

การปรับปรุงกระบวนการและการจัดสมดุลสายการผลิตสำหรับสายการผลิตท่อทำความร้อน

โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

Process Improvement and Line Balancing for Heat Pipe Production line by Computer Simulation

สุริยาพร ปานทอง และ บุญบา พุกยาพันธ์รัตน์

ISO-RU, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการและจัดสมดุลสายการผลิตแผนกผลิตท่อทำความร้อนให้มีประสิทธิภาพสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้ เนื่องจากทางแผนกประสบปัญหาหกรอบเวลาการผลิตนานและเกิดการไหลที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิค ECRS และจัดสมดุลสายการผลิตมาปรับปรุงงานและสายการผลิต นอกจากนั้นยังใช้การจำลองสถานการณ์ในการวิเคราะห์และแสดงผลทั้งก่อนและหลังทำการปรับปรุง ผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงงานด้วยเทคนิค ECRS และการจัดสมดุลสายการผลิตสามารถทำให้สายการผลิตมีอัตราผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 833.33 ค่าอรรถประโยชน์เพิ่มขึ้นร้อยละ 254.86 ประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 237.99 และสามารถผลิตงานได้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

คำสำคัญ: หลักการ ECRS การเพิ่มผลผลิต การจัดสมดุลสายการผลิต การจำลองสถานการณ์

Abstract

The purpose of this research is to enhance and balance the production process of the heat pipe-manufacturing department for increasing the efficiency and productivity. This department encountered the problems of long cycle time and discontinuous flow, so customer demands could not be satisfied. ECRS technique and line balancing were used to improve works and the production line. Moreover, simulation was also applied in order to analyze and show the results for both before and after improvement. The simulation results revealed that improvement by ECRS and line balancing techniques can increase productivity 833.33%, utilization 254.86% and line efficiency 237.99%. Then, the customer demands can be met.

Keywords: ECRS, increase productivity, line balancing, simulation

1. บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ กลายเป็นปัจจัยที่มีความจำเป็นในชีวิตประจำวันมากขึ้น สินค้าอิเล็กทรอนิกส์หลากหลายชนิดถูกผลิตและส่งออกไปยังผู้ใช้งานจำนวนมาก ตัวอย่างหนึ่งก็คือ โทรศัพท์มือถือ ในขณะที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้น ความร้อนดังกล่าวจำเป็นต้องระบายทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกอย่างเหมาะสม ซึ่ง

หนึ่งในวิธีการระบายความร้อนได้ดีคือการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นเมื่อมีความต้องการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นความต้องการในการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตท่อทำความร้อนที่มีปริมาณความต้องการจากลูกค้าสูงสุด 125,000 ชิ้นต่อวัน ซึ่งประสบปัญหาการล่าช้าการผลิตที่มีอยู่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ปัจจุบันสามารถรองรับได้เพียง 21,000 ชิ้นต่อวัน

