## บทที่ 3

## การวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.1 การทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจง

จากการแจกแจงความน่าจะเป็น สมมุติฐาน x เป็นตัวแปรสุ่มของการขัดข้อง จะหาความถี่ของตัวแปรสุ่ม x แต่ละค่าได้ ถ้าทราบความถี่ทั้งหมด ซึ่งก็คือจำนวนของ เวลาที่ขัดข้องที่นำมาทดลอง สมมุติเท่ากับ NTTE (Number of TTF.) ความถี่เหล่านั้นจะมีค่า เท่ากับ NTTE.Rr (X=x) ความถี่นี้เป็นความถี่ที่คาดว่าจะได้ (Expected) เท่านั้น ไม่ใช่ความถี่ที่ได้จากข้อมูลจริง ดังนั้นจะต้องทดสอบความแตกต่างระหว่างความถี่ที่ได้จากข้อมูลจริง (Observed) และความถี่ที่คาดว่าจะได้ (Expected) ตามที่ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม x ว่ามีนัยสำคัญ (Significant) หรือไม่ โดยใช้การทดสอบไคสแควร์ (chi - square test) การทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจงความถี่ที่ได้จากข้อมูลจริง และความถี่ที่คาดว่าจะได้ขึ้นอยู่กับค่าของ

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} = \sum_{i=1}^{k} \frac{O_i^2}{e_i} - NTTF$$

เมื่อ $\chi^2$ เป็นค่าของตัวแปรสุ่ม $\chi^2$ ซึ่งมีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงไคสแควร์มากที่สุด สัญลักษณ์ $O_i$ และ $e_i$ เป็นความถี่ที่ได้จากข้อมูลจริงและความถี่ที่คาดว่าจะได้ตามทฤษฎีตามลำดับ

ถ้าความถี่ที่ได้จากข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ที่คาดว่าจะได้ตามทฤษฎี ก็จะมีค่าน้อย ถ้าความถี่ต่างกันมาก ค่าของ $\chi^2$ ก็จะมากด้วย ฉนั้นขอบเขตที่ยอมรับได้ก็คือ เมื่อ $\chi^2 < \chi^2_\alpha$ โดยที่ $\chi^2_\alpha$ เป็นค่าที่ได้จากตารางการแจกแจงไคสแควร์ เมื่อระดับความมีนัยสำคัญคือ $\alpha$ และขั้นแห่งความเป็นอิสระ (degree of freedom) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการ คือ จำนวนขั้นในการทดสอบข้อมูล และจำนวนค่าพารามิเตอร์สถิติ ของการแจกแจงที่นำมาทด

สอบข้อมูล

การทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจง ความถี่ที่ได้จากข้อมูล และความถี่ที่คาดว่าจะได้จากสมมุติฐานการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล (Exponential distribution) การแจกแจงปกติ (Normal distribution) การแจกแจงล้อกนอร์มัล (Log-normal distribution) และการแจกแจงเวบูล (Weibull distribution) ได้ทำการทดสอบดูว่าข้อมูลมีการกระจายใกล้เคียงกับการแจกแจงใด เพื่อที่จะได้อาศัยการแจกแจงนั้นเป็นสมมุติฐานในการวิเคราะห์พารามิเตอร์การขัดข้อง เนื่องจากว่าข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาอาจมีการผิดพลาดบ้างหรือมีไม่มากพอที่จะสร้างฮิสโตแกรม (Histogram) วัดการกระจายที่สมบูรณ์ได้ จึงต้องอาศัยการแจกแจงสถิติดังกล่าว สำหรับการทดสอบข้อมูล เวลาขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลรถขุดขนาด $^1/_2$ หลา$^3$ ชนิด DL - MA จำนวน 13 คัน มีจำนวนข้อมูลที่เป็นตัวอย่าง (NTTF) 24 ข้อมูล และมีเวลาที่ขัดข้อง (TTF) แสดงไว้ในตารางที่ 2.11 ในบทที่ 2 นำมาทำการแบ่งขนาดของชั้นเวลาที่ขัดข้องที่เหมาะสมได้ 12 ชั้น จากจำนวนชั้นเท่ากับพิสัยหารด้วยขนาดของชั้นต่อมาทำการหาความแตกต่างความถี่ที่ได้จากข้อมูล และจากสมมุติฐานการแจกแจงสถิติที่นำมาใช้

จากตารางที่ 3.1 $O_i$ เป็นความถี่ที่ได้จากข้อมูล pdf. เป็นฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ของการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล pdf หรือ $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$ และระหว่างช่วงเวลา $t_1 - t_2 = \int_{t_1}^{t_2} f(t)\,dt$ ค่า $e_i$ เป็นความถี่ที่คาดว่าจะได้จากสมมุติฐานการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล มีค่าเท่ากับ NTTF $\int_{t_1}^{t_2} f(t)\,dt$ ได้ค่า $\chi^2 = 45.614$ ที่ระดับความมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ค่า $\chi^2_{.05}$ จากตารางไคสแควร์เท่ากับ 18.307 โดยมีชั้นแห่งความเป็นอิสระ (df) = 12 = 10 เมื่อค่า $\chi^2 < \chi^2_{.05}$ จึงสรุปได้ว่า การแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 1 ไม่เป็นการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล ทำการทดสอบข้อมูลกับการแจกแจงปกติ การแจกแจงล้อกนอร์มัล และการแจกแจงเวบูล ด้วยวิธีเช่นเดียวกันโดยมีค่าฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นระหว่างช่วงเวลา $t_1 - t_2$ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงของข้อมูลกับการแจกแจง เอ็กซ์โปเน็นเชียล

| $i$ | $t_1 - t_2$ | $O_i$ | Pdf. | $e_i$ | $\frac{(O_i - e_i)^2}{e_i}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1080 - 1245 | 1 | 0.0475 | 1.10 | 0.009 |
| 2 | 1245 - 1410 | 2 | 0.0422 | 1.00 | 1.000 |
| 3 | 1410 - 1575 | 1 | 0.0389 | 0.93 | 0.005 |
| 4 | 1575 - 1740 | 2 | 0.0 359 | 0.86 | 1.511 |
| 5 | 1740 - 1905 | 3 | 0.0331 | 0.79 | 6.182 |
| 6 | 1950 - 2070 | 4 | 0.0305 | 0.73 | 14.648 |
| 7 | 2070 - 2235 | 3 | 0.0282 | 0.68 | 7.915 |
| 8 | 2235 - 2400 | 3 | 0.0260 | 0.62 | 9.136 |
| 9 | 2400 - 2565 | 2 | 0.0240 | 0.57 | 3.588 |
| 10 | 2565 - 2730 | 1 | 0.0221 | 0.53 | 0.417 |
| 11 | 2730 - 2895 | 1 | 0.0204 | 0.49 | 0.531 |
| 12 | 2895 - 3060 | 1 | 0.0188 | 0.45 | 0.672 |
| | รวม | 24 | | | 45.614 |

การแจกแจงปกติ $$= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left[-(t-\mu)^2/2\sigma^2\right] dt$$

การแจกแจงล้อกนอร์มัล $$= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{1}{2}(\log t - \mu)^2/\sigma^2\right] dt$$

การแจกแจงเวบูล $$= \int_{t_1}^{t_2} \frac{\beta t^{\beta-1}}{\sigma\beta} \exp\left[-(t/\sigma)^{\beta}\right] dt$$

พบว่าการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 1 เป็นการแจกแจงปกติ การแจกแจงล้อกนอร์มัล และการแจกแจงเวบูล โดยมีการแจกแจงปกติมีค่า $\chi^2$ น้อยที่สุด

ตารางที่ 3.2 <u>การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงสถิติกับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 1</u>

| การแจกแจง | $\chi^2$ | $\chi^2 0.05$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| เอ็กซ์โปเน็นเชี่ยน | 45.614 | 18.307 | 10 | ไม่เหมาะสม |
| ปกติ | 1.933 | 16.919 | 9 | เหมาะสม |
| ล้อกนอร์มัล | 2.408 | 16.919 | 9 | เหมาะสม |
| เวบูล | 6.016 | 18.307 | 10 | เหมาะสม |

การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 2,3,4 และ 5 สรุปได้ตามตารางที่ 3.3-3.6 ตามลำดับ จากการทดสอบนี้ พบว่าการแจกแจงปกติมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นสมมุติฐานการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุด ของการศึกษาวิจัยนี้ เนื่องจากมีค่า $\chi^2$ ไม่มากนักและอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของเครื่องจักรกลที่นำมาศึกษาทั้ง 5 กลุ่ม สำหรับการทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน หมายเลขอุปกรณ์ 216 WD, GR - 56, 124 WD, 130 WD และ 6313 Z กับสมมุติฐานการแจกแจงเวบูล สรุปได้ตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 <u>การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงสถิติ กับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 2</u>

| การแจกแจง | $\chi^2$ | $\chi^2 0.05$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| เอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล | 59.894 | 23.685 | 14 | ไม่เหมาะสม |
| ปกติ | 11.902 | 22.362 | 13 | เหมาะสม |
| ล้อกนอร์มัล | 7.821 | 22.362 | 13 | เหมาะสม |
| เวบูล | 23.310 | 23.685 | 14 | เหมาะสม |

ตารางที่ 3.4 การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงสถิติกับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 3

| การแจกแจง | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.05}$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| เอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล | 117.154 | 22.362 | 13 | ไม่เหมาะสม |
| ปกติ | 3.099 | 21.026 | 12 | เหมาะสม |
| ล็อกนอร์มัล | 4.892 | 21.026 | 12 | เหมาะสม |
| เวบูล | 12.599 | 22.362 | 13 | เหมาะสม |

ตารางที่ 3.5 การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงสถิติกับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 4

| การแจกแจง | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.05}$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| เอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล | 141.608 | 23.685 | 14 | ไม่เหมาะสม |
| ปกติ | 10.522 | 22.362 | 13 | เหมาะสม |
| ล็อกนอร์มัล | 6.346 | 22.362 | 13 | เหมาะสม |
| เวบูล | 40.459 | 23.685 | 14 | ไม่เหมาะสม |

ตารางที่ 3.6 การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงสถิติกับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 5

| การแจกแจง | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.05}$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| เอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล | 277.369 | 21.026 | 12 | ไม่เหมาะสม |
| ปกติ | 14.306 | 19.675 | 11 | เหมาะสม |
| ล็อกนอร์มัล | 24.677 | 19.675 | 11 | ไม่เมาะสม |
| เวบูล | 10.541 | 21.026 | 12 | เหมาะสม |

ตารางที่ 3.7 การทดสอบความเหมาะสมการแจกแจงเวบุลกับการแจกแจงการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน

| หมายเลขอุปกรณ์ | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.05}$ | df | ผลการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| 216 WD | 4.538 | 7.815 | 3 | เหมาะสม |
| GT - 56 | 9.940 | 15.507 | 8 | เหมาะสม |
| 124 WD | 8.752 | 18.307 | 10 | เหมาะสม |
| 130 WD | 10.085 | 16.919 | 9 | เหมาะสม |
| NSK 6313 Z | 20.908 | 23.685 | 14 | เหมาะสม |

