

## การวิเคราะห์และเพิ่มผลผลิตการบรรจุขวดโดยทฤษฎีซ่อมบำรุงรักษา

พิษณุ มนัสปิติ\*

มหาวิทยาลัยรังสิต อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเอาวิธี เทคนิค และทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์กับการซ่อมบำรุงกระบวนการบรรจุขวดในสายการผลิตเบียร์ โดยเมื่อนำเอาวิธี Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) มาตรวจสอบพบว่า ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ โอกาส ความรุนแรง และความชัดเจนจากการสังเกตอาการของความขัดข้องต่างก็มีค่าสูงเป็นผลให้ค่า Risk Priority Number (RPN) มีค่าสูง ซึ่งจำเป็นต้องมีการใส่ใจมากตามไปด้วย ค่าความชัดเจนจากการสังเกตอาการที่สูงมาจากความยากลำบากที่จะสังเกตอาการก่อนเกิดการขัดข้องทำให้การบำรุงรักษาตามอาการมีข้อจำกัด เมื่อนำเอาตัววัดได้แก่ Mean-Time-Between-Failure (MTBF) เข้ามาร่วมพิจารณาเพื่อวางแผนการซ่อมบำรุงตามระยะเวลาที่วางแผน ผู้ดูแลก็สามารถใช้ระยะเวลาที่คำนวณได้มาสกัดความขัดข้องก่อนที่จะเกิดได้ ในงานวิจัยนี้ ชิ้นส่วนวิกฤตคือ ลิ้มประกับวาล์วและสปริงริงเพลลา ตารางการบำรุงรักษากำหนดให้ทยอยเปลี่ยนชิ้นส่วนเหล่านี้ให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่คนงานจำเป็นต้องหยุดเป็นระยะๆ เพื่อทำความสะอาด หล่อลื่น หรือขจัดเศษวัสดุต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่เพิ่มภาระการหยุดการผลิต หลังจากที่ดำเนินการตามกรอบที่วางไว้เป็นเวลาสองเดือน เวลาการหยุดเนื่องจากการขัดข้องลดลงจาก 831 นาที เหลือ 235 นาที ซึ่งคิดเป็นผลผลิตที่เพิ่มขึ้นสุทธิ 3.9 ล้านบาท แนวทางการซ่อมบำรุงนี้สามารถนำไปใช้กับกระบวนการอื่นในสายการผลิตเมื่อกระบวนการนั้นกลายมาเป็นคอขวดได้

**คำสำคัญ :** การบำรุงรักษาตามอาการ / การบำรุงรักษาตามระยะเวลา / MTBF / FMEA / อัตราการขัดข้อง

\* Corresponding Author : pmanaspiti@yahoo.com

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

## Productivity Analysis and Improvement in Bottling Process through Maintenance Theories

Pissanu Manaspiti\*

Rangsit University, Muang District, Patumtani 12000

### Abstract

This project investigated, selected and implemented various maintenance tools and techniques to improve the uptime of a beer bottling line. Through the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) technique, the inspection revealed that all the factors, which are Probability of Occurring (P), Severity (S) and Detection (D), were at their higher levels, causing a very high RPN (Risk Priority Number). This indicated that much attention was needed to avoid hazards and damage. In the bottling process under study, the Detection factor was noted to be high because it was difficult, if not impossible, to define and detect certain signs, conditions or symptoms implying upcoming faults or abnormality. However, by incorporating the Mean-Time-Between-Failure (MTBF) measure into the analysis, the maintenance program was set up as to when and what parts should be repaired, adjusted, refitted or even replaced. Two key parts, namely, valve keys and shaft springs, were scheduled for piecemeal replacement using the time slots coincident with the periodic halts during which the workers regularly do their minor services such as lubricating, steam-cleaning or scrap removal. After two months of implementation, the downtime reduced from 831 to 235 minutes. After deducting all additional costs incurred from replacing springs and keys, an increase of 3.9 millions baht worth of line output was realized. This kind of maintenance conceptualization can be extended to other line stations should they then become a bottleneck.

**Keywords** : Condition-Based Maintenance (CBM) / Time-Based Maintenance (TBM) /  
Meantime Between Failure (MTBF) / Failure Mode and Effect /  
Analysis (FMEA) / Failure Rate

---

\* Corresponding Author : [pmanaspiti@yahoo.com](mailto:pmanaspiti@yahoo.com)

Lecturer, Department of Industrial Engineering, College of Engineering.

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตเบียร์เป็นการประกอบกิจการที่ต้องใช้เงินทุนสูง มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน ต้องอาศัยความแน่นอนของคุณภาพของวัตถุดิบต่างๆ ที่สำคัญต้องมีกำลังการผลิตที่สูงเพื่อที่จะสร้างผลกำไรได้เพียงพอต่อการลงทุนที่สูง นอกจากนั้นในตลาดทุนเสรีเช่นในประเทศไทยผู้ประกอบการมักต้องเผชิญกับสภาพการแข่งขันที่สูงการชิงหรือรักษาส่วนแบ่งการตลาด (Market Share) การรักษามลผลผลิตไว้ในระดับสูงมักจะเปิดช่องโหว่ที่ทำให้คุณภาพของผลผลิตตกต่ำลง ซึ่งก็จะย้อนมาบั่นทอนความสามารถในการแข่งขัน