เนื่องจากเครื่องจักรบางกระบวนการยังไม่สามารถรองรับการผลิตนี้ได้ต้องอาศัยทรัพยากรมนุษย์ในการผลิตร่วมกับเครื่องจักรเป็นจำนวนมาก ใช้เวลาในการผลิตนาน สายการผลิตขาดสมดุล ส่งผลให้ผลิตงานไม่ทันทำให้สูญเสียรายได้อย่างมาก ทางโรงงานจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตในส่วนของสายการผลิตที่นำความร้อนรวมทั้งพัฒนาเครื่องจักรให้มีความสามารถอย่างเพียงพอและทันต่อความต้องการของลูกค้า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เทคนิคปรับปรุงงานโดยหลักการ ECRS สามารถช่วยลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในสายการผลิตได้ อันได้แก่ ความสูญเปล่าจากการเคลื่อนไหว การขนย้ายที่มากเกินไป การผลิตที่ใช้เวลานาน การรอคอยงาน และงานคงค้างระหว่างกระบวนการที่มากเกินไป ซึ่งหลักการ ECRS จะช่วยแก้ปัญหาโดยการรวมขั้นตอนและลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน ลดระยะการเคลื่อนไหวของเครื่องจักรและพนักงานทำให้เวลาการผลิตของกระบวนการลดลง จัดลำดับการทำงานใหม่ให้ง่ายต่อการทำงานทำให้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น (1-5) การประยุกต์ใช้การจัดสมดุลสายการผลิตและการวางแผนการใช้ทรัพยากรการผลิตอย่างเหมาะสมช่วยให้สามารถจัดระบบกระบวนการผลิตให้สมดุล อีกทั้งยังลดจำนวนพนักงานและเครื่องจักรในสายการผลิตลงได้ ทำให้การใช้ทรัพยากรประโยชน์ของพนักงานดีขึ้น สายการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น (6-8) เมื่อปรับปรุงสายการผลิตและจัดสมดุลสายการผลิตโดยนำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการแสดงผลทำให้สายการผลิตเกิดความสมดุลมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถผลิตงานได้ทันตามความต้องการของลูกค้า (9,11) ปัจจุบันการจำลองสถานการณ์นั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความประหยัดทั้งเวลาและต้นทุนในการดำเนินการทดสอบ (10) การนำแบบจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์มาใช้ในการแสดงผลการปรับปรุงกระบวนการนั้นมีส่วนช่วยให้มองเห็นปัญหาได้อย่างชัดเจนมากขึ้น มีความยืดหยุ่นสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสายการผลิตในแบบจำลองได้โดยไม่กระทบกับการทำงานของสายการผลิตจริง (11)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์และปรับปรุงสายการผลิตที่นำความร้อนโดยนำเทคนิคการปรับปรุงงานตามหลักการ ECRS การเพิ่มประสิทธิภาพและจัดสมดุลสายการผลิตแล้ว

ประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ประเมินผลหลังปรับปรุง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเพิ่มผลิตภาพ (productivity)

ผลิตภาพ เป็นดัชนีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ก่อให้เกิดผลผลิตนั้น การทำให้อัตราส่วนระหว่างผลผลิต (output) ที่ได้กับทรัพยากรที่ใช้ (input) สูงขึ้นคือ “การเพิ่มผลิตภาพ” (12)

$$\text{ผลิตภาพ} = \frac{\text{ผลที่ได้ (output)}}{\text{ทรัพยากรที่ใช้ (input)}} \quad (1)$$

2.2 เทคนิคการปรับปรุงงานเพื่อเพิ่มผลิตภาพโดย ECRS

1. การขจัดงานที่ไม่จำเป็นออกไป (eliminate) โดยการพิจารณาตัดขั้นตอนการทำงานที่ก่อให้เกิดความสูญเปล่าของต้นทุน ค่าแรงงาน เวลา วัสดุคิบ และค่าใช้จ่ายต่าง ๆ
2. การรวมขั้นตอนการปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน (combine) หากกระบวนการผลิตมีขั้นตอนมากเกินไปจะมีการใช้เครื่องจักรอุปกรณ์จำนวนมากอีกทั้งยังมีการเคลื่อนย้ายงานมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น
3. การจัดขั้นตอนการทำงานใหม่ (rearrange) เพื่อลดการเคลื่อนย้ายและการไหลของงานทำให้ทำงานได้ง่ายและต่อเนื่องยิ่งขึ้น
4. การปรับปรุงวิธีการทำงานให้ง่ายขึ้น (simplify) โดยใช้อุปกรณ์ทุ่นแรงให้ทำงานได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น (12-13) ทั้งนี้ตัวชี้วัดของการปรับปรุงประกอบไปด้วย

$$\text{อัตราผลิตภาพ} = \frac{\text{ผลผลิต}}{(\text{เวลาทำงาน} \times \text{จำนวนคน})} \quad (2)$$

$$\text{อรรถประโยชน์} = \frac{(\text{เวลามาตรฐาน} \times \text{ผลผลิต} \times 100)}{\text{เวลาทำงานทั้งหมด}} \quad (3)$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ผลรวมเวลางานย่อย}}{(\text{จำนวนสถานี} \times \text{รอบเวลาดานานสุด})} \quad (4)$$

2.3 การศึกษาเวลา (time study)

เป็นกระบวนการเพื่อกำหนดเวลาการทำงานโดยคนงานที่เหมาะสมซึ่งทำงานในอัตราที่ปกติ เวลาที่ได้เรียกว่า เวลามาตรฐาน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} + \text{ค่าเผื่อต่าง ๆ} \quad (5)$$

เวลาปกติ = เวลาจริงที่จับได้ x ค่าปรับอัตราความเร็ว

ค่าเผื่อต่าง ๆ คือ เวลาเผื่อสำหรับกรณีต่าง ๆ ของพนักงาน และการสูญเสียเวลาอันเนื่องมาจากสาเหตุที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ค่าเผื่อนี้แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ ค่าเผื่อส่วนบุคคลในการทำกิจกรรมตัวโดยอุตสาหกรรมทั่วไปมักกำหนดไว้ที่ร้อยละ 5 ของเวลาการทำงานทั้งหมด ค่าเผื่อสำหรับความเครียด ความเหนื่อยล้าจากการทำงานจะแปรผันตามลักษณะงานและค่าเผื่อสำหรับความล่าช้าจากการเสียของเครื่องจักร การคองงาน การรอคอยคำสั่งจากหัวหน้างาน โดยทางโรงงานกรณีศึกษาใช้ค่าในการอ้างว่าเวลาเผื่อส่วนบุคคลเท่ากับร้อยละ 5 เวลาเผื่อสำหรับความเครียดเท่ากับร้อยละ 5 และเวลาเผื่อสำหรับความล่าช้าเท่ากับร้อยละ 5 ดังนั้น เวลาเผื่อรวมเท่ากับร้อยละ 15 (12-13)

2.4 การจัดสมดุลสายการผลิต (line balancing)

กระบวนการจัดแบ่งงานให้กับพนักงานในแต่ละสถานีอย่างเหมาะสมเพื่อให้มีอัตราการทำงานเท่ากันมากที่สุดและได้ประสิทธิภาพที่สูงในการผลิตงานต่าง ๆ การจัดสมดุลสายการผลิตดำเนินงานภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ เงื่อนไขลำดับก่อนหน้าและข้อจำกัดของรอบเวลาการผลิต (14) อัตราการผลิตจะถูกกำหนดโดยเวลาการทำงานของสถานีที่นานที่สุด เรียกว่า รอบเวลาการทำงาน (cycle time) (7)

2.5 การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาลอกเลียนพฤติกรรมของระบบโดยมีการเก็บข้อมูลที่สนใจและใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สถานการณ์หารูปแบบที่ถูกต้องหรือทดสอบการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงการทำงานของระบบสามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอน คือ กำหนดปัญหา ออกแบบแบบจำลอง เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล สร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดำเนินการทดลองและนำไปใช้งานจริง (15)

3. วิธีการวิจัย

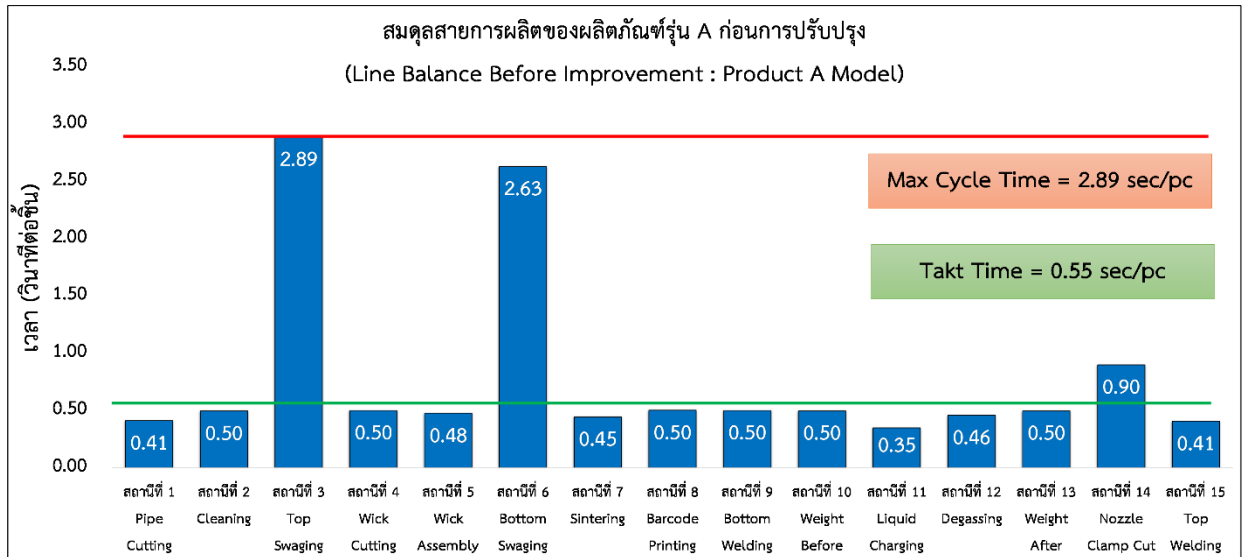
3.1 การรวบรวมข้อมูลของสายการผลิตปัจจุบัน

ท่อนำความร้อนมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ท่อ วัสดุพูนและสารทำงาน ผ่านกระบวนการผลิต 15 สถานี คือ

1. การตัดท่อ (pipe cutting)
2. การทำความสะอาดผิวท่อ (cleaning)
3. การลดขนาดปลายด้านบนท่อ (top swaging)
4. การตัดวัสดุพูน (wick cutting)
5. การประกอบวัสดุพูนกับท่อ (wick assembly)
6. การลดขนาดปลายด้านล่างท่อ (bottom swaging)
7. การให้ความร้อน (sintering)
8. การพิมพ์บาร์โค้ด (barcode printing)
9. การเชื่อมปิดปลายด้านล่าง (bottom welding)
10. การชั่งน้ำหนักก่อน (weight before)
11. การเติมสารทำงาน (liquid charge)
12. กำจัดอากาศควบคุมปริมาณสารทำงาน (degassing)
13. การชั่งน้ำหนักงานหลัง (weight after)
14. การตัดปลายท่อยาวด้านบน (top nozzle clamp cut)
15. การเชื่อมปิดปลายด้านบน (top welding)

ในการวิเคราะห์สถานการณ์ปัจจุบันของสายการผลิตก่อนการปรับปรุงมีลักษณะของสายการผลิตเป็นการผลิตแบบรุ่น (batch line) ใช้เครื่องจักรจำนวน 78 เครื่อง และมีพนักงาน 158 คนต่อวัน พบปัญหาความไม่สมดุลของสายการผลิตและความสามารถในการผลิตงานไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า เนื่องจากเวลาในการผลิตงานของแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 1 รอบเวลาของการผลิต (cycle time) เป็น 2.89 วินาทีต่อชิ้น (จากเวลาที่มากที่สุดของทุกกระบวนการ) แต่อัตราความต้องการของลูกค้า (takt time) เป็น 0.55 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งคำนวณมาจากความต้องการของลูกค้า 125,000 ชิ้นต่อวัน โดยที่มีเวลาทำงาน 19 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 68,400 วินาทีต่อวันตามสมการ (6)

$$\text{takt time} = \frac{68,400 \text{ (วินาทีต่อวัน)}}{125,000 \text{ (ชิ้นต่อวัน)}} = 0.55 \text{ วินาทีต่อชิ้น} \quad (6)$$



รูปที่ 1 สมดุลสายการผลิตของผลิตภัณฑ์รุ่น A ก่อนการปรับปรุง

ซึ่งจะเห็นว่าบางกระบวนการใช้เวลาในการผลิตงานน้อยมากบางกระบวนการมีรอบเวลาสูงก่อให้เกิดความไม่สมดุลของสายการผลิต อีกทั้งมีสถานีที่รอบเวลาอยู่เหนือเส้น takt time คือ สถานีที่ 3 กระบวนการลดขนาดปลายท่อด้านบน (top swaging) สถานีที่ 6 กระบวนการลดขนาดปลายท่อด้านล่าง (bottom swaging) และสถานีที่ 14 กระบวนการตัดปลายท่อยาวด้านบน (top nozzle clamp cut) ซึ่งเป็นจุดคอขวดส่งผลให้ผลิตงานไม่ทัน ดังนั้นจึงต้องลดเวลาในการผลิตของสามสถานีนี้ให้น้อยลงใกล้เคียงกับสถานีอื่น ๆ เพื่อให้เกิดความสมดุลและเพื่อเพิ่มอัตราการผลิต นอกจากนี้ยังวิเคราะห์อัตราผลิต (productivity) ของสายการผลิตปัจจุบัน ซึ่งสามารถผลิตได้ 6 ชิ้นต่อชั่วโมงต่อคน คำนวณมาจากปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้ปัจจุบัน 21,000 ชิ้นต่อวัน โดยใช้พนักงาน 158 คนต่อวัน ตามสมการ (2) ร้อยละของการใช้ค่าอรรถประโยชน์ (utilization) เฉลี่ยของกระบวนการ คือ 24.50 คำนวณจากสมการ (3) แล้วหาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสายการผลิต (Efficiency) เป็นร้อยละ 27.64 คำนวณดังสมการ (4) จะเห็นว่าอัตราผลิตต่อคนต่อชั่วโมง รวมถึงการใช้อรรถประโยชน์ของกระบวนการและประสิทธิภาพของสายการผลิตก่อนการปรับปรุงค่อนข้างน้อย

3.2 การปรับปรุงกระบวนการด้วยหลักการ ECRS

หลักการ ECRS ได้ถูกนำมาใช้เพื่อลดรอบเวลาการทำงาน ของกระบวนการที่สูงเกินกว่า takt time ดังนี้

1. การรวมขั้นตอนการปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน (combine) สถานีที่ 14 และ 15 มีขั้นตอนทำงานลักษณะเดียวกัน ควบคุมระยะโดยใช้จุดอ้างอิงเดียวกันเป็นกระบวนการต่อเนื่องจึงปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรแล้วยุบรวมขั้นตอนให้ทำงานร่วมกันได้โดยเปลี่ยนการใช้เครื่องจักรจาก 5 และ 10 เครื่องใน สถานีที่ 14 และ 15 เป็น 4 เครื่อง รอบเวลาจาก 0.90 และ 0.41 วินาทีต่อชิ้น เป็น 0.51 วินาทีต่อชิ้น ดังรูปที่ 2

2. การปรับปรุงวิธีการทำงานให้ง่ายขึ้น (simplify) สถานีที่ 3 และ 6 โดยปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรให้ทำงานได้อย่างอัตโนมัติและปรับปรุงโปรแกรม PLC ให้ทำงานรอล่วงหน้า ในขณะที่ชิ้นส่วนอื่นยังคงดำเนินอยู่จึงไม่สูญเสียเวลารอเคลื่อนย้าย ดังรูปที่ 3 โดยสถานีที่ 3 เดิมเครื่องจักร manual จาก 10 เครื่อง พนักงานควบคุมเครื่องจักร 1 คนต่อ 1 เครื่อง ปรับเป็นเครื่องอัตโนมัติ 40 เครื่อง ใช้พนักงาน 1 คน ควบคุม 10 เครื่อง โดยเครื่องจักรเป็นเครื่องที่มีอยู่แล้วในโรงงาน รอบเวลาลดลงจากเดิม 2.89 วินาทีต่อชิ้น เป็น 0.50 วินาทีต่อชิ้น ส่วนสถานีที่ 6 ใช้เครื่องจักร manual จาก 6 เครื่องใช้คน 6 คน เปลี่ยนเป็นเครื่องอัตโนมัติ 15 เครื่อง ใช้คน 2 คน รอบเวลา ลดลงจาก 2.63 วินาทีต่อชิ้น เป็น 0.51 วินาทีต่อชิ้น ดังรูปที่ 4

ต่อไปจะปรับสมดุลสายการผลิตใหม่โดยคำนวณจำนวน สถานีงานที่น้อยที่สุด ได้ดังนี้

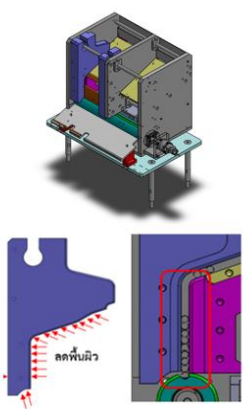
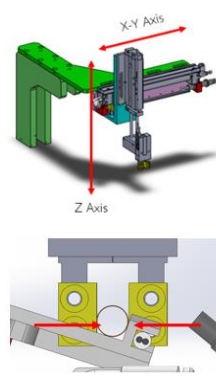
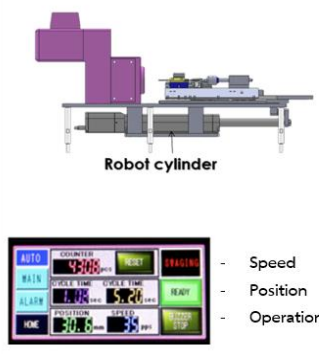
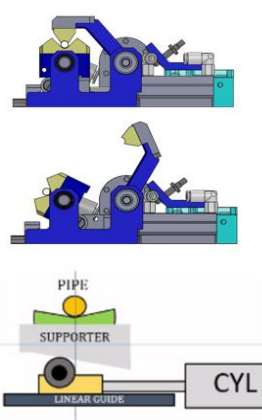
$$N = (0.41 + 0.50 + 0.50 + 0.50 + 0.48 + 0.51 + 0.45 + 0.50 + 0.50 + 0.50 + 0.35 + 0.46 + 0.45 + 0.51) / 0.55 = 12 \text{ สถานี}$$

ซึ่งหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตและจัดสมดุลใหม่แล้วเวลาที่ใช้ในการผลิตของกระบวนการที่เป็นคอขวดทั้งสามสถานียลดลง สาขาการผลิตมีความสมดุลมากขึ้น จำนวนสถานีงานลดลงจาก 15 สถานีเหลือ 14 สถานี ดังรูปที่ 5 ใช้เครื่องจักร 106 เครื่อง และพนักงาน 116 คนต่อวัน ซึ่งจากการคำนวณ

จำนวนสถานีน้อยที่สุดอยู่ที่ 12 สถานี แต่ไม่สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ เนื่องจากหลังปรับปรุงกระบวนการแล้วไม่สามารถเพิ่มงานให้พนักงานประจำสถานีได้อีก กระบวนการมีลักษณะงานต่างกันไม่สามารถรวมขั้นตอนเข้าด้วยกันได้




รูปที่ 2 กระบวนการตัดและเชื่อมปิดปลายท่อด้านบน ก่อนการปรับปรุง

กล่องจ่ายชิ้นงาน (Load In)	หยิบและเคลื่อนย้ายชิ้นงาน (Pick-Place and Transportation)	ลดขนาด (Swaging)	ฐานรองรับชิ้นงานและจ่ายออก (Pipe Support and Unload)
 <p style="text-align: center;">R = 2.6 mm For HP4.9 mm</p> <p>แก้ไขรัศมีของช่องผ่านท่อให้สามารถรองรับท่อขนาด 4.9 มิลลิเมตร</p>	 <p>ขยายร่องจับท่อให้สามารถรองรับการจับท่อขนาด 4.9 มิลลิเมตร</p>	 <p style="text-align: center;">Robot cylinder</p> <p>การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทุกชิ้นส่วนทำงานอย่างอัตโนมัติด้วยระบบ Pneumatic และ PLC สามารถควบคุมความเร็ว ตำแหน่ง และการทำงานได้อย่างแม่นยำ</p>	 <p>ขยายร่องจับท่อให้สามารถรองรับการจับท่อขนาด 4.9 มิลลิเมตร และสามารถปล่อยงานออกจากเครื่องจักรได้อย่างอัตโนมัติ</p>

รูปที่ 3 การปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรอัตโนมัติ สถานีที่ 3 และ 6 ให้สามารถรองรับท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.9 มิลลิเมตร

ก่อนการปรับปรุง



Manual machine
พนักงาน 1 คน ต่อ 1 เครื่อง
พนักงานต้องทำงานตลอดเวลา
พร้อมชิ้นงานแต่ละชิ้น

สถานีที่ 3 : การลดขนาดปลายท่อด้านบน 28.87 วินาทีต่อชิ้นต่อเครื่อง
สถานีที่ 6 : การลดขนาดปลายท่อด้านล่าง 15.77 วินาทีต่อชิ้นต่อเครื่อง

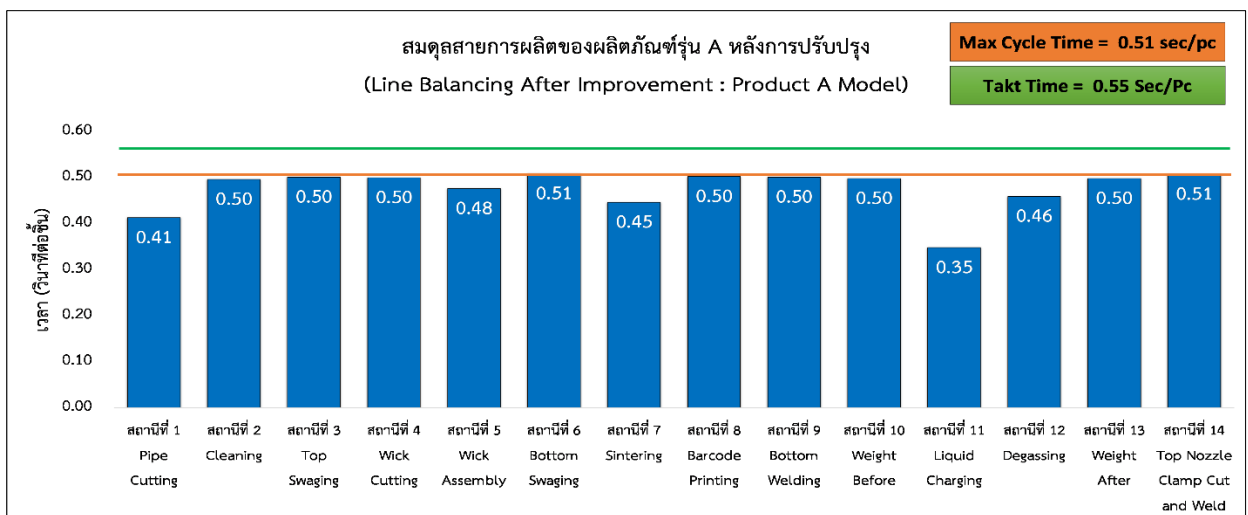
หลังการปรับปรุง



Automatic machine
พนักงาน 1 คน ต่อ 10 เครื่อง
พนักงานไม่ต้องทำงานตลอดเวลา
พร้อมชิ้นงานแต่ละชิ้น

สถานีที่ 3 : การลดขนาดปลายท่อด้านบน 20.05 วินาทีต่อชิ้นต่อเครื่อง
สถานีที่ 6 : การลดขนาดปลายท่อด้านล่าง 7.63 วินาทีต่อชิ้นต่อเครื่อง

รูปที่ 4 กระบวนการลดขนาดปลายท่อด้านบนและล่าง ก่อนและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 5 สมดุลสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ก่อนนำความร้อน รุ่น A หลังการปรับปรุง

3.3 การจำลองสถานการณ์

จากการวัดผลและวิเคราะห์การปรับปรุงกระบวนการผลิตข้างต้นนั้นได้มาจากการคำนวณ โดยค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวยังไม่ได้คำนึงถึงการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะต่าง ๆ ของระบบจริง ซึ่งเมื่อข้อมูลมีการกระจายตัวอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อให้ทราบผลที่น่าเชื่อถือของระบบที่จะทำการปรับปรุงใหม่ การจำลองสถานการณ์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพสายการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งจะช่วยให้มองเห็นภาพได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถทดสอบได้ว่าสมดุลสายการผลิตที่ดำเนินการปรับปรุงจะสามารถรองรับปริมาณความต้องการของลูกค้ามากขึ้นเพียงใด นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวยังสามารถทดลองปรับเปลี่ยนรูปแบบสายการผลิตเพื่อผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจ ช่วยในการตัดสินใจ ลด

ต้นทุนและเวลา ช่วยประเมินผลