเฉลี่ยของความล้มเหลวครั้งแรก

ตัวออกแบบ 1 — ซ่อมให้เร็วขึ้น (แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05))

1. การผกผัน A(∞) ใน μ อย่างแม่นตรง (รูปปิด 2 สถานะ μ_req = A·λ/(1−A); หลายสถานะเชิงตัวเลข)

2. ความพร้อมใช้งานคงตัวปัจจุบัน **0.961538** ไม่ถึงเป้าหมาย 99.00% เมื่อคงโครงสร้างนี้ การซ่อมต้องเร็วขึ้นเป็น μ = 0.198/ชม. — คือ **เสร็จภายใน 5.05 ชม. โดยเฉลี่ย** (ปัจจุบันไม่มีส่วนต่างที่บรรลุเป้าหมายที่ μ ที่กรอก)

ตัวออกแบบ 1 — ซ่อมให้เร็วขึ้น (แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05))

- ① การผกผัน A(∞) ใน μ อย่างแม่นตรง (รูปปิด 2 สถานะ μ_req = A·λ/(1−A); หลายสถานะเชิงตัวเลข)
- ② ความพร้อมใช้งานคงตัวปัจจุบัน 0.961538 ไม่ถึงเป้าหมาย 99.00% เมื่อคงโครงสร้างนี้ การซ่อมต้องเร็วขึ้นเป็น μ = 0.198/ชม. — คือ เสร็จภายใน 5.05 ชม. โดยเฉลี่ย (ปัจจุบันไม่มีส่วนต่างที่บรรลุเป้าหมายที่ μ ที่กรอก)

ตัวออกแบบ 2 — เพิ่มหน่วย (บันไดขนานแบบร้อน, แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05))

1. ★ n แรกที่บรรลุเป้าหมาย 99.00% — ทีมร่วม: n* = 2 · ทีมเฉพาะ: n* = 2
ผลได้ส่วนเพิ่มลดลงทุกหน่วย; ซื้อคานที่ถูกกว่าในสองคาน (ซ่อมเร็วขึ้น กับ เพิ่มอีกหน่วย)

2 หน่วย n	3 A(∞) ซ่อมแบบทีมร่วม	4 A(∞) ซ่อมแบบทีมเฉพาะ
5 1	0.961538	0.961538
6 2	0.997046 ★	0.998521 ★
7 3	0.999660	0.999943
8 4	0.999948	0.999998
9 5	0.999990	1.000000
10 6	0.999998	1.000000

ตัวออกแบบ 2 — เพิ่มหน่วย (บันไดขนานแบบร้อน, แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05))

- ① ★ n แรกที่บรรลุเป้าหมาย 99.00% — ทีมร่วม: n* = 2 · ทีมเฉพาะ: n* = 2 ผลได้ส่วนเพิ่มลดลงทุกหน่วย; ซื้อคานที่ถูกกว่าในสองคาน (ซ่อมเร็วขึ้น กับ เพิ่มอีกหน่วย)
- ② หน่วย n
- ③ A(∞) ซ่อมแบบทีมร่วม
- ④ A(∞) ซ่อมแบบทีมเฉพาะ
- ⑤ 1 · 0.961538 · 0.961538
- ⑥ 2 · 0.997046 ★ · 0.998521 ★
- ⑦ 3 · 0.999660 · 0.999943
- ⑧ 4 · 0.999948 · 0.999998
- ⑨ 5 · 0.999990 · 1.000000
- ⑩ 6 · 0.999998 · 1.000000

นโยบายการซ่อม — ทีมร่วมกับทีมเฉพาะ (2 ขนานที่อัตราเหล่านี้)

1 ทีมที่สองซื้อเวลาทำงาน 12.92 ชม./ปี = 129,203/ปี ที่ค่าความสูญเสียการผลิตที่ป้อน — เทียบกับต้นทุนของทีมซ่อมเพื่อตัดสินใจ.