## 3.2 การแจกแจงการขัดข้องที่ได้จากข้อมูล

ค่าพารามิเตอร์การขัดข้อง (Failure Parameter) ที่สำคัญได้แก่ ความเชื่อถือได้ (Reliability) อัตราการขัดข้อง (Failure Rate) และเวลาเฉลี่ยก่อนการขัดข้อง (Mean time to failure) ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะบอกให้เราทราบว่า ตัวแปรสุ่มของการขัดข้องที่พิจารณาให้เป็นตัวอย่าง (Sample) จากกลุ่มของเครื่องจักรกล (population) กลุ่มหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไร เช่น เครื่องจักรกลรถขุดมีโอกาสที่จะเกิดการขัดข้องในช่วงเวลาปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใด

จากข้อมูลเวลาการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 1 มีจำนวนเวลาก่อนการขัดข้อง (NTTE) เท่ากับ 24 กำหนดให้เป็นตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบ (N) และกำหนดให้

$R(t)$ = โอกาสที่เครื่องจักรกลไม่เกิดการขัดข้องในช่วงเวลา $(0,t)$

$F(t)$ = โอกาสที่เครื่องจักรกลเกิดการขัดข้องในช่วงเวลา $(0,t)$

$L(t)$ = จำนวนเครื่องจักรกลที่ไม่เกิดการขัดข้องที่เวลา $t$

เราสามารถแสดงโค้งการกระจายของ $R(t)$ และ $F(t)$ ได้ ดังรูปที่ 3.1 เมื่อ $R(t) = L(t)/N$ และ $F(t) = 1-R(t)$ จากตารางที่ 3.8 ความแตกต่างระหว่าง $F(1245) - F(1080)$ ซึ่งมีความห่างของขั้นเวลา ($dt$) เท่ากับ 165 ชั่วโมง เป็นสัดส่วนของประชากรหรือกลุ่มเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1 ที่คาดหมายว่า จะเกิดการขัดข้องระหว่าง

เวลา 1080 ถึง 1245 ชั่วโมง จำนวนเครื่องจักรกลที่ขัดข้องในช่วงเวลา $(t,t + dt)$ จะเท่ากับ $L(1080) - L(1245)$ และกำหนดให้

$\Delta$ = จำนวนเครื่องจักรกลที่ขัดข้องในช่วงเวลา $(t,t + dt)$

$f(t)$ = โอกาสที่เครื่องจักรกลเครื่องแรกเกิดการขัดข้องในช่วงเวลา $(t,t + dt)$

$r(t)$ = โอกาสที่เครื่องจักรกลเกิดการขัดข้องต่อ 1 ชั่วโมงในช่วงเวลา $(t,t + dt)$

ดังนั้น $f(t) = \Delta/N$

และ $$r(t) = \frac{f(t)}{R(t).dt}$$

การคำนวณในตารางที่ 3.8 กำหนดขนาดของขั้นแต่ละขั้น (dt) เท่ากับ 165 ชั่วโมง ที่เวลา 0 ชั่วโมง เป็นเวลาเริ่มต้น เครื่องจักรกลทุกคันยังไม่เกิดการขัดข้อง $L(o)$ จึงเท่ากับ 24 เท่ากับจำนวนที่นำมาทดลองทั้งหมด (N) และ $R(O) = 1$ เมื่อเวลาผ่านไป $t = 1410$ ชั่วโมง เครื่องจักรกลได้เกิดการขัดข้องไปแล้วเป็นจำนวน 3 คัน คือ คันแรกขัดข้องที่เวลา 1080 ชั่วโมง คันที่สองและสาม ขัดข้องเวลา 1260 ชั่วโมง ดังนั้น $L(1410)$ เท่ากับจำนวนตัวอย่างทั้งหมดลบด้วยจำนวนที่ขัดข้อง เมื่อเวลา 1410 ชั่วโมง และ

$$R(1410) = L(1410)/N = 21/24 = 0.875$$

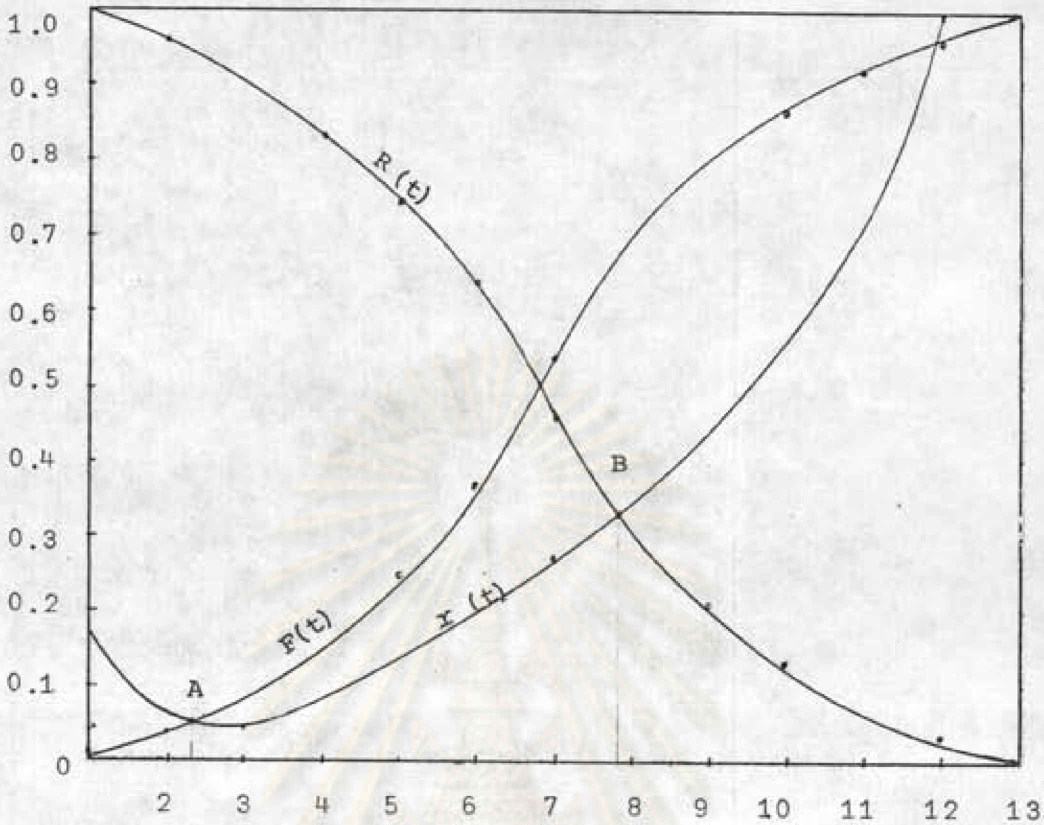
$$F(1410) = 1 - R(1410) = 1 - 0.875 = 0.125$$

$$\Delta = L(1410) - L(1575) = 21 - 20 = 1$$

$$f(1410) = \Delta/N = 1/24 = 0.042$$

$$r(1410) = \frac{f(1410)}{R(1410).dt} = \frac{0.042}{0.875 \times 165} = 0.00029$$

จนถึงเวลา 3060 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เครื่องจักรกลคันสุดท้ายเกิดการขัดข้อง นำพารามิเตอร์การขัดข้องที่คำนวณได้นี้ มาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.1 และทำการปรับค่าอัตราการขัดข้อง (r) จากต่อหน่วยเวลา 1 ชั่วโมง มาเป็น 165 ชั่วโมงด้วยการเอา dt คูณกับ $r(t)$ ถ้าวิเคราะห์จากรูปที่ 3.1 จะพบว่า ที่ช่วงเวลา O-A หรือช่วงเวลาประมาณ 0-1260 ชั่วโมง เป็นการขัดข้องขั้นต้น (Early failure) เป็นการขัดข้องที่ผิดปกติ มีความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์อัตราการขัดข้องสูงกว่า เส้นโค้งการกระจายการขัดข้องทั่ว ๆ ไป สาเหตุการเกิดขัดข้องในช่วงนี้ อาจเกิดจากเครื่องจักรกลได้รับการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์มาไม่ดีพอ




รูปที่ 3.1  กราฟ R(t) , F(t) และ r(t) ของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1

ถ้าเป็นเครื่องจักรกลใหม่ ผู้ควบคุมอาจยังไม่ชำนาญกับการใช้งาน  หลังจากใช้งานได้ไม่นาน จึงเกิดการขัดข้องขึ้น และจากข้อมูลการขัดข้องเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1 จำนวน 24 ข้อมูล พบว่ามีจำนวน 3 ข้อมูลที่ขัดข้องในช่วงเวลานี้ 3 ข้อมูล หรือ 12.5%  ที่ช่วงเวลา A-B หรือช่วงเวลาประมาณ 1260 - 2200 ชั่วโมง เป็นการขัดข้องแปรสุ่ม (Random failure) การเกิดขัดข้องเป็นไปตามปกติ มีจำนวน 10 ข้อมูล หรือ 42%  ที่ช่วงเวลา B หรือที่เวลาประมาณ 2200 ชั่วโมงขึ้นไป  เป็นการขัดข้องแบบหมดสภาพ (Wearout failure) อุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลเริ่มหมดสภาพการใช้งาน และมีจำนวน 11 ข้อมูล หรือ 45.5%

เวลาเฉลี่ยก่อนการขัดข้อง (MTTF) เท่ากับผลรวมเวลาที่ขัดข้องของข้อมูลหารด้วยจำนวนของข้อมูล

$$MTTF = \sum_{i=1}^{N} TTF_i / N = 2042.5 \text{ ชั่วโมง}$$

ตารางที่ 3.8 การแจกแจงจากข้อมูลจริงของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 1

| ลำดับ | เวลา, t | L(t) | R(t) | F(t) | Δ | f(t) | r(t) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 24 | 1.00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1080 | 24 | 1.00 | 0 | 1 | 0.042 | 0.00025 |
| 2 | 1245 | 23 | 0.96 | 0.04 | 2 | 0.083 | 0.00053 |
| 3 | 1410 | 21 | 0.88 | 0.12 | 1 | 0.042 | 0.00029 |
| 4 | 1575 | 20 | 0.83 | 0.17 | 2 | 0.083 | 0.00061 |
| 5 | 1740 | 18 | 0.75 | 0.25 | 3 | 0.125 | 0.00101 |
| 6 | 1905 | 15 | 0.63 | 0.37 | 4 | 0.166 | 0.00162 |
| 7 | 2070 | 11 | 0.46 | 0.54 | 3 | 0.125 | 0.00165 |
| 8 | 2235 | 8 | 0.33 | 0.67 | 3 | 0.125 | 0.00227 |
| 9 | 2400 | 5 | 0.21 | 0.79 | 2 | 0.083 | 0.00242 |
| 10 | 2565 | 3 | 0.13 | 0.87 | 1 | 0.042 | 0.00202 |
| 11 | 2730 | 2 | 0.08 | 0.92 | 1 | 0.042 | 0.00303 |
| 12 | 2895 | 1 | 0.04 | 0.96 | 1 | 0.042 | 0.00606 |
| 13 | 3060 | 0 | 0 | 1.00 | - | - | - |

ตารางที่ 3.9 การแจกแจงจากข้อมูลจริงของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 2

| t | L(t) | R(t) | F(t) | Δ | f(t) | r(t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 40 | 1.00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1260 | 40 | 1.00 | 0 | 1 | 0.025 | 0.00014 |
| 1440 | 39 | 0.97 | 0.03 | 2 | 0.050 | 0.00028 |
| 1620 | 37 | 0.92 | 0.07 | 3 | 0.075 | 0.00045 |
| 1800 | 34 | 0.85 | 0.15 | 6 | 0.150 | 0.00098 |
| 1980 | 28 | 0.70 | 0.30 | 5 | 0.125 | 0.00099 |
| 2160 | 23 | 0.57 | 0.43 | 5 | 0.125 | 0.00121 |
| 2340 | 18 | 0.45 | 0.55 | 4 | 0.100 | 0.00123 |
| 2520 | 14 | 0.35 | 0.65 | 2 | 0.050 | 0.00079 |
| 2700 | 12 | 0.30 | 0.70 | 3 | 0.075 | 0.00139 |
| 2880 | 9 | 0.22 | 0.78 | 1 | 0.025 | 0.00062 |
| 3060 | 8 | 0.20 | 0.80 | 2 | 0.050 | 0.00139 |
| 3240 | 6 | 0.15 | 0.85 | 1 | 0.025 | 0.00093 |
| 3420 | 5 | 0.13 | 0.87 | 1 | 0.025 | 0.00111 |
| 3600 | 4 | 0.10 | 0.90 | 2 | 0.050 | 0.00278 |
| 3780 | 2 | 0.05 | 0.95 | 1 | 0.025 | 0.00278 |
| 3960 | 1 | 0.02 | 0.98 | 1 | 0.025 | 0.00555 |
| 4140 | 0 | 0 | 1.00 | 0 | - | - |

MTTF = 2350.5 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.10 การแจกแจงจากข้อมูลจริงของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 3

| t | L(t) | R(t) | F(t) | Δ | f(t) | r(t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 66 | 1.00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1620 | 66 | 1.00 | 0 | 2 | 0.030 | 0.00018 |
| 1788 | 64 | 0.97 | 0.03 | 1 | 0.015 | 0.00009 |
| 1956 | 63 | 0.95 | 0.05 | 3 | 0.045 | 0.00028 |
| 2124 | 60 | 0.91 | 0.09 | 4 | 0.061 | 0.00040 |
| 2292 | 56 | 0.85 | 0.15 | 7 | 0.106 | 0.00074 |
| 2460 | 49 | 0.74 | 0.26 | 7 | 0.106 | 0.00085 |
| 2628 | 42 | 0.64 | 0.36 | 10 | 0.152 | 0.00142 |
| 2796 | 32 | 0.48 | 0.52 | 9 | 0.136 | 0.00167 |
| 2964 | 23 | 0.35 | 0.65 | 6 | 0.091 | 0.00155 |
| 3132 | 17 | 0.26 | 0.74 | 6 | 0.091 | 0.00210 |
| 3300 | 11 | 0.17 | 0.83 | 5 | 0.076 | 0.00271 |
| 3468 | 6 | 0.09 | 0.91 | 3 | 0.045 | 0.00298 |
| 3636 | 3 | 0.05 | 0.95 | 1 | 0.015 | 0.00198 |
| 3804 | 2 | 0.03 | 0.97 | 1 | 0.015 | 0.00298 |
| 3972 | 1 | 0.01 | 0.99 | 1 | 0.015 | 0.00595 |
| 4140 | 0 | 0 | 1.00 | 0 | - | - |

MTTF = 2790 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.11 การแจกแจงจากข้อมูลจริงของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 4

| t | L(t) | R(t) | F(t) | Δ | f(t) | r(t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 72 | 1.00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1440 | 72 | 1.00 | 0 | 1 | 0.014 | 0.00008 |
| 1608 | 71 | 0.97 | 0.03 | 7 | 0.097 | 0.00058 |
| 1777 | 64 | 0.89 | 0.11 | 5 | 0.069 | 0.00046 |
| 1946 | 59 | 0.82 | 0.18 | 7 | 0.097 | 0.00070 |
| 2115 | 52 | 0.72 | 0.28 | 10 | 0.140 | 0.00114 |
| 2283 | 42 | 0.58 | 0.42 | 9 | 0.125 | 0.00127 |
| 2452 | 33 | 0.46 | 0.54 | 6 | 0.083 | 0.00108 |
| 2621 | 27 | 0.38 | 0.62 | 7 | 0.097 | 0.00154 |
| 2790 | 20 | 0.28 | 0.72 | 8 | 0.111 | 0.00237 |
| 2958 | 12 | 0.17 | 0.83 | 3 | 0.042 | 0.00148 |
| 3127 | 9 | 0.13 | 0.87 | 3 | 0.042 | 0.00198 |
| 3296 | 6 | 0.08 | 0.92 | 2 | 0.028 | 0.00198 |
| 3465 | 4 | 0.06 | 0.94 | 1 | 0.014 | 0.00148 |
| 3633 | 3 | 0.04 | 0.96 | 1 | 0.014 | 0.00198 |
| 3802 | 2 | 0.03 | 0.97 | 1 | 0.014 | 0.00296 |
| 3971 | 1 | 0.01 | 0.99 | 1 | 0.014 | 0.00593 |
| 4140 | 0 | 0 | 1.00 | 0 | - | - |

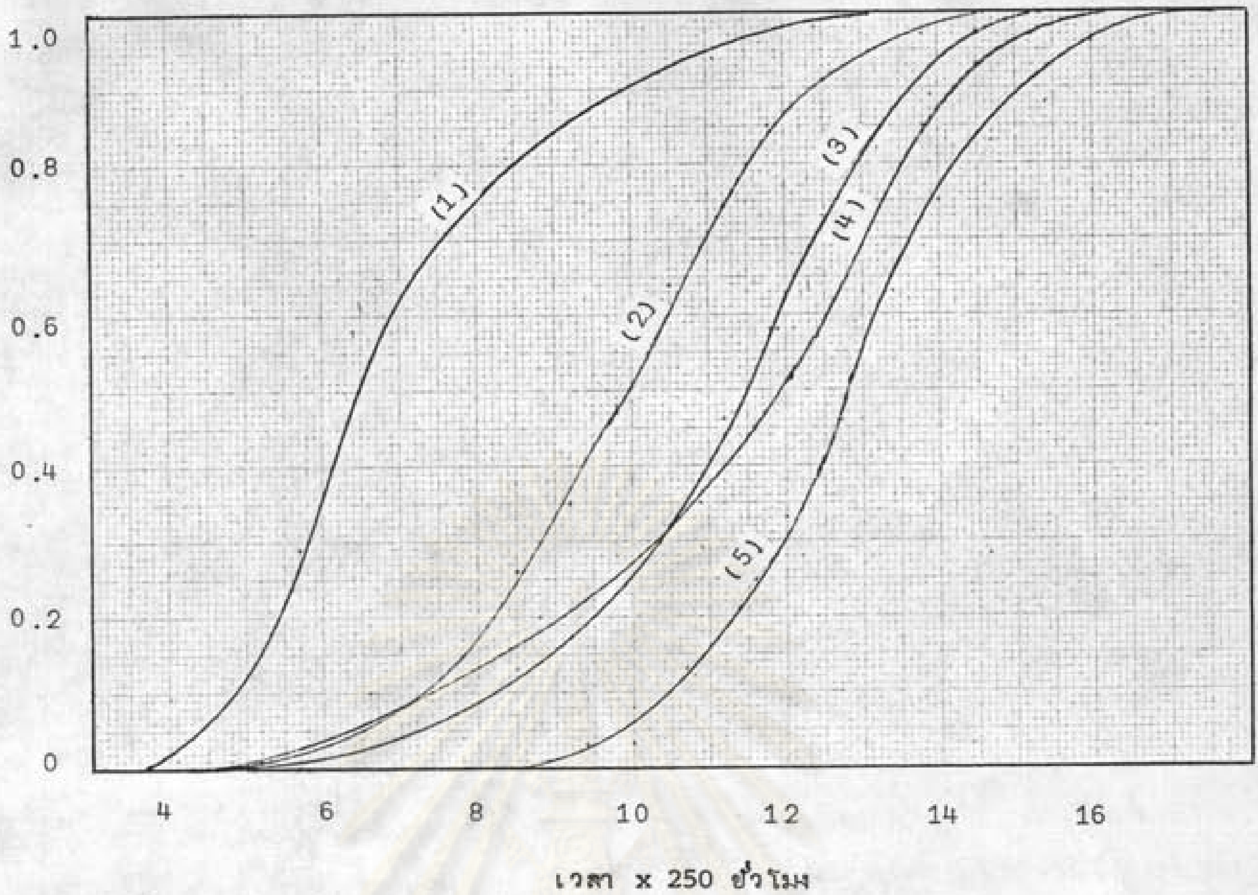
**MTTF = 2452.5 ชั่วโมง**

ตารางที่ 3.12 การแจกแจงจากข้อมูลจริงของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 5

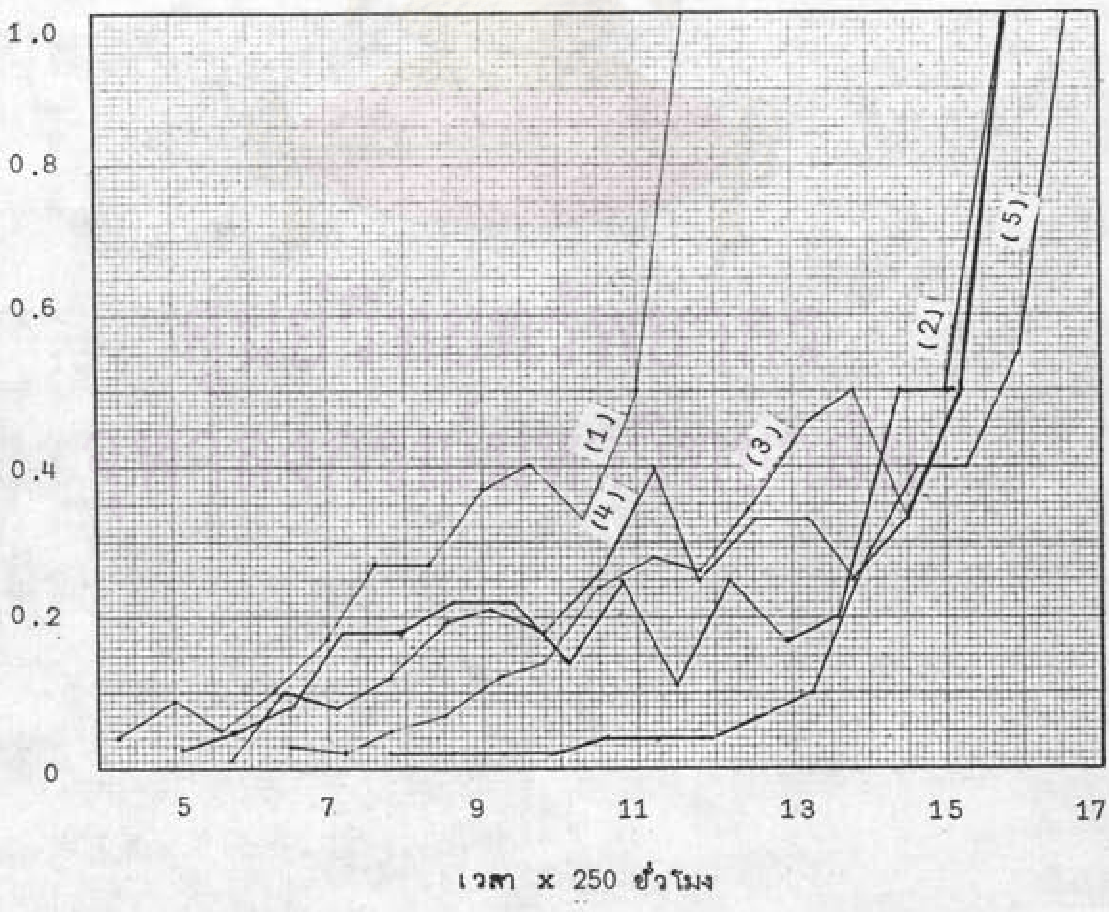
| t | L(t) | R(t) | F(t) | Δ | f(t) | r(t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 52 | 1.00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1980 | 52 | 1.00 | 0 | 1 | 0.019 | 0.00012 |
| 2147 | 51 | 0.98 | 0.02 | 1 | 0.019 | 0.00012 |
| 2314 | 50 | 0.96 | 0.04 | 1 | 0.019 | 0.00012 |
| 2481 | 49 | 0.94 | 0.06 | 1 | 0.019 | 0.00012 |
| 2648 | 48 | 0.92 | 0.08 | 2 | 0.038 | 0.00025 |
| 2815 | 46 | 0.88 | 0.12 | 2 | 0.038 | 0.00026 |
| 2982 | 44 | 0.85 | 0.15 | 2 | 0.038 | 0.00027 |
| 3150 | 42 | 0.81 | 0.19 | 3 | 0.058 | 0.00043 |
| 3317 | 39 | 0.75 | 0.25 | 4 | 0.077 | 0.00061 |
| 3484 | 35 | 0.67 | 0.33 | 10 | 0.192 | 0.00171 |
| 3651 | 25 | 0.48 | 0.42 | 10 | 0.192 | 0.00239 |
| 3818 | 15 | 0.29 | 0.71 | 6 | 0.115 | 0.00239 |
| 3985 | 9 | 0.17 | 0.83 | 5 | 0.096 | 0.00332 |
| 4152 | 4 | 0.07 | 0.93 | 4 | 0.077 | 0.00598 |
| 4320 | 0 | 0 | 1.00 | 0 | - | - |

MTTF = 3561.923 ชั่วโมง

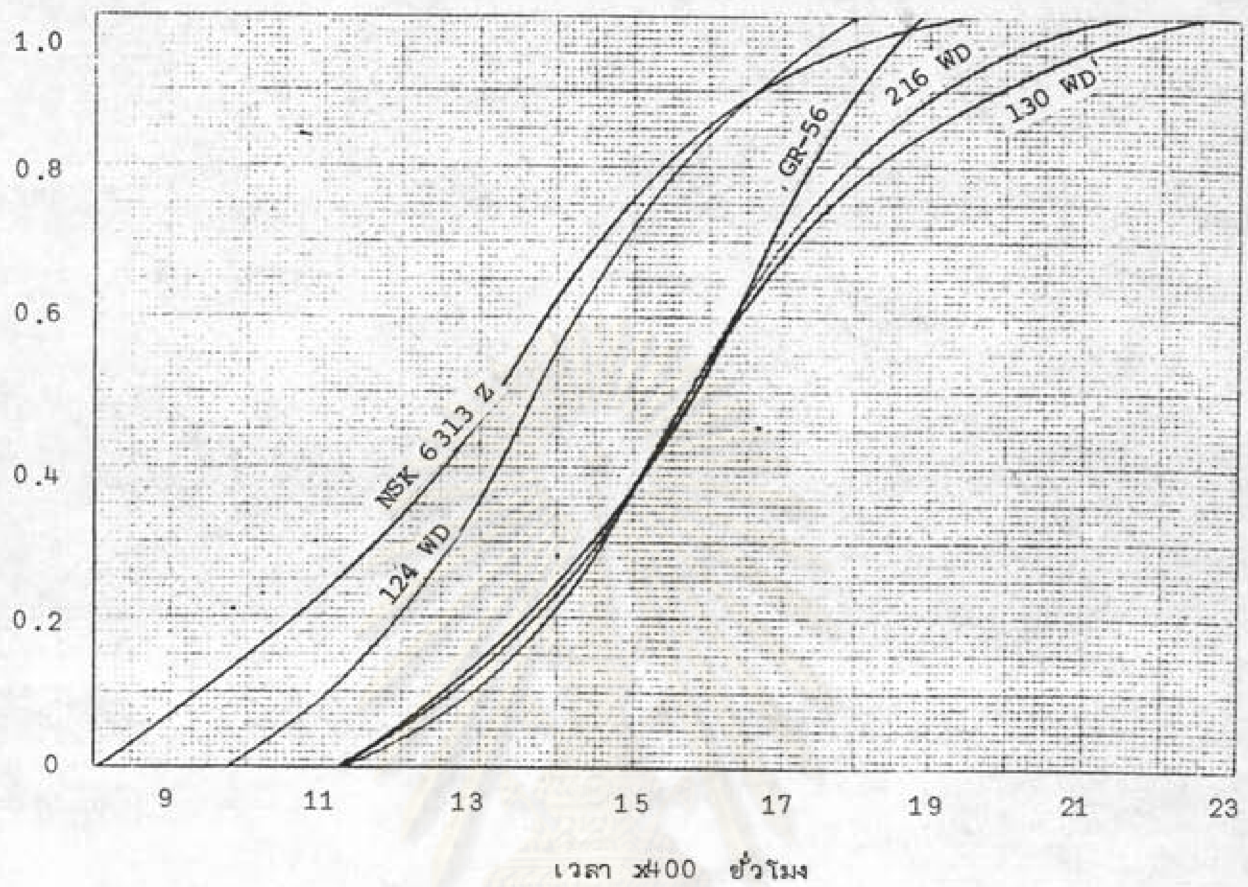
รูปที่ 3.2 กราฟฟังก์ชันเวลาก่อนการขัดข้องที่ได้จากข้อมูลของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1-5



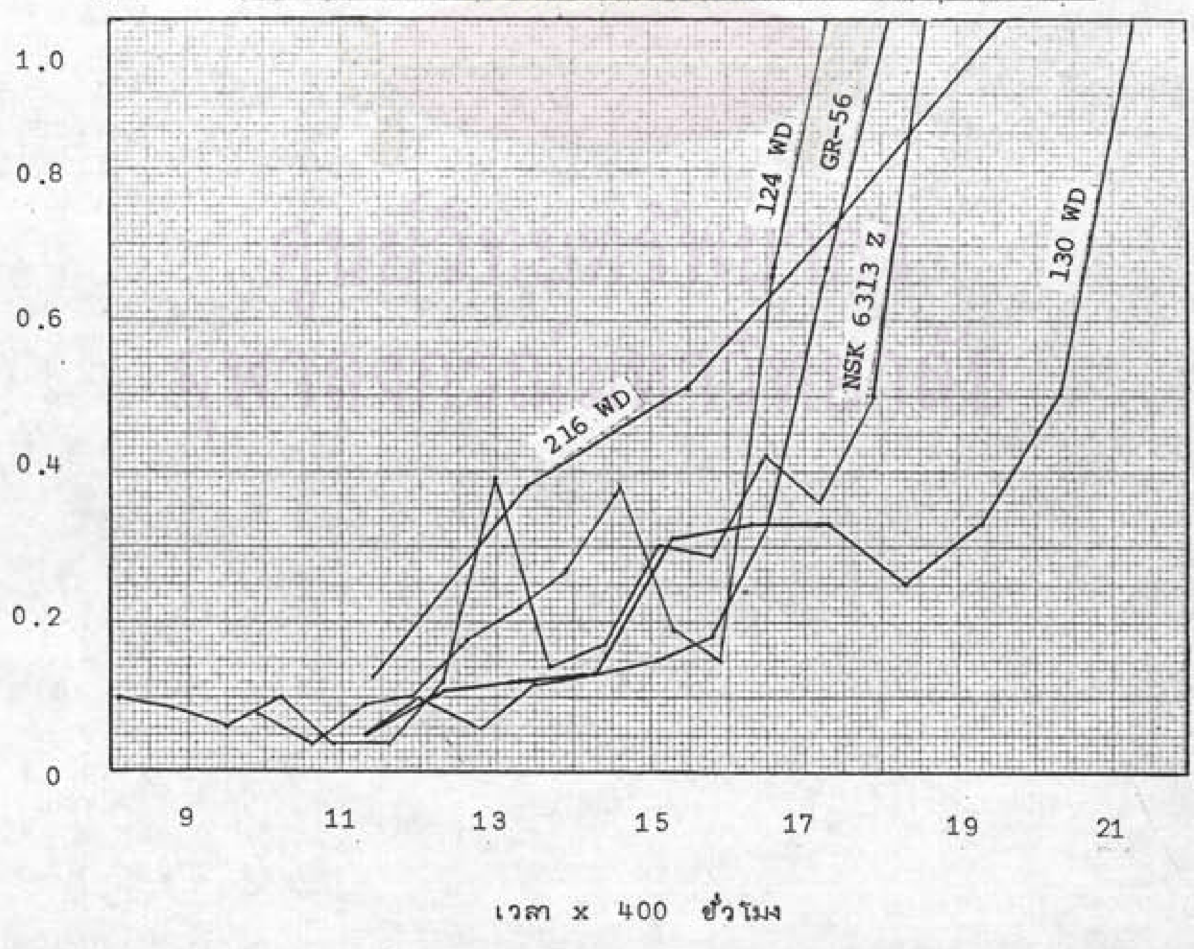

รูปที่ 3.3 กราฟอัตราการขัดข้องที่ได้จากข้อมูลของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1-5



รูปที่ 3.4 กราฟฟังก์ชั่นเวลาก่อนขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานรายการที่ 1-5




รูปที่ 3.5 กราฟอัตราการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานรายการที่ 1-5



จากรูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงโค้งการกระจายของ F(t) และ r(t) ที่ได้จากข้อมูลการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 1 - 5 F(t) หรือฟังก์ชั่นการขัดข้อง เป็นค่าการกระจายแบบสะสม (Cumulative distribution function) มีลักษณะรูปแบบการกระจายใกล้เคียงกับการกระจายปกติ, ล้อกนอร์มัล และเวบูล ซึ่งมีความแตกต่างไปจากการกระจายเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล ดังรูปในตารางที่ 9 ของภาคผนวก ก. และรูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงโค้งการกระจาย F(t) และ r(t) ที่ได้จากข้อมูลการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานทั้ง 5 รายการ มีฟังก์ชั่นการขัดข้องและรูปแบบอัตราการขัดข้องใกล้เคียงกับการกระจายปกติ, ล้อกนอร์มัล และเวบูล

3.3 <u>การแจกแจงการขัดข้องที่ได้จากการแจกแจงสถิติ</u>

ในการศึกษาถึงการแจกแจงการขัดข้องโดยทั่ว ๆ ไป การแจกแจงสถิติที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ การแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล, ปัวซอง, ปกติ, ล้อกนอร์มัล, เวบูล และแกมม่า ซึ่งการแจกแจงเหล่านี้ต่างก็มีรูปแบบและความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานแตกต่างกันไป ในการวิจัยนี้ ครั้งแรกได้นำการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยลมาทดลองใช้ในการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุด แต่พบว่าการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยลไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุด หลังจากได้ทำการทดลองการแจกแจงของข้อมูล (Empirical distribution) แล้วพบว่า มีรูปแบบฟังก์ชั่นการขัดข้อง และรูปแบบอัตราการขัดข้องใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ การแจกแจงล้อกนอร์มัล และการแจกแจงเวบูลจึงได้ทำการศึกษาการแจกแจงดังกล่าวเพิ่มเติม ซึ่งพอเพียงที่จะนำมาใช้สำหรับการแจกแจงการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุดที่สามารถซ่อมแซมได้ แต่อย่างไรก็ตาม การแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยลก็ยังมีประโยชน์ในกรณีของระบบที่สามารถทำการซ่อมแซมได้ที่มีข้อมูลน้อยมากจนไม่สามารถทราบรูปแบบการกระจายได้ การแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยลจึงถูกนำมาใช้ในการแจกแจงการขัดข้อง โดยสมมุติฐานให้มีอัตราการขัดข้องคงที่ไม่แตกต่างไปจากอัตราการขัดข้องของข้อมูลที่มีอยู่

สำหรับการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน ได้ใช้การแจกแจงเวบูลอย่างเดียวก็พอเพียง Maze ได้อธิบายเกี่ยวกับการแจกแจงเวบูลที่ใช้เป็นการแจกแจงการขัดข้องว่าเป็นการแจกแจงที่นิยมใช้ทดสอบ อายุการทำงาน (life- testing) ของอุปกรณ์เครื่องจักรกลและอุปกรณ์อิเล็คโทรนิค มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ต่อต้านแรงเสียดทาน (Antifriction - Bearing) และการแจกแจงเวบูลสามารถปรับสภาพ (flexibility) รูปร่างของมันเอง โดยที่การแจกแจงสถิติอื่นไม่สามารถทำได้

การแจกแจงการขัดข้องจะให้รายละเอียดของข้อมูลทั้งหมดเกี่ยวกับเวลาที่จะชำรุด โดยมีฟังก์ชั่นความไว้วางใจหรือความเชื่อถือได้ (Reliability function) เป็นตัววัดความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ จากค่าจำกัดความความเชื่อถือได้หรือ R(t) ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2 R(t) ขึ้นอยู่กับเวลาและตรงกันข้ามกับฟังก์ชั่นการขัดข้องหรือ F(t) เสมอ ถ้ากำหนดให้ f(t) เป็นฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ของเวลาการขัดข้อง ซึ่งก็คือ ความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์จะเกิดขัดข้องในช่วงเวลา t+dt ดังนั้น F(t) จึงเป็นความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์จะเกิดขัดข้องในช่วงเวลา 0-t กำหนดได้ดังนี้

$$F(t) = \int_0^t f(t)\, dt$$

และ

$$R(t) = 1-F(t)$$

ความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์จะเกิดขัดข้องในช่วงเวลาจาก t ถึง t+dt คือ F(t+dt) - F(t) และความน่าจะเป็นที่มีเงื่อนไข (Conditional probability) ของการขัดข้องในช่วงเวลานี้ ถ้ากำหนดให้เป็นเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ที่ยังใช้งานได้ (Survive) มาจนถึงเวลา t จะเท่ากับ (F(t+dt) - F(t))/R(t) ถ้าทำการหารด้วย dt จะได้อัตราการขัดข้องเฉลี่ยในช่วงเวลาระหว่าง t ถึง t+dt หรือ

$$\frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

ทำการลิมิต dt เข้าสู่ 0 จะได้อัตราการขัดข้องที่เวลาหนึ่ง (Instantaneous failure rate) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า อัตราการขัดข้องต่อหน่วยเวลา (Failure rate)

$$r(t) = \frac{F'(t)}{R(t)}$$

เมื่อ $F'(t)$ เป็นอนุพันธ์ (derivative) ของ $F(t)$ ที่เวลา $t$

ดังนั้น $$r(t) = \frac{f(f)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

เวลาเฉลี่ยการขัดข้อง (MTTF) $= \int_0^{\infty} t\, f(t)\, dt$

เมื่อ $f(t)\, dt$ เป็นความน่าจะเป็นของเวลาก่อนการขัดข้อง (TTF) ที่เวลา $t$

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ การขัดข้องเหล่านี้กับการแจกแจงสถิติ, $f(t)$ จึงเป็นค่าฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นหรือ P.df. และ $F(t)$ เป็นฟังก์ชั่นการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม หรือ c.d.f. ของการแจกแจงสถิติ มีสูตรสำหรับใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์การขัดข้องจากการแจกแจงสถิติที่นำมาประยุกต์ ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก.

ในหัวข้อนี้จะแสดงรายละเอียดในการคำนวณพารามิเตอร์การขัดข้องจากการแจกแจงเวบูล โดยใช้ข้อมูลเวลาขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุตกลุ่มที่ 1 เพื่อเป็นตัวอย่างหนึ่ง

ขั้นที่ 1 ทำการหาพารามิเตอร์สถิติเวบูลจากข้อมูลเวลาขัดข้องทั้งหมด จำนวน 24 ข้อมูล (จากตารางที่ 2.11) พารามิเตอร์เวบูลประกอบด้วย

$\beta$ = เชฟพารามิเตอร์ (Shape parameter ar weibull slope)

$\sigma$ = สเกลพารามิเตอร์(Scale parameter or characteristic life)

$\gamma$ = โลเกชั่นพารามิเตอร์ (Location parameter)

การขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุดสามารถเกิดขึ้นได้ทุกเวลา ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นใช้งาน โลเคชั่นพารามิเตอร์เป็นเวลาที่เครื่องจักรกลรถขุดไม่มีโอกาสเกิดขัดข้องในช่วงเวลาเริ่มต้นจึงเท่ากับศูนย์

พิจารณาฟังก์ชั่นการแจกแจงสะสมของเวลา , $F(t) = 1-e^{-(t/\sigma)^{\beta}}$ ถ้าจัดให้อยู่ในรูปล็อกปกติ (Natural logarithm) 2 ครั้ง จะได้

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

หรืออยู่ในรูปมาตรฐาน $\ln t = \frac{1}{\beta} \ln\left[\ln \frac{1}{1-F(t)}\right] + \ln\sigma$

$$X = (1/\beta)\ Y+A$$

ทำการพล๊อตเส้นตรงที่ตั้งฉาก (x,y) บนกระดาษกร๊าฟเวบูล (Weibull paper) เส้นตรงจาก $X = \ln t$ และ $Y = \ln\ \ln (1/(1 - F(t))$ ด้วยค่า $F(t)$ ที่ได้จากการแจกแจงข้อมูลในตารางที่ 3.8 แล้วทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เวบูล $\beta$ ซึ่งเป็นความชันของเส้นตัด และ x - intercept จึงจะหาค่าพารามิเตอร์เวบูล $\sigma$ ได้ โดย

$$\sigma = \exp\left[\frac{-x \ln t}{\beta}\right]$$

กระดาษกร๊าฟเวบูลมีชื่อเรียกทางการค้าว่า เวบูลเปเปอร์ (Weibull paper) มีลักษณะคล้ายกับกระดาษกร๊าฟล๊อก-ล๊อกทั่วไป (Log-log paper) และมีสเกลเวบูลกำกับอยู่

ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เวบูล $\beta$ และ $\sigma$ ด้วยวิธีการโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากหลักการเดียวกับการพล๊อตบนกระดาษกร๊าฟเวบูล และกำหนดให้

T(I) = เวลาชั่วโมงของแต่ละชั้นที่แจกแจง

F(I) = ค่าแจกแจงความถี่ การขัดข้องสะสมจากข้อมูล

N = จำนวนชั้นที่ทำการแจกแจง

ทั้ง 3 ค่าได้มาจากตารางที่ 3.8

ทำการหาค่า Y(I) จาก Y = log log 1/(1-F(t)) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least - square fitting) เพื่อหาความชันของเส้นข้อมูล

เมื่อ β เป็นความชัน (slope) สูตรการหาความชันโดยทั่ว ๆ ไป แสดงได้ดังนี้

$$\text{Slope} = \frac{N\sum_{I=1}^{N} YITI - (\sum_{I=1}^{N} TI)(\sum_{I=1}^{N} YI)}{N\sum_{I=1}^{N} TI^2 - (\sum_{I=1}^{N} TI)^2}$$

จัดทำเป็นตารางคำนวณเพื่อหาความชันตามตารางที่ 3.13 จากตารางคำนวณค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรได้จากค่าสังเกตุดังนี้

$$YITI = YITI + Y(I) . \log (T(I+1))$$

$$YI = YI + Y(I)$$

$$TI = TI + \log(T(I+1))$$

$TI^2$ หรือ $TI2 = TI2 + (\log(T(I+1)))^2$

ค่าส่วนบน (Upper) จึงเท่ากับ (N.YITI) - (YI.TI)

ค่าส่วนล่าง (Lower) เท่ากับ $(N.TI2) - (TI)^2$

ดังนั้น ความชันหรือ $\beta = \dfrac{(N.YITI) - (YI\ TI)}{(N.TI2) - (TI)^2}$

ที่ T = 1 ค่า F(1) = 0.0417

$Y(I) = \log \log (1/(1-0.0417)) = -3.16$

$YITI = 0 + (-3.16) .\log (1245) = -22.5$

$YI = 0 + (-3.16) = 3.16$

$TI = 0 + \log (1245) = 7.13$

$TI2 = 0 + (\log (1245))^2 = 50.79$

ที่ I = 2 ค่า F(2) = 0.125

$Y(I) = \log \log (1/(1-0.125)) = - 2.01$

$YITI = (-22.5) + (-2.01. \log (1410)) = - 37.09$

$YI = (-3.16) + (-2.01) = - 5.17$

$TI = 7.13 = \log (1410) = 14.38$

$TI2 = 50.79 + (\log (1410))^2 = 103.37$

ตารางที่ 3.13 การหาความชันด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least - square fitting)

| I | T (I) | F (I) | Y (I) | YITI | YI | TI | TI2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1080 | 0.042 | -3.16 | -22.49 | -3.16 | 7.13 | 50.79 |
| 2 | 1245 | 0.125 | -2.01 | -37.09 | -5.17 | 14.38 | 103.37 |
| 3 | 1410 | 0.167 | -1.70 | -49.62 | -6.87 | 21.74 | 157.57 |
| 4 | 1575 | 0.250 | -1.25 | -58.91 | -8.12 | 29.20 | 213.25 |
| 5 | 1740 | 0.375 | -0.75 | -64.62 | -8.87 | 36.75 | 270.29 |
| 6 | 1905 | 0.542 | -0.25 | -66.51 | -8.62 | 44.39 | 328.58 |
| 7 | 2070 | 0.667 | 0.09 | -65.79 | -8.53 | 52.10 | 388.06 |
| 8 | 2235 | 0.792 | 0.45 | -62.28 | -8.08 | 59.88 | 448.64 |
| 9 | 2400 | 0.875 | 0.73 | -56.54 | -7.35 | 67.73 | 510.26 |
| 10 | 2565 | 0.916 | 0.91 | -49.33 | -6.44 | 75.65 | 576.86 |
| 11 | 2730 | 0.958 | 1.16 | -40.12 | -5.28 | 83.62 | 636.39 |
| 12 | 2895 | 0.9999 | 2.22 | -18.37 | -3.07 | 91.64 | 700.81 |

ทำการคำนวณจนหมดขั้นเวลา (I) ที่ 12 ด้วยวิธีการดังกล่าว

ค่าความชันหรือ $\beta = \dfrac{(12\text{x}(-18.366)) - (-3.07\text{x}91.6431)}{(12\text{x}700.81) - (91.6431)^2}$

$$= \frac{60.97}{11.26} = 5.415$$

และค่า $\sigma = \text{Exp}\left[\dfrac{(5.415\text{x}91.6431) - (-3.07)}{12\text{x}5.415}\right]$

$$= \text{Exp}\left[7.6842\right] = 2173.73$$

ขั้นที่ 2 เป็นการแจกแจงการขัดข้องด้วยการแจกแจงเวบูลที่มีพารามิเตอร์ $\beta$ = 5.42 และ $\sigma$ = 2173 ชั่วโมง มีสูตรสำหรับคำนวณพารามิเตอร์การขัดข้อง ดังนี้

$$\text{P.d.f. หรือ } f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\sigma^{\beta}} \exp\left[-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\beta}\right]$$

$$\text{C.d.f. หรือ } F(t) = 1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\beta}\right]$$

$$r(t) = \frac{\beta\,(t)^{\beta-1}}{\sigma^{\beta}}$$

$$\text{และ MTTF} = \sigma\,\Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$$

t เป็นเวลา (ชั่วโมง) การทำงานของเครื่องจักรกลรถยุด ที่ t = 1,000 ชั่วโมง จะมีพารามิเตอร์การขัดข้อง (Failure parameters) ดังนี้

$$f(1000) = \frac{(5.42)\ (1000)^{5.42-1}}{2174^{5.42}} \exp\left[-\left(\frac{1000}{2174}\right)^{5.42}\right]$$

$$= 0.00008$$

เป็นค่าความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรกลรถยุดจะเกิดการขัดข้องที่เวลา 1,000 ชั่วโมง แต่ในวิธีการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดค่า f (t) เป็นความน่าจะเป็นสะสมที่เครื่องจักรกลรถยุดจะเกิดการขัดข้องในช่วงเวลา 950-1000 ชั่วโมง คือมีค่า dt เท่ากับ 50 ชั่วโมง และสำหรับการแจกแจงการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานได้กำหนด dt ไว้เท่ากับ 100 ชั่วโมง

ดังนั้น f (t-dt,t) ของเครื่องจักรกลรถยุดเท่ากับ

$$\int_{t-dt}^{t} \frac{\beta t^{\beta-1}}{\sigma^{\beta}} \exp\left[-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\beta}\right] dt$$

$$f\ (950,1000) = \int_{950}^{2000} \frac{(5.42)\ t^{5.42-1}}{2174^{5.42}} \exp\left[-\left(\frac{t}{2174}\right)^{5.42}\right]$$

$$= 0.0044$$

$$F\ (1000) = 1\text{-}\exp\left[-\left(\frac{1000}{2174}\right)^{5.42}\right]$$

$$= 0.0148$$

$$R\ (1000) = 1 - 0.0148$$

$$= 0.9852$$

$$r\ (1000) = \frac{5.42\ (1000)^{5.42-1}}{2174^{5.42}}$$

$$= 0.00008$$

และ

$$MTTF = 2174\,\Gamma\left(\frac{1+5.42}{5.42}\right)$$

$$= 2005 \text{ ชั่วโมง}$$

MTTF เป็นค่าเวลาเฉลี่ยก่อนการขัดข้องทั้งหมด เป็นค่าคงที่ แต่ค่า f (t), F (t), R (t) และ r (t) จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของฟังก์ชั่นเวบุล การหาผลลัพธ์ของพารามิเตอร์การขัดข้องที่เปลี่ยนแปลง จึงขึ้นอยู่กับเวลา ในภาคผนวก ค. แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล, ปกติ, ล็อกนอร์มัลและเวบุล โดยกำหนดเวลาสูงสุดในการคำนวณไว้ 5,000 และ 10,000 ชั่วโมง สำหรับเครื่องจักรกลรถขุดและตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน ตามลำดับ นำผลลัพธ์ที่ได้มาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.6 - 3.11

สำหรับการแจกแจงการขัดข้องที่ได้จากการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล, ปกติและล็อกนอร์มัล จะไม่ขอกล่าวรายละเอียดในหัวข้อนี้ เนื่องจากมีขั้นตอนตามที่กล่าวมาและได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก.

รูปที่ 3.6 - 3.10 แสดงโค้งการกระจายการขัดข้อง F (t) ของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 1-5 จากการแจกแจงของข้อมูล (DAT) เปรียบเทียบกับที่ได้จากการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล (Exp), ปกติ (NOR), ล็อกนอร์มัล (LOG) และเวบูล (WEI) จะพบว่าผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ได้จาก NOR, LOG และ WEI มีลักษณะการกระจายการขัดข้องใกล้เคียงกับข้อมูลจริง เว้นแต่รูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลกลุ่มที่ 4 โค้งของ WEI แตกต่างไปจากโค้งของ DAT จนเห็นได้ชัด ที่ช่วงเวลา 2300 - 3250 ชั่วโมง

ในการกำหนดแผนการบำรุงรักษา โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุดในระหว่างเวลาปฏิบัติงาน จึงใช้วิธีการบำรุงรักษาเพื่อการป้องกัน (Preventive Maintenance) ก่อนที่เครื่องจักรกลรถยุดจะขัดข้อง การกำหนดเวลาทำการบำรุงรักษาจึงต้องกำหนดเวลาขึ้นก่อนเวลาเฉลี่ยก่อนการขัดข้อง (MTTF) ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์การขัดข้องที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา f (t), F (t), R (t) และ r (t) ที่จะนำมาใช้ศึกษาในการวางแผนดังกล่าว จึงอยู่ที่ช่วงเวลาเริ่มต้นใช้งานจนถึงที่เวลาเฉลี่ยการขัดข้อง จากรูปที่ 3.6 - 3.10 ที่ช่วงเวลา 0 – MTTF เส้นโค้งการกระจายปกติมีความเหมาะสม (Fitting) กับเส้นโค้งการกระจายของข้อมูลได้ดีที่สุด และในตารางที่ 3.14 แสดงเวลา MTTF ที่ได้จากการแจกแจงสถิติต่าง ๆ

ตารางที่ 3.4 MTTF ของเครื่องจักรกลรถขุดที่ได้จากการแจกแจงสถิติ

| เครื่องจักรกลฯ | การแจกแจงปกติ | การแจกแจงล็อกนอร์มัล | การแจกแจงเวบูล |
|---|---|---|---|
| กลุ่มที่ 1 | 2042.50 | 2048.96 | 2004.94 |
| กลุ่มที่ 2 | 2350.50 | 2351.06 | 2478.26 |
| กลุ่มที่ 3 | 2790.00 | 2792.30 | 2808.26 |
| กลุ่มที่ 4 | 2452.50 | 2453.10 | 2548.12 |
| กลุ่มที่ 5 | 3561.92 | 3567.04 | 3440.10 |

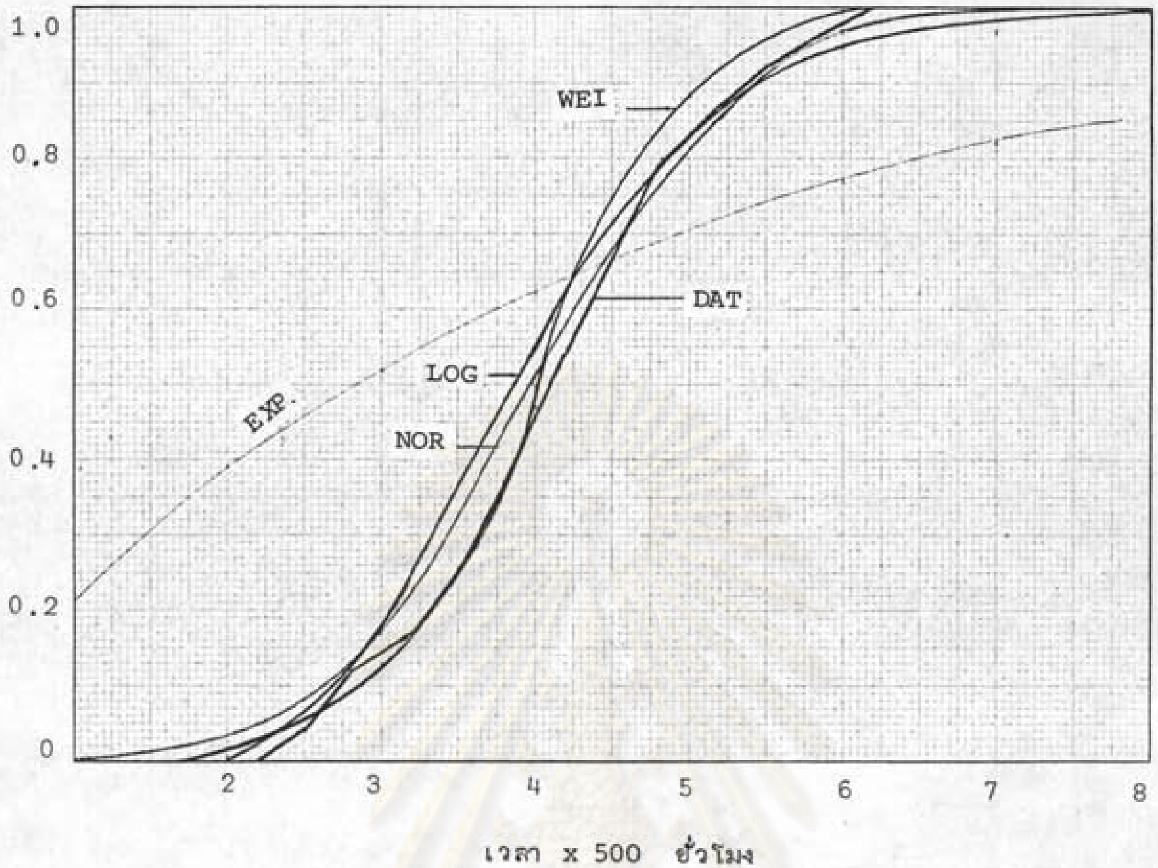
หน่วยเวลา : ชั่วโมง

รูปที่ 3.11 แสดงโค้งการกระจายการขัดข้อง F (t) จากข้อมูลตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานจำนวน 5 รายการ เปรียบเทียบกับที่ได้จากการแจกแจงเวบูล และแสดงให้เห็นว่าการกระจายเวบูลใกล้เคียงกับการกระจายของข้อมูลทุกรายการ และในตารางที่ 3-15 แสดงเวลาเฉลี่ยการขัดข้อง หรืออายุการใช้งาน (Useful-life) ของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน

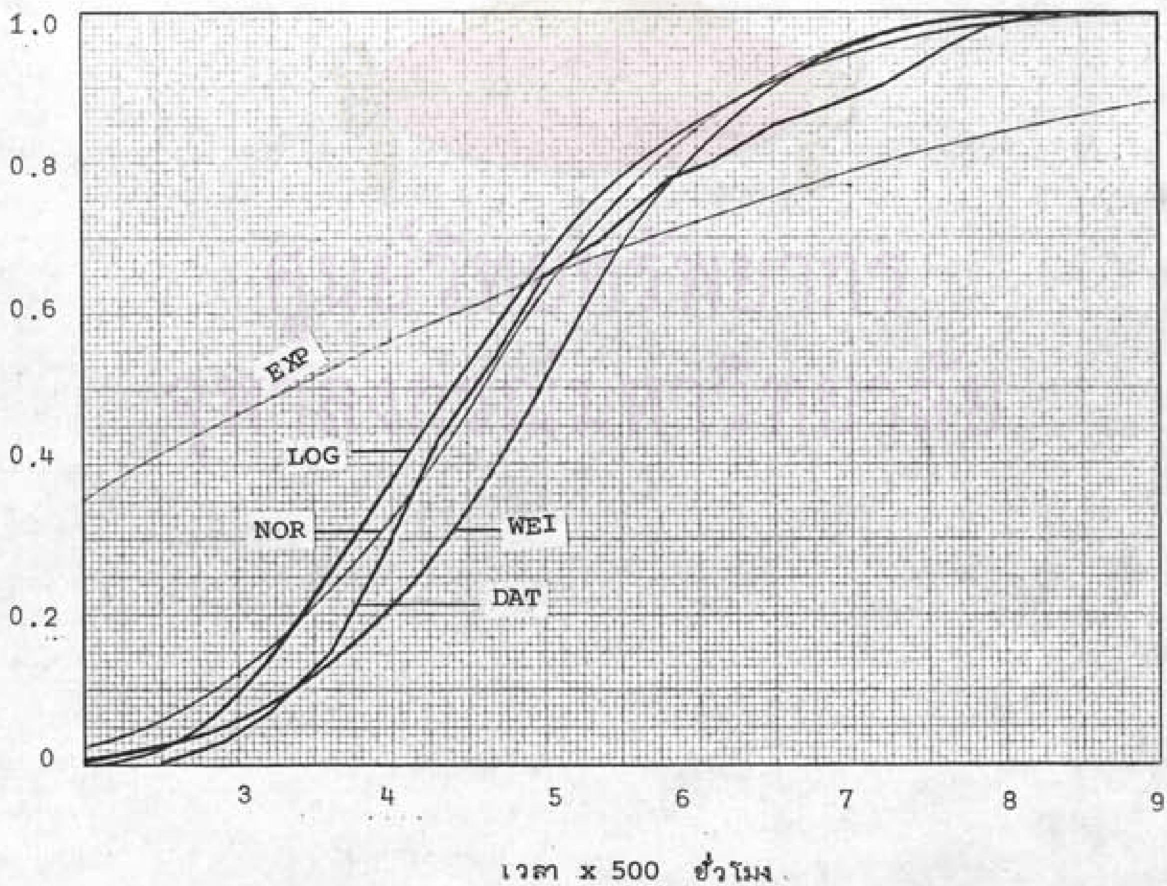
ตารางที่ 3.15 NTTF ของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานที่ได้จากการแจกแจงเวบูล

| หมายเลขอุปกรณ์ | 216 WD | GT-56 | 124 WD | 130 WD | NSK 6313 Z |
|---|---|---|---|---|---|
| MTTF (ชั่วโมง) | 6316.52 | 6119.13 | 5429.11 | 6506.55 | 5078.16 |

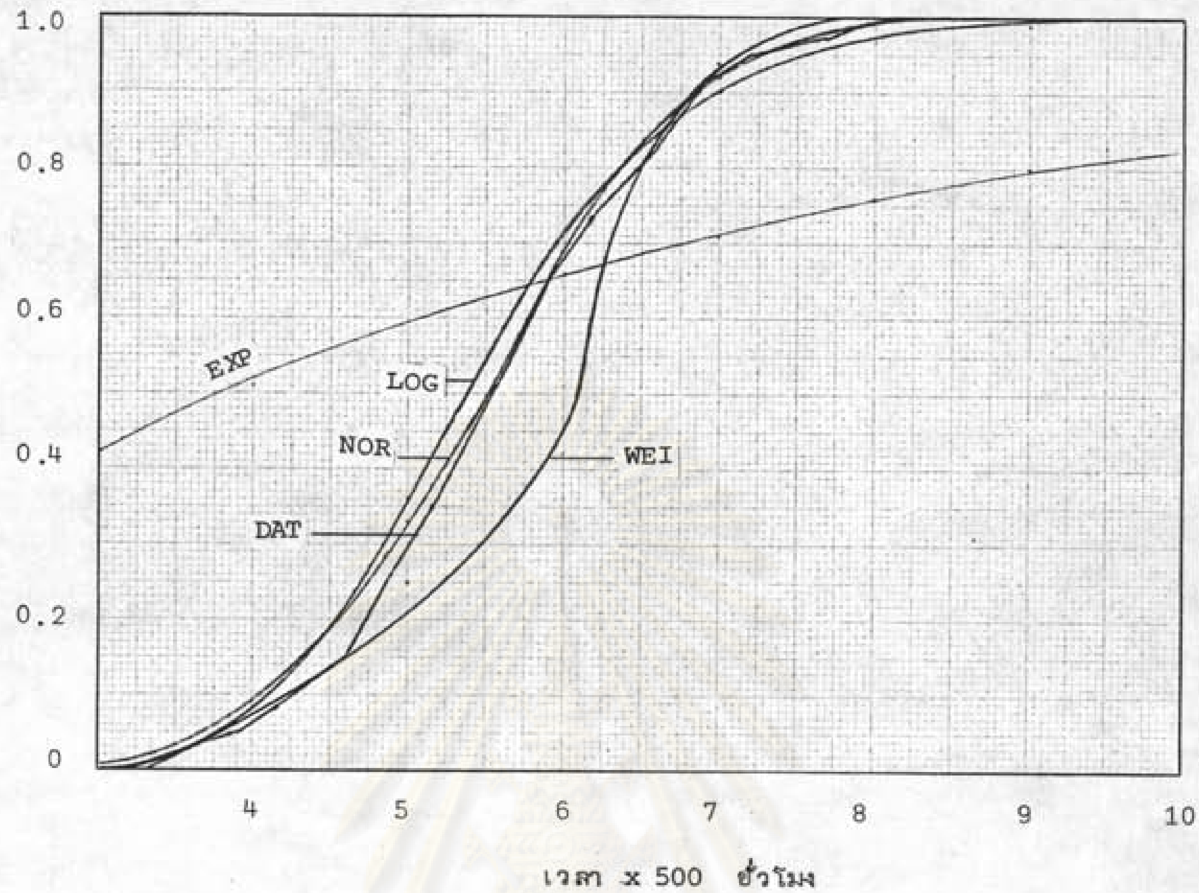
รูปที่ 3.6 แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 1



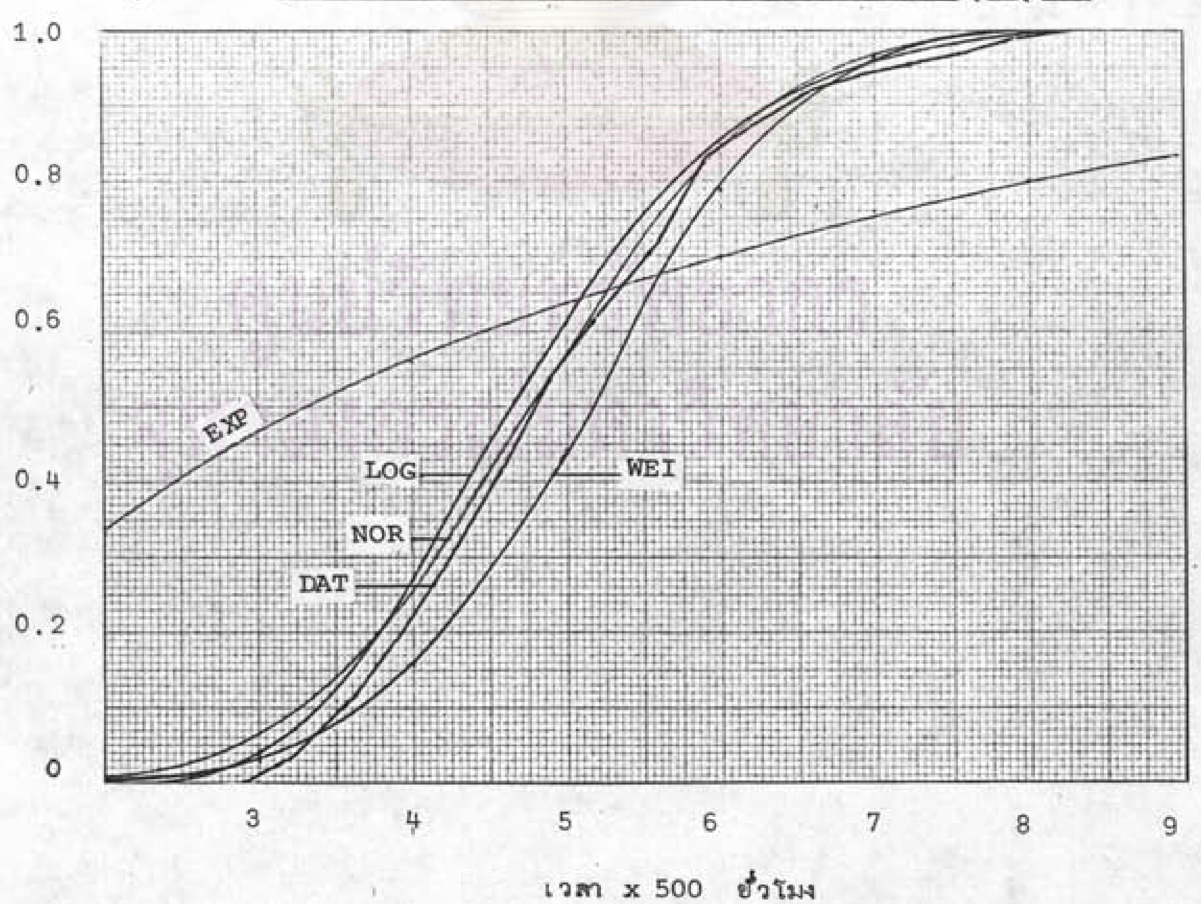

รูปที่ 3.7 แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 2



รูปที่ 3.8 แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 3

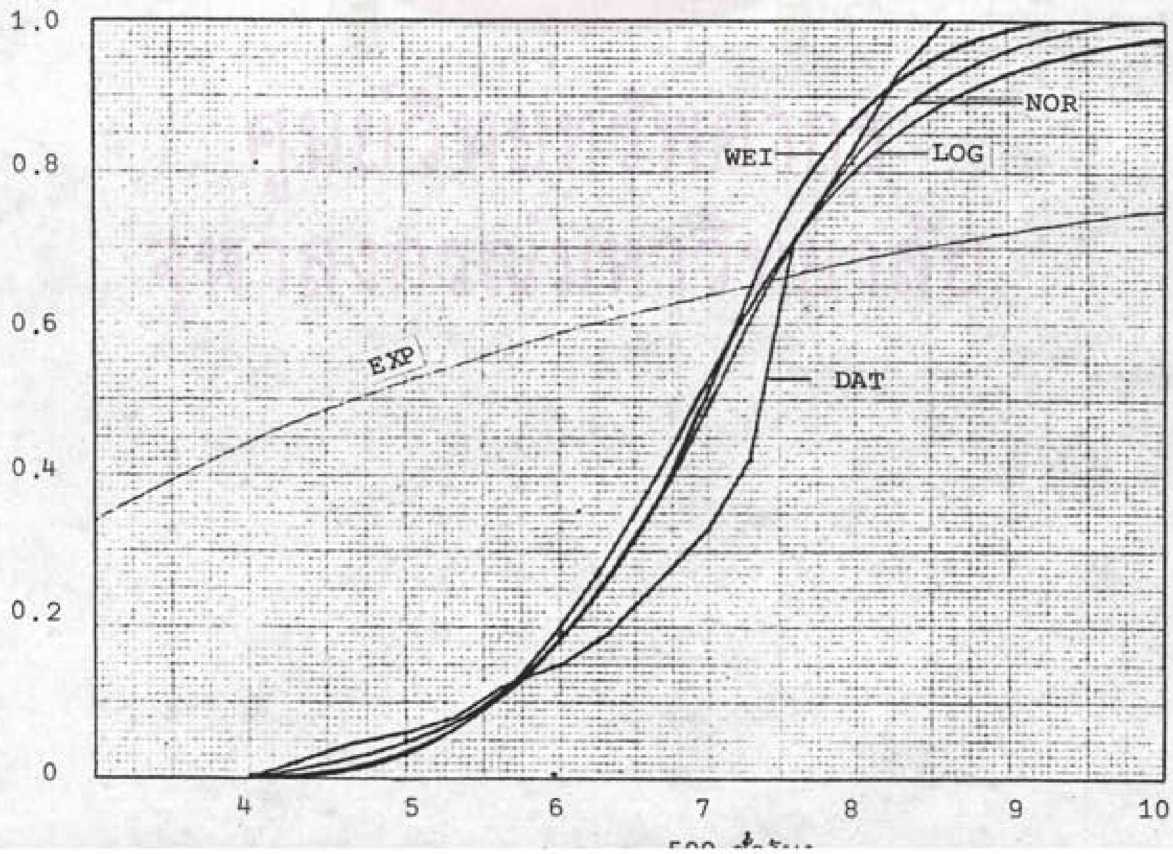


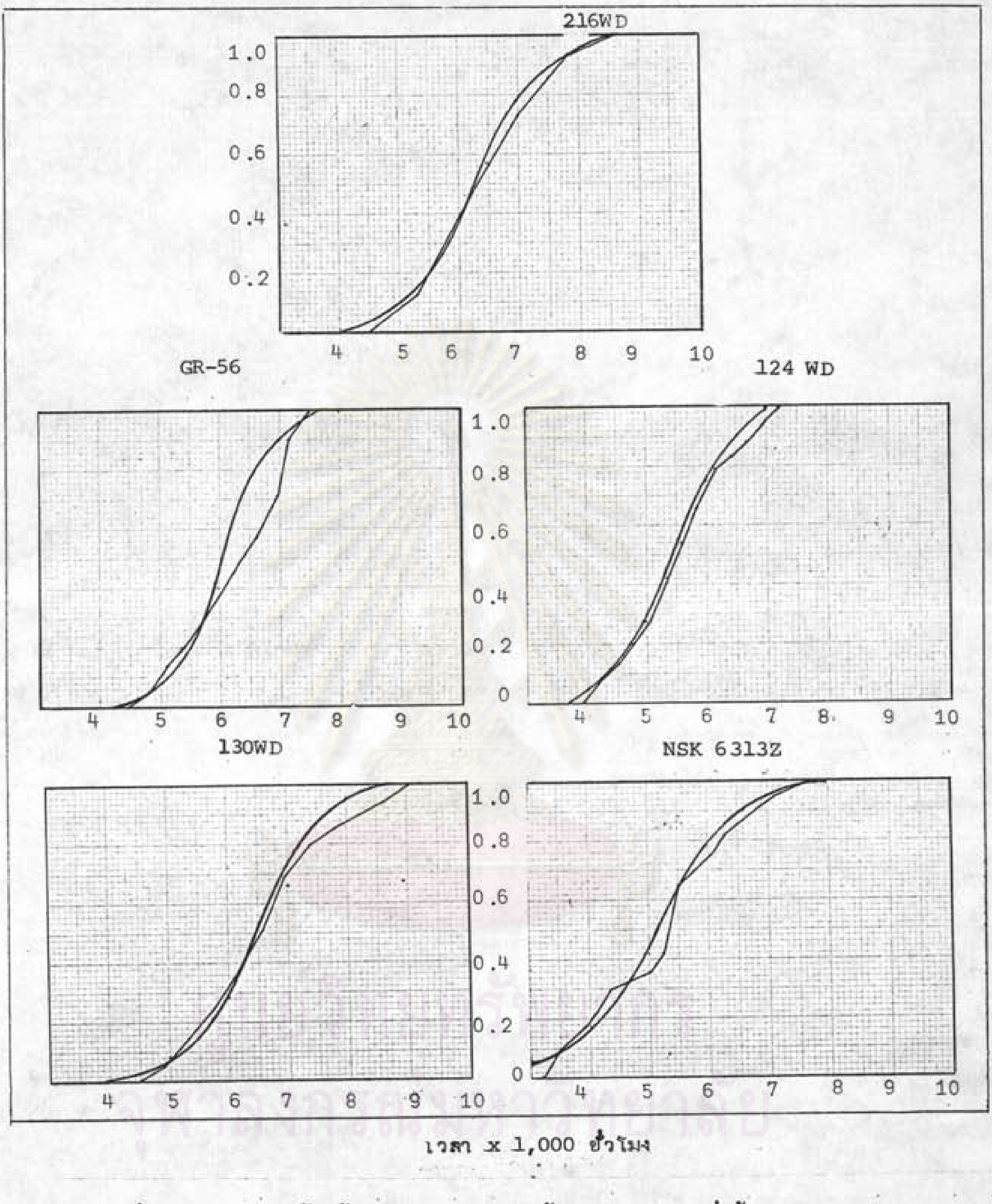

รูปที่ 3.9 แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถยุดกลุ่มที่ 4



สรุปได้ว่าการแจกแจงสถิติที่นำมาใช้ในการแจกแจงการขัดข้องของระบบที่มีการบำรุงรักษามีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดจะให้รูปแบบฟังก์ชั่นการแจกแจงแตกต่างกันไป ข้อมูลเวลาก่อนการขัดข้องของเครื่องกลรถขุดที่มีอยู่มากพอที่จะวัดการกระจายได้ และนำมาทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจงกับการแจกแจงเอ็กซ์โปเน็นเชี่ยล ปกติ ล็อกนอร์มัลและเวบูล ซึ่งจะได้นำการแจกแจงสถิตินี้มาใช้เป็นสมมุติฐาน แทนการแจกแจงที่ได้จากข้อมูล เนื่องจากว่า การแจกแจงสถิติจะให้ค่าพารามิเตอร์การขัดข้องได้สมบูรณ์กว่า ตามเวลาที่เราต้องการทราบ และไม่แตกต่างไปจากข้อมูลจริง ที่ให้รายละเอียดเพียงหยาบ ๆ มากนัก และจากการแจกแจงสถิติที่ยอมรับได้ทั้ง 3 ชนิดนี้ การแจกแจงปกติมีการกระจายใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุดในช่วงเวลาหนึ่งที่ต้องการนำมาใช้ศึกษา เพื่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลรถขุด และสำหรับการแจกแจงการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน ได้ทดลองใช้สมมุติฐานการแจกแจงเวบูลชนิดเดียว เนื่องจาก การแจกแจงเวบูล เป็นที่นิยมใช้หาอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่อต้านแรงเสียดทาน (Anti friction bearing life) มากกว่าการแจกแจงชนิดอื่น มีสูตรในการคำนวณไม่ยุ่งยากนัก และจากการทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจง ก็พบว่า มีความเหมาะสมกับการกระจายของข้อมูลเวลาการขัดข้อง ของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทานทุกรายการ

รูปที่ 3.10 <u>แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของเครื่องจักรกลรถขุดกลุ่มที่ 5</u>






รูปที่ 3.11 แสดงเส้นโค้งการกระจายการขัดข้องของตลับลูกปืนต่อต้านแรงเสียดทาน 5 รายการ