ถ้าไม่นับขั้นตอนหลักในการบ่มหมักเบียร์แล้ว การบำรุงรักษาเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุเบียร์นับว่าเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยในการดำรงคุณภาพของการผลิต งานวิจัยนี้มุ่งเป้าไปที่แผนกบรรจุขวดของบริษัทผลิตเบียร์รายใหญ่รายหนึ่งในประเทศ ขอบกพร่องสำคัญที่มีผลต่อการผลิตคือการที่ขวดมีน้ำเบียร์มากหรือน้อยกว่าค่ามาตรฐาน (Short or Overfilled) นอกจากนั้นยังมีสาเหตุอื่นๆ ที่ทำให้เครื่องจักรหรือกระบวนการประสบกับการหยุดชะงัก สาเหตุต่างๆ นั้นส่วนมากมาจากการขัดข้อง (Breakdowns) ของชิ้นส่วนต่างๆ เครื่องจักร การหยุดชะงักมีผลต่ออัตราการผลิตอย่างมาก เฉพาะส่วนที่มีผู้วิจัยได้เข้าไปทำศึกษาพบว่า การชะงักงันต่างๆ มีผลทำให้เกิดการสูญเสียรายได้เฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 50 ล้านบาทต่อเดือน ดังนั้นความพยายามใดๆ ที่จะกำจัดหรือลดทอนการชะงักงันย่อมมีผลต่อการประกอบการอย่างมีนัยยะสำคัญ

หนทางเดียวที่จะลดหรือขจัดการขัดข้องดังกล่าวคือการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ที่มีประสิทธิภาพซึ่งจะสามารถลดเวลาที่จะต้องหยุดเครื่องจักรหรือกระบวนการเพื่อการแก้ไขซ่อมแซม (Corrective Maintenance)

## 2. ทฤษฎีการบำรุงรักษา

ทฤษฎี แนวความคิด หรือหลักการในงานซ่อมบำรุงมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับมุมมอง และวัตถุประสงค์ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยมากมายที่มุ่งความสนใจไปที่การใช้อาการและสภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์มาเป็นตัวกำหนดการซ่อมบำรุง (Condition-Based Maintenance, CBM) Ahmad และ Kamaruddin [1] ได้เปรียบเทียบวิธี CBM กับ Time-Based

Maintenance (TBM) ซึ่งเป็นการกำหนดการซ่อมบำรุงตามช่วงเวลา ดังเช่นที่ผู้ใช้รถยนต์เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง ตรวจสอบ และเปลี่ยนชิ้นส่วนตามชั่วโมงการใช้งานเขาสรุปว่า CBM เป็นวิธีที่ดีกว่าในทางปฏิบัติเพียงแต่ว่าผู้ปฏิบัติพึงต้องมีความละเอียดในการเก็บและเชื่อมโยงข้อมูลต่างๆ เพื่อที่จะได้แนวปฏิบัติที่ถูกต้อง Santweesuk และ Rukijkanpanich [7] ชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมในการนำเอา TBM มาใช้ในการวางกำหนดการซ่อมบำรุงในสายการผลิตสารแต่งสีพลาสติก (Masterbatch) โดยใช้การรวบรวมข้อมูลในอดีตและวิเคราะห์หา Mean Time Between Failures ร่วมกับกาวิเคราะห์หาต้นเหตุของการขัดข้องทั้งปวง Wang [11] ชี้ให้เห็นว่าการความละเอียดถี่ถ้วนในการกำหนดสภาพ (conditions) ใน CBM จะช่วยให้เกิดความประหยัดต้นทุนรวมได้ เขาได้นำวิธีการ Regression มาเพิ่มพูนความแม่นยำของการกำหนดสภาพ Sriphuek และ Chotigo [9] ได้ประยุกต์หลักการ CBM มาใช้กับการบำรุงรักษาฉนวน โดยพวกเขาได้เสนอการเฝ้าระวังแบบออนไลน์ของ condition ของฉนวนคือการดิสซาร์จบางส่วน เพื่อเพิ่มความฉับพลันการบำรุงรักษา และลดค่าใช้จ่ายรวม Kositgittiwong [6] เสนอหลักเกณฑ์ในการประเมิน condition ของเครื่องถ่ายสะพานทางหลวงที่สัมพันธ์กับการพังทลาย Dieulle [3] เพิ่มความละเอียดของการกำหนดสภาพโดยการนำเอา Gamma Distribution เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ด้วย Battini [2] ได้นำเอา CBM มาใช้ในอุตสาหกรรมการบรรจุขวด โดยผู้เขียนนำเอากระแสไฟฟ้าที่เครื่องบรรจุขวดกินเพิ่มขึ้นมาเป็นตัวบ่งชี้สภาพแทนสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนที่ตั้งขึ้นมาเพื่อชดเชยความเสื่อมสภาพ (Deterioration) ในวิจัยนั้นผู้เขียนอ้างว่ามีโอกาสที่จะเกิดต้นทุนรวมที่ต่ำลงแม้ว่าจะมีข้อแม้การใช้งานบ้างก็ตาม Thipparat [10] เสนอให้ใช้วิธี Fault Tree Analysis เพื่อสร้างความกระจ่างของปัจจัยความเสี่ยงต่างๆ ที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการสร้างบ้านพักอาศัย

สำหรับในงานศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การขจัดหรือลดเวลาที่เครื่องจักรขัดข้องและรอการแก้ไข (Downtimes) เป็นสำคัญ โดยการผสมผสาน CBM และแปลมาเป็น TBM ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสอดคล้องกับทฤษฎี ตัววัด หรือหลักการหลักที่เกี่ยวข้องได้แก่ Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Hazard Function, Fault Tree Analysis (FTA) และ Mean Time Between Failures (MTBF)