2 นโยบาย	3 A(∞)	4 เวลาหยุดทำงาน ชม./ปี
5 ทีมร่วม (1 ทีม)	0.997046	25.9
6 ทีมเฉพาะ (2 ทีม)	0.998521	13.0

นโยบายการซ่อม — ทีมร่วมกับทีมเฉพาะ (2 ขนานที่อัตราเหล่านี้)

- ① ทีมที่สองซื้อเวลาทำงาน 12.92 ชม./ปี = 129,203/ปี ที่ค่าความสูญเสียการผลิตที่ป้อน — เทียบกับต้นทุนของทีมซ่อมเพื่อตัดสินใจ.
- ② นโยบาย
- ③ A(∞)
- ④ เวลาหยุดทำงาน ชม./ปี
- ⑤ ทีมร่วม (1 ทีม) · 0.997046 · 25.9
- ⑥ ทีมเฉพาะ (2 ทีม) · 0.998521 · 13.0

เศรษฐศาสตร์ของเวลาหยุดทำงาน — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05)

1 ต้นทุน = π × 8760 ชม./ปี × 10,000/ชม.; รวม 3,369,231/ปี ที่สถานะคงตัว สำหรับลูกโซ่แบบดูดกลืน π อยู่ในกลุ่มล้มเหลว — อ่านผลรวมเป็นอัตราหยุดทั้งหมดในที่สุด ไม่ใช่งบดำเนินงาน

2 สถานะหยุด	3 π (สัดส่วนของเวลา)	4 ชั่วโมง / ปี	5 ต้นทุน / ปี	6 สัดส่วนของต้นทุนเวลาหยุดทำงาน
7 Down	0.038462	336.9	3,369,231	100.0%

เศรษฐศาสตร์ของเวลาหยุดทำงาน — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05)

- ① ต้นทุน = π × 8760 ชม./ปี × 10,000/ชม.; รวม 3,369,231/ปี ที่สถานะคงตัว สำหรับลูกโซ่แบบดูดกลืน π อยู่ในกลุ่มล้มเหลว — อ่านผลรวมเป็นอัตราหยุดทั้งหมดในที่สุด ไม่ใช่งบดำเนินงาน
- ② สถานะหยุด
- ③ π (สัดส่วนของเวลา)
- ④ ชั่วโมง / ปี
- ⑤ ต้นทุน / ปี
- ⑥ สัดส่วนของต้นทุนเวลาหยุดทำงาน
- ⑦ Down · 0.038462 · 336.9 · 3,369,231 · 100.0%

การตรวจสอบความเชื่อถือ — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (Λ = 0.002, M = 0.05)

1 การจำลองรันลูกโซ่เดียวกันซ้ำทีละเหตุการณ์ด้วยค่าเริ่มต้นสุ่มคงที่ (กำหนดแน่นอน) — เป็นพื้นผิวอิสระ ไม่ใช่การรันสูตรซ้ำ

2 A(t = 10000) เชิงวิเคราะห์ = **0.961538** · การจำลองอิสระแบบมีค่าเริ่มต้นสุ่ม = **0.9605 ± 0.0060** (95%, 4,000 ประวัติ) — คำตอบเชิงวิเคราะห์อยู่ภายในช่วงของการจำลอง; การคำนวณอิสระสองทางสอดคล้องกัน

การตรวจสอบความเชื่อถือ — แบบสำเร็จรูป — 1 หน่วย ซ่อมได้ (λ = 0.002, μ = 0.05)

- ① การจำลองรันลูกโซ่เดียวกันซ้ำทีละเหตุการณ์ด้วยค่าเริ่มต้นสุ่มคงที่ (กำหนดแน่นอน) — เป็นพื้นผิวอิสระ ไม่ใช่การรันสูตรซ้ำ
- ② A(t = 10000) เชิงวิเคราะห์ = 0.961538 · การจำลองอิสระแบบมีค่าเริ่มต้นสุ่ม = 0.9605 ± 0.0060 (95%, 4,000 ประวัติ) — คำตอบเชิงวิเคราะห์อยู่ภายในช่วงของการจำลอง; การคำนวณอิสระสองทางสอดคล้องกัน

ภาค 5 — วิธีตีความผลลัพธ์

คำตอบขึ้นกับสิ่งที่การซ่อมทำ อายุเฉลี่ยของกระปุกเกียร์คือ 886.23 ชั่วโมง ถ้าการซ่อมทุกครั้งทำให้เหมือนใหม่ ความพร้อมใช้งานจะเข้าสู่ 0.94659 คืออายุเฉลี่ยหารด้วยอายุเฉลี่ยบวกเวลาซ่อมเฉลี่ย 886.23 / 936.23 และวิธีที่ 2 และ 3 ให้ 0.9466 ที่ 4,000 ชั่วโมง เท่ากัน ถ้าการซ่อมทุกครั้งเพียงแก้ชิ้นที่เสียและปล่อยให้กระปุกเกียร์เก่าเท่าเดิม ความพร้อมใช้งานที่ 4,000 ชั่วโมงคือ 0.7161 และยังลดลงต่อ ถึง 0.5006 ที่ 10,000 ชั่วโมง ไม่มีคำตอบใด "ถูกกว่า" ให้อ่านบรรทัดที่ตรงกับงานซ่อมของคุณ

การซ่อมแบบปะชิ้นส่วนเป็นการแข่งที่แพ้บนเครื่องจักรที่สึกหรอ ภายใต้การซ่อมขั้นต่ำ อัตราความล้มเหลวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ขณะที่อัตราการซ่อมเท่าเดิม ความพร้อมใช้งานจึงไม่เข้าสู่ค่าคงตัว ค่าประมาณเร็ว μ / (λ(t) + μ) = 0.02 / 0.028 = 0.7143 ที่ 4,000 ชั่วโมง ใกล้กับค่าแม่นตรง 0.7161 เพราะอัตราเสี่ยงเปลี่ยนช้าเมื่อเทียบกับเวลาซ่อม

การซ่อมที่อยู่ระหว่างกลาง วิธีที่ 4 ครอบคลุมทั้งสองแบบ q = 0 ทำให้กระปุกเกียร์เหมือนใหม่ q = 1 ปะชิ้นส่วน ให้เชื่อตัวเลขของวิธีนี้เมื่อการ์ดการทวนสอบแสดง ทวนสอบแล้ว: q = 0 ทำซ้ำวิธีที่ 3 และ q = 1 (การเสื่อมสภาพตามปฏิทิน) ทำซ้ำวิธีที่ 1 ภายในช่วง 95 % ที่ทุกเวลารายงาน เท่านั้น จากนั้นสเปกตรัมของวิธีนี้คิดราคาคุณภาพการซ่อม คือการซ่อมที่ดีขึ้นลดความล้มเหลวได้กี่ครั้งต่อปี เทียบกับต้นทุนของการซ่อมที่ดีขึ้นนั้น

ควรวางแผนทีมช่างซ่อมไว้สำหรับอะไร เมื่อซ่อมแบบทำใหม่ กระปุกเกียร์ล้มเหลว 9.36 ครั้งต่อปีในระยะยาว คือหนึ่งครั้งต่ออายุเฉลี่ยบวกเวลาซ่อมเฉลี่ย 8,760 / 936.23 ชั่วโมง

ปั๊มที่มีอัตราคงที่ ในระยะยาวปั๊มทำงาน 0.961538 ของเวลา คือ 0.05 / (0.002 + 0.05) และหยุด 336.9 ชั่วโมงต่อปี ซึ่งไม่ถึงเป้าหมาย 99% การ์ดผู้ออกแบบให้สองทางที่จะถึงเป้าหมาย คือซ่อมเร็วขึ้น หรือเพิ่มหน่วย และการ์ดเศรษฐศาสตร์คิดราคาเวลาหยุดทำงาน ความเชื่อถือได้ของภารกิจตลอด 10,000 ชั่วโมงคือ 0.000000 เพราะเวลาเฉลี่ยจนถึงความล้มเหลวเพียง 500 ชั่วโมง ปั๊มจึงแทบแน่นอนว่าจะล้มเหลวอย่างน้อยหนึ่งครั้ง ใช้ A(∞) สำหรับงบเวลาหยุดทำงาน และใช้ R(t) เฉพาะภารกิจที่ "ห้ามล้มเหลว"

อัตราคงที่เป็นข้อสมมติ ถ้าข้อมูลความล้มเหลวของปั๊มแสดงการสึกหรอ (ไวบูลล์ β > 1) ให้สร้างแบบจำลองแบบกระปุกเกียร์ ตัวเลขแบบอัตราคงที่จะเป็นเพียงค่าประมาณ