FMEA เป็นกรอบทางเทคนิคที่เข้ามาดูแลระบบการผลิตในภาพรวม เป็นแนวความคิดที่พัฒนากรอบการวิเคราะห์เพื่อเข้าไปจัดการบริหารปัญหาการขัดข้องในระบบการผลิตของกองทัพสหรัฐฯ [12, 13, 14, 15] ในปลายคริสต์ทศวรรษ 1950 ซึ่งนับจากนั้น FMEA ก็กลายเป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินการวิเคราะห์ System Reliability สิ่งที่ FMEA ทำก็คือแจกแจงอาการที่ขัดข้อง (Failure Modes) ทั้งหมดที่เกิดขึ้น และมองหาสาเหตุ (Causes) และผล (อันไม่พึงประสงค์หรือคาดหวัง) (Effects) แห่งอาการขัดข้องนั้นๆ แม้ว่าการวิเคราะห์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเชิงวิจิจฉัย (Qualitative) FMEA ก็มีกลไกหลักที่จะถ่ายโอนสิ่งที่ประสบพบเห็นต่างๆ ให้เป็นตัวเลขเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์ทางสถิติ มีผลเป็นรูปธรรมในการสรุปเพื่อนำพาการปฏิบัติต่อไป

FMEA ให้ความสำคัญที่ปัจจัยหลักสามปัจจัยอันได้แก่ ความถี่ที่การขัดข้องเกิดขึ้น (Probability of Occurring, P) ความรุนแรงของปัญหาที่ตามมา (เช่นการพังทลายของเครื่องจักรทั้งเครื่อง หรือการระเบิดสร้างความเสียหายแก่โรงงาน) ที่เกิดขึ้นจากการขัดข้อง (Severity, S) และ ความปรากฏชัดแจ้งของการบกพร่อง (Detection, D) มีการแบ่งระดับทั้งสามปัจจัยเป็นห้าถึงหกอันดับโดยระดับที่ต่ำสุดสะท้อนถึงสถานการณ์ที่มีความราบรื่นที่ระบบจะดำเนินได้โดยปกติมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่นระดับ 1 สำหรับปัจจัย “P” หมายถึงความถี่หรือโอกาสที่จะเกิดการขัดข้องมีน้อยที่สุด หรือ ระดับ 6 ซึ่งเป็นระดับสูงสุดของปัจจัย “D” แสดงถึงโอกาสที่มีน้อยมากที่จะสังเกตหรือรับรู้ความบกพร่อง ซึ่งจะทำให้โอกาสการเข้ามาแก้ไขก่อนที่จะเกิดความเสียหายมีน้อย ผู้วิเคราะห์ระบบจะต้องทำการประเมินเพื่อกำหนดระดับสำหรับปัจจัยทั้งสาม ผลคูณของปัจจัยทั้งสามเรียกว่า “Risk Priority Number, RPN” ยิ่ง RPN ยิ่งสูงระบบ ชิ้นส่วน หรือส่วนประกอบที่ถูกประเมินก็ยิ่งต้องได้รับการใส่ใจดูแลมาก เนื่องจากการเกิดการขัดข้องจะสร้างความเสียหายรุนแรงและแผ่ไปในวงกว้างมาก

เมื่อนำกรอบ FMEA มาใช้วิเคราะห์การขัดข้องของกระบวนการบรรจุขวดซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไปพบว่าค่า Severity ของการขัดข้องอยู่ในระดับสูง ในงานที่ศึกษาที่ค่าประเมินของ severity มีค่าไม่น้อยกว่าแปดจากคะแนนเต็มสิบ เนื่องจากการที่เครื่องบรรจุขวดไม่สามารถจะดำเนินการต่อไปได้และอาจเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์ส่วนอื่นๆ พอลอยได้รับความเสียหาย

ไปด้วยจากข้อมูลที่รวบรวมพบว่าการขัดข้องนี้มีความถี่สูงมาก ซึ่งทำให้ค่าประเมินในส่วน Probability มีค่าไม่ต่ำกว่าเก้าจากคะแนนเต็มสิบ ในขณะที่การที่เราแทบจะไม่มีโอกาสตรวจจับอาการก่อนขัดข้องค่า Detection, D ก็มีค่าสูงเกือบสิบคะแนนเช่นเดียวกันเนื่องจากโอกาสที่จะมีน้อยมาก ค่า RPN จึงอยู่ในระดับสูง ซึ่งควรได้รับความใส่ใจอย่างมาก นอกจากนั้นความสามารถในการตรวจจับอาการก่อนขัดข้องที่ต่ำ ทำให้การพึ่งพาการสังเกตอาการหรือ CBM เป็นไปได้ยาก และเป็นที่มาของการใช้ TBM ในงานนี้แทน

ในทางสถิตินิยามโอกาสที่จะเกิดการขัดข้องในช่วงเวลาใดๆ โดยระบบหรือชิ้นส่วนทำงานปกติก่อนหน้าช่วงที่ทำการสังเกตเหตุการณ์ การรวบรวมเป็นบทความของ Shahar [12] สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้เป็นอย่างดีเนื่องจากการให้พื้นฐานและการเชื่อมโยงในมุมมองของสถิติอย่างเป็นระบบ จาก Hazard function ที่เขียนได้เป็น

$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1)$$

เมื่อทำการตรวจสอบหน่วย (Dimensional Analysis) อย่างละเอียดแล้ว พบว่าHazard Functionมีหน่วย มิได้เป็นความน่าจะเป็นตามนิยามที่จะต้องปราศจากหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่งแต่เป็นอัตราการเกิดการขัดข้องต่อหน่วยเวลาFunction นี้มีประโยชน์ในทางปฏิบัติมากกว่า Probability Density Function (Pdf.) เพราะการสื่อความหมายถึงอัตราที่ระบบหรือชิ้นส่วนจะเกิดการขัดข้องต่อหน่วยเวลาในขณะใดๆ โดยที่ระบบหรือชิ้นส่วนนั้นๆ มีความสมบูรณ์ก่อนหน้ามาตลอด การอุบัติขึ้นของการขัดข้องมีธรรมชาติการกระจายแบบ Exponential ซึ่งHall [5]แสดงถึงพัฒนาการของการกระจายจาก Binomial ไปเป็น Poisson Distribution ที่รู้จักดีในนามของ “Poisson Process” และท้ายที่สุดเป็นที่มาของการ Exponential Distribution ที่เป็นการกระจายคู่ขนานของ Poisson แต่แทนที่เป็นการบ่งบอกถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดความขัดข้อง การกระจาย Exponential มี Random Variable แทนเวลาที่การขัดข้องครั้งต่อไปพึงจะเกิดขึ้น  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  เมื่อ  $z(t) = \lambda$  หรืออัตราการล้มเหลว (Failure Rate) ที่คงที่ไม่ขึ้นกับการเวลา  $t$

Mean Time Between Failure เป็นตัววัดที่บอกถึงเวลายาวเฉลี่ยที่ระบบหรือชิ้นส่วนมีที่ทำงานเป็นปกติเช่นในเดือนที่ผ่านมาเครื่องบรรจุกระป๋องสามารถทำงานได้รวม 400 ชั่วโมง โดยระหว่างช่วงเวลานั้นมีการขัดข้องและต้องทำการแก้ไขห้าครั้ง กรณีนี้เครื่องจักรมี MTBF เป็น 80 ชั่วโมง ผู้ควบคุมเครื่องสามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่ออนุมานความยาวที่เครื่องจะเดินปกติเขาอาจจะใช้ข้อมูลนี้เพื่อรับมือกับการขัดข้อง เช่นเขาอาจจะวางแผนเพื่อเข้าไปดูแลเครื่องก่อนที่จะถึงเวลาเฉลี่ยนี้เช่นการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ในทางสถิติค่านี้อาจคำนวณได้โดย

$$MTBF = \theta = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (2)$$

เมื่อ Density Function,  $f(t)$  เป็น Exponential Function, MTBF จะเขียนได้เป็น

$$\theta = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

ซึ่งมีหน่วยเป็น ระยะเวลาต่อครั้ง

ในระบบหรือเครื่องจักรที่มีความซับซ้อนนั้น การหาต้นเหตุของการขัดข้องต้องอาศัยการวิเคราะห์ที่ละเอียดและมีความสมบูรณ์มีเช่นนั้นเราอาจจะไม่พบสาเหตุอย่างแท้จริง เครื่องมือที่นิยมใช้มีสองอย่าง อย่างแรกคือผังก้างปลา (Fishbone Diagram) อย่างที่สองเป็นเทคนิคที่มีการใช้การคำนวณและการพิจารณาทางตรรกะเข้ามาช่วย ซึ่งเรียกว่า “Fault Tree Analysis, (FTA)” ใน Fishbone Diagram ผู้วิเคราะห์จะเริ่มลากเส้นโยงจากการขัดข้องไปหาสาเหตุเบื้องต้นซึ่งอาจมีได้หลายสาเหตุ ในแต่ละสาเหตุอาจจะมีสาเหตุที่เป็นต้นตอของแต่ละสาเหตุเบื้องต้นอีก และอาจเป็นไปได้ที่จะพบสาเหตุของสาเหตุนั้นอีก ผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องพยายามโยงสาเหตุต่างๆ ให้ลึกถึงรากเหง้าของปัญหาให้มากที่สุด เมื่อได้ผังก้างปลาที่แผ่ครอบคลุมสาเหตุทั้งหมดแล้ว ผู้วิเคราะห์จะประเมินสาเหตุจากผังนั้น วิธีผังก้างปลาได้ง่ายต่อการเรียนรู้และนำไปใช้งาน แต่ขาดการนำเสนอปฏิสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุต่างๆ ที่มีส่วนที่ทำให้เกิดการขัดข้อง

FTA ใช้การรวบรวมและแจกแจงสาเหตุต่างๆ เช่นเดียวกันกับวิธีผังก้างปลา สิ่งที่ FTA มีนอกเหนือกว่าคือการสังเคราะห์สาเหตุต่างๆ ในเชิงตรรกะ ซึ่งเพิ่มมิติในการวิเคราะห์อย่างมีนัยยะ ตัวอย่างเช่น เมื่อไม่สามารถเปิด Notebook Computer ได้เนื่องจากไม่มีไฟฟ้าเข้าไปป้อน Mother Board การวิเคราะห์พบว่ามีส่วนสาเหตุคือ Battery เสื่อมสิ้นสภาพ และปลั๊กและสายไฟชำรุด ข้อสรุปเมื่อทำการวิเคราะห์ผ่านวิธีผังก้างปลาอาจเป็นไปอย่างกว้างๆ คือไม่สาเหตุใดก็สาเหตุหนึ่ง แต่เมื่อใช้วิธี FTA ข้อสรุปมีความชัดเจนกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก FTA ประมวลผลเชิงตรรกะของสาเหตุต่างๆต่อการขัดข้อง ถ้า  $A$  แทน Event ที่ Battery สิ้นสภาพ  $B$  แทน Event ที่ปลั๊กและสายไฟขัดข้อง  $T$  แทนผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้คือการที่ Notebook ไม่มีไฟฟ้าเข้าไปป้อนนั้นก็คือมีการเกิด  $A$  และ  $B$  พร้อมกัน ความสัมพันธ์เชิงตรรกะเขียนได้เป็น

$$T = A \text{ and } B$$

หรือในทาง Boolean Algebra เขียนเป็น

$$T = A \cdot B = A \cap B \quad (4)$$

เมื่อ  $\cap$  เป็น Binary Operator หรือ “AND” Logic Gate ชนิดหนึ่งเรียกว่า “Intersection” ดังนั้น ผลลัพธ์ที่มีไฟฟ้าป้อนเข้า Notebook เป็นปกติคือ  $T'$  (อ่านว่า NOT T) ซึ่งเขียน Boolean ได้เป็น

$$\begin{aligned} T' &= (A \cdot B)' = A' + B' \\ &= A' \cup B' \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ  $\cup$  คือ Union Operator ซึ่งก็คือ +(OR) ใน Boolean Algebra สมการนี้เป็นผลมาจาก De Morgan’s Theorem นั่นก็คือ ไฟฟ้าจะเข้าไปป้อน Notebook ได้ก็ต่อเมื่อ ปลั๊กและสายไฟฟ้าปกติหรือ Battery ทำงานปกติ (หรือทั้งสองปกติ)

ยิ่งระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นการใช้ FTA ก็ยิ่งสะดวกและมีข้อสรุปที่ชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับวิธีผังก้างปลา เนื่องจาก Boolean Algebra ได้วางกฎเกณฑ์ไว้มากมายที่สามารถช่วยในการวิเคราะห์ อาทิเช่น Absorption Laws

$$A + (A \cdot B) = A \quad (6)$$

$$A \cdot (A + B) = A \cdot B \quad (7)$$

โดยอาศัยการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ Failure Rate ณ เวลาใดๆ ( $\lambda(t)$ ) สามารถเขียนได้เป็น

หรือ Distributive Laws ที่ซึ่ง

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot d \frac{R(t)}{dt} \quad (10)$$

$$A + B \cdot C = (A + B)(A + C) \quad (8) \quad \text{เมื่อ}$$

เมื่อมองมุมตรงกันข้ามกับตรรกะ (Logic) ที่ใช้ใน FTA โดยใช้หลักของ Complementary ความสัมพันธ์จะเปลี่ยนจาก AND เป็น OR และจาก OR เป็น AND ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ใน Reliability Engineering

ประโยชน์ในการนำ FTA มาวิเคราะห์ก็คือความสามารถที่จะระบุ “Cut Set” Cut Set คือเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดสาเหตุแห่งการขัดข้อง Fussell และคณะ [4] ได้วางวิธี (Algorithm) ที่จัดการให้เกิดกลุ่มที่มีจำนวนเหตุที่น้อยที่สุดที่ก่อให้เกิดการขัดข้องซึ่งเรียกว่า “Minimal Cut Set” วิธีนี้วางหลักเกณฑ์เรียง Logic Gates และ Basic Events ตาม Column และ Rows เพื่อทำการ “สาง” ความซับซ้อนออกไป ซึ่งในที่สุดเมื่อทำอย่างถูกต้องแล้ว การวิเคราะห์จะได้ Fault Tree ที่กระชับที่สุดหรือเป็น Minimal Cut Set ของปัญหาดั้งเดิม อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติระบบทั่วไปมักมีความซับซ้อนเต็มไปด้วย Logic Gates และ Basic Events มากมายเกินไปกว่าที่วิธีการนี้จะดำเนินการด้วยมือได้จำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วย

FTA นำไปสู่การหาค่า Failure หรือ Hazard Rate โดยรวมของระบบ จากนิยาม Reliability,  $R(t)$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \text{Failure Rate at time } t$$

เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับความสัมพันธ์ “OR” ใน Fault Tree ผลลัพธ์คือ Failure Rate รวมของระบบ,  $\lambda_s(t)$ :

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (11)$$

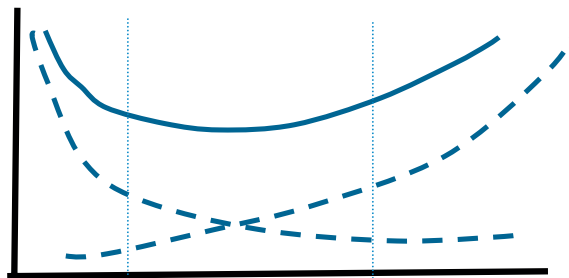
เมื่อ  $\lambda_i(t)$  = Failure Rate ของชิ้นส่วน (Component, i) ในทำนองเดียวกัน ผลลัพธ์ Failure Rate สำหรับ “AND” Gate ใน Fault Tree,  $\lambda_p(t)$  สามารถหาได้โดย

$$\lambda_p(t) = \left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_j - 1) \right\} \left\{ \prod_{j=1}^n z_j - 1 \right\}^{-1} \quad (12)$$

เมื่อ  $1/z_j = (1 - e^{-\lambda_j t})$

### 3. ขั้นตอนและปัญหาในการบรรจขวด

เครื่องจักรอุปกรณ์บรรจขวดภายใต้การศึกษาในช่วง “Burn-In” และอยู่ในช่วง “Constant Failure Rate” ซึ่งตรงกับเส้นที่ช่วงกลางของ curve ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงถึงอัตราการขัดข้องในช่วงเวลาต่างๆ (Bathtub Curve)

เส้นทึบของกราฟเป็นผลรวมของอัตราความล้มเหลว (Failure Rates) ของสองกรณี กรณีแรกเครื่องจักรอุปกรณ์ใหม่มักจะขาดความสมบูรณ์แบบของปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการปรับตั้ง (Set up) การวางระบบและองค์ประกอบ (Configuration) การเชื่อมต่อพลังงานและเชื่อมโยงกับเครื่องจักรอุปกรณ์อื่น หรือแม้แต่ความขาดตกบกพร่องของเครื่องจักรอุปกรณ์เองเช่นความยังไม่คงตัวของ clearances และ tolerances ต่างๆ ซึ่งจะต้องใช้ความพยายามในการแก้ไขและปรับตั้งและระยะเวลาหนึ่งกว่าจะเข้าสู่สภาพสมดุล (Equilibrium) ช่วงเวลานี้มักเรียกว่า Burn-in หรือ Run-in

Period เมื่อผ่านช่วงเวลานี้ไป ความล้มเหลวจากกรณีนี้จะอยู่ในอัตราที่เหมาะสมแก่การใช้งาน กรณีหลังเกิดจากการสึกหรอและเสื่อมสภาพเมื่อเครื่องจักรผ่านการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่ง การเสื่อมสภาพนี้เรียกว่า “Wear-out” จะก่อให้เกิดการขัดข้องในอัตราที่สูง ไม่เหมาะที่จะใช้งานเครื่องจักรอีกต่อไป หลังจากน้ำเบียร์ได้รับการจัดเตรียมจากวัตถุดิบต่างๆ ผ่านการบ่ม หมัก ฯลฯ ขั้นตอนต่อไปเป็นการบรรจุเบียร์ขวดซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่การล้างขวดเบียร์จนถึงการบรรจุหีบพร้อมสำหรับการจัดจำหน่ายตารางที่ 1 สรุปขั้นตอนต่างๆ

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการบรรจุเบียร์

ขั้นตอน	เครื่องจักร/อุปกรณ์
1. ล้างขวดเบียร์	Washer
2. ตรวจสอบสภาพขวด	E.B.I
3. บรรจุน้ำเบียร์	Filler
4. ปิดฝาขวด	Crowner
5. ฆ่าเชื้อ	Pasteurizer
6. ตรวจสอบระดับบรรจุเบื้องต้น	Eyeball Inspection
7. ติดฉลากและยิงโค้ด	Labeler
8. ตรวจสอบระดับบรรจุ	Check Mat
9. ตรวจสอบตำแหน่งฉลาก	Eyeball Inspection
10. บรรจุลงกล่อง	Erector and Packer
11. ปิดผนึกกล่อง	Sealer
12. ยิงโค้ดกล่อง	Inkjet Coder

มีการเก็บข้อมูลการขัดข้องของเครื่องจักร/อุปกรณ์ดังกล่าว ในช่วงเวลาสองเดือน (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2558) ก่อนที่คณะกรรมการจะเข้าไปทำการศึกษา ตารางที่ 2 แสดงจำนวนครั้ง

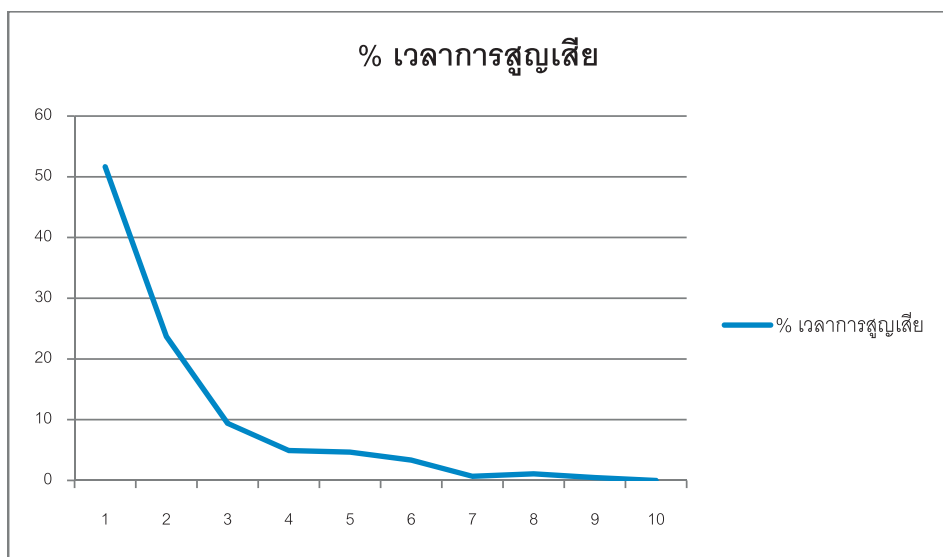
ที่แต่ละเครื่องจักร/อุปกรณ์ประสบกับการขัดข้องและเวลาที่ใช้ในการแก้ไข ตารางจัดลำดับตามจำนวนครั้งที่ขัดข้องจากมากไปหาน้อย

ตารางที่ 2 การขัดข้องและเวลาที่สูญเสียของแต่ละเครื่องจักร/อุปกรณ์

เครื่องจักร/อุปกรณ์	จำนวนครั้ง	เวลาที่ใช้ในการแก้ไข (นาที)
1. Filler	423	5,408
2. Washer	111	2,483
3. Pasteurizer	84	986
4. E.B.I	50	516
5. Packer and Erector	36	489
6. Labeller	26	352
7. Crowner	11	72
8. Sealer	7	115
9. Inkjet Coder	3	50
10. Check Mat	0	0
<b>รวม</b>	<b>751</b>	<b>10,471</b>

ตารางข้างบนนี้ชี้ให้เห็นถึงสาเหตุของการสูญเสียเวลาในการผลิต โดยการขัดข้องของ Filler ก่อให้เกิดการสูญเสียเวลามากที่สุดคือ 5,408 นาทีหรือคิดเป็น 51.65% ของความสูญเสียจากการขัดข้องทั้งหมดสาเหตุนี้กับสาเหตุรองอีกสองลำดับ

ต่อมาคือการสูญเสียรวมเป็นเกือบ 85% ของการสูญเสียทั้งหมด % รูปที่ 2 แสดง % เวลาการสูญเสียจากการขัดข้องต่างๆ การเลือกวิเคราะห์และแก้ปัญหาการขัดข้องอันเนื่องมาจาก Filler จึงคุ้มค่ามากที่สุด



รูปที่ 2 กราฟแสดง % เวลาการสูญเสียจากการขัดข้องต่างๆ



#### 4. การวิเคราะห์และแก้ปัญหา

อาการขัดข้องที่พบได้บ่อยที่สุดของ Filler คือ “Short and Over Filled” ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมน้ำเบียร์ ขาดหรือเกินกว่าปริมาณที่กำหนดโดยในช่วงเวลาสองเดือนที่เก็บข้อมูลเกิดอาการนี้ 115 ครั้ง ใช้เวลาแก้ไขรวม 1,257 นาที ตารางที่ 3 สรุปอาการต่างๆ ที่เกิดเกี่ยวเนื่องกับเครื่อง Filler

ตารางที่ 3 การขัดข้องและเวลาที่สูญเสียที่เกิดกับเครื่อง Filler

การขัดข้อง	เวลาที่หยุด (นาที)	จำนวนครั้งที่หยุด
1. Short and Over Filled	1,257	115
2. Main Drive Gear สึก	938	73
3. Low Pressure Air Service	874	64
4. Supply Pump Overloaded	759	59
5. Vacuum Pump Overloaded	723	54
6. Power Failure	477	41
7. Star Wheel Feeder Jammed	380	17
รวม	5,408	423

การสูญเสียจากอาการ “Short and Over Filled” คิดเป็นเกือบ 30% ของการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดกับ Filler โดยที่มี Mean Time Between Failures (MTBF,  $\theta$ ) เป็น

$$\theta = \frac{\sum(\text{start of downtimes} - \text{start of uptimes})}{\text{Total Failures}}$$

ดังนั้น

$$\theta = \frac{86,400}{115} = 751.3043 \text{ นาที/ครั้ง}$$

เนื่องจากช่วงเวลาสองเดือนมีเวลาทำการ (ทั้งวันทั้งคืน) 86,400 นาที ซึ่งจะทำให้ Failure Rate ( $\lambda$ ) เป็น

$$\lambda = \frac{1}{751.3043} = 0.001331 \text{ ครั้ง/นาที}$$

หรือ 1.9167ครั้ง/วัน หรือ ประมาณ 13.4169 ครั้ง/สัปดาห์

การวินิจฉัยอย่างละเอียดพบสาเหตุที่ก่อให้เกิดอาการ Short and Over Filled ตารางที่ 4 แจกแจงสาเหตุต่างๆ เหล่านี้

ตารางที่ 4 สาเหตุที่ก่อให้เกิดอาการ Short and Over Filled กับเครื่อง Filler

สาเหตุ	จำนวนครั้งที่หยุด
1. Key Valve ผิด	94
2. Spring Valve ขาด	11
3. Centering Cup ไม่สมบูรณ์	4
4. Defector ขาด	2
5. Tube หลุด-หักงอ	1
6. Tank หลุด-หัก คด หรือ งอ	1
7. ปากขวดบิ่น	1
8. ขวดเอียง	1
รวม	115

การเรียกขานสาเหตุต่างๆ เป็นภาษาที่ใช้สื่อสารและเข้าใจกัน ในหมู่ผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน บางอย่างอาจจะยากที่บุคคลภายนอกจะเข้าใจ คำว่า “Key Valve ผิด” หมายถึง Valve Key ผิด หรือ คำว่า “Spring Sharp ขาด” ที่จริงแล้วหมายถึง “Shaft Spring ขาด”

ทั้งสาเหตุ Valve Key ผิดและ Shaft Spring ขาด ก่อให้เกิดปริมาณบรรจุที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งจำต้องหยุดเครื่องบรรจุ และทั้งสายการผลิต เมื่อได้ทำการทบทวนประวัติเครื่องจักร (Machinery History) ของส่วนประกอบทั้งสองพบว่า รอยสึกเป็นต้นเหตุของการผิดบน Valve Key และการเสื่อมสภาพเป็นต้นเหตุในกรณีของการขาด ของ Shaft Spring

ก่อนการวางแผนเพื่อปรับปรุงผลผลิตของสายการผลิต ข้อมูลในอดีตชี้ว่า MTBF ของ Valve Keys เป็น 5.66 วัน และเป็น 49.33 วัน สำหรับ Shaft Spring ในขณะที่ MTBF โดยรวมของ Filler เป็น 0.5333 วัน ดังนั้นจึงจัดตั้งการบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยมีการกำหนดตรวจสอบปรับแต่งและ/หรือ เปลี่ยน Valve Keys ทุก 5 วัน ใช้เวลาเฉลี่ยไม่เกินชั่วโมงครึ่ง แต่สำหรับการบำรุงรักษา Shaft Springs ทั้ง 80 หัวในคราวเดียวจะกินเวลามาก จึงได้วางตารางให้ทยอยเข้าไปดูแล โดยใช้โอกาสที่เครื่องต้องหยุดทุกสี่ชั่วโมง ที่เครื่องต้องหยุดทำการฆ่าเชื้อโดยไอน้ำ ซึ่งจะใช้เวลาทั้งหมดสี่วันสำหรับแต่ละรอบ 49 วัน

ได้ริเริ่มขึ้นการหยุดเนื่องจากการขัดข้อง (Breakdowns) ภายในแปดสัปดาห์ของ Filler ลดลงเหลือ 43 ครั้ง หรือเฉลี่ย 5.375 ครั้ง ต่อสัปดาห์ จากเดิมก่อนมีแผนซึ่งขัดข้อง 105 ครั้ง หรือ 13.125 ครั้ง ต่อสัปดาห์ หรือมี MTBF เพิ่มขึ้นเป็น 0.18605 สัปดาห์จากเดิม 0.07619 สัปดาห์ จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าก่อนมีการดำเนินการตามแผนเวลาหยุดเครื่องทั้งหมด (Downtimes) 831 นาที หลังจากจากการบังคับใช้แผน Downtimes ลดลงเหลือ 235 นาที สปริงมีราคา 50 บาท ต่อชิ้นมีการใช้มากกว่าตอนไม่มีแผน 150 ชิ้น ถ้าราคาขายส่งของเบียร์ 20 บาท การสูญเสีย (Opportunity Cost) เทียบกับฐานสองเดือนด้วยกันลดลงจาก 4,155,550 บาท เหลือ 308,110 บาท

## 5. ผลการดำเนินการ

จะเห็นได้จากตารางที่ 5 หลังจากได้ดำเนินการตามแผนที่

ตารางที่ 5 ตารางสรุปการเปรียบเทียบจำนวน (ครั้ง) ของการหยุดเครื่องบรรจุ

สาเหตุ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
	ม.ค.-ก.พ. 2558 (ครั้ง)	ม.ค. - ก.พ. 2559 (ครั้ง)
key valve ผิด	94	42
Spring Sharp ขาด	11	1
รวม	105	43

ตารางที่ 6 ตารางเวลาที่หยุดเครื่องเพื่อการบำรุงรักษา

เดือน	เดือน	
	มกราคม	กุมภาพันธ์
ก่อนปรับปรุง พ.ศ. 2558 (นาที)	483	348
หลังปรับปรุง พ.ศ. 2559 (นาที)	74	161

หลักฐานอีกด้านที่สนับสนุนการใช้แผนซ่อมบำรุงรักษาคือ การทดสอบทางสถิติ ในที่นี้ Failure Rate หลังจากการบังคับใช้แผนจะเทียบกับค่าก่อนหน้านั้น นั่นก็คือ

$$H_0: \mu = 13.125$$

$$H_1: \mu < 13.125$$

เมื่อใช้ Significance Level เป็น 0.05 ที่ degree of freedom = 7 ค่า critical ของ student-t จะเท่ากับ -1,8946 ในขณะที่ค่าที่คำนวณเป็น -5.08 ซึ่งสรุปได้ว่า แผนการบำรุงรักษาลด Failure Rate ลงจากเดิม

## 6. สรุปและเสนอแนะ

Failure Rate ของทั้งสายการผลิตสามารถหาได้จากสมการ

$$\lambda_{Line}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

ซึ่งเครื่องบรรจุขวดเป็นหนึ่งในเครื่องจักรที่อยู่ในสายการผลิต ตามหลักแล้วการลด Downtimes ก็ต้องลด Failure Rate ของแต่ละเครื่องจักรให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องบรรจุขวดเป็นเครื่องจักรที่เป็นคอขวด (Bottleneck) ในสายการผลิต การเพิ่มผลิตภาพ (Productivity) จึงขึ้นอยู่กับ Failure Rate ของเครื่องนี้เป็นอย่างมาก トラบเมื่อเครื่องนี้มี Failure Rate ลดต่ำลงระดับหนึ่ง การลด Failure Rates เครื่องจักรอื่นๆ จึงจะเริ่มมีความสำคัญและได้รับความใส่ใจในลำดับต่อไป

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Ahmad, R. and Kamaruddin, S., "An Overview of Time-Based Maintenance and Condition-Based Maintenance in Industrial Application," *Computers and Industrial Engineering*, 63, pp. 135-149.
2. Battini, D., Mazzon, S., Persona, A. and Sgarbossa, F., 2016, "Condition-Based Maintenance in a Bottling Line," *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, 4-6 August 2016, Los Angeles, California, U.S.A.
3. Dieulle, L., Berenguer, C. and Roussignol, M., 2003, "Sequential Condition-Based Maintenance Scheduling for a Deteriorating System," *European*

*Journal of Operational Research*, 150 (2), pp. 451-461.

4. Fussell, J.B. and Vesely, W.E., 1972, "A New Methodology for Obtaining Cut Sets for Falt Trees," *Transactions of the American Nuclear Society*, 15, pp. 262-263.
5. Hall, R.E., 1991, *Queueing Methods for Services and Manufacturing*, Prentice-Hall, United States of America.
6. Kositgittiwong, D., 2016, "Evaluation of the Risk of Bridge Failure from Flood Event in Thailand," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (2), pp. 184-197. (In Thai)
7. Santaweasuk, P. and Rukijkanpanich, J., 2017, "Modification of Maintenance Period for Masterbatch Production," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (3), pp. 428-445. (In Thai)
8. Shahr, E., Explaining the Hazard Function, h(t), Through Statistical Lenses [Online], Available : <http://www.u.arizona.edu/~shahr/writing/Explaining%20the%20hazard%20function.doc>[July 2017].
9. Sriphuek, R. and Chotigo, S., 2016, "Application of On-line Partial Discharge Measurement for High Voltage Equipment in Thailand," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (1), pp. 101-118. (In Thai)
10. Thipparat, T., 2013, "The Use of Fault Tree Analysis to Visualize the Impact of Risk Factors on House Construction Duration," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (3), pp. 361-379. (In Thai)
11. Wang, W., "A Model to Determine the Optimal Critical level and the Monitoring Intervals in Condition-Based Maintenance," *International Journal of Production Research*, 38 (6), pp. 1425-1436.
12. Design Analysis Procedure for Failure Modes, 1967, *Effects and Criticality Analysis (FMECA)*, Society for Automotive Engineers. ARP926.
13. MIL-STD-882E SYSTEM SAFETY [Online], Available : <http://www.everyspec.com>[January 2017].

14. United States Department of Defense (9 November 1949), MIL-P-1629 - Procedures for Performing a Failure Mode Effect and Critical Analysis, Department of Defense (US), MIL-P-1629.
15. United States Department of Defense (24 November 1980), MIL-STD-1629A - Procedures for Performing a Failure Mode Effect and Criticality Analysis, Department of Defense (USA), MIL-STD-1629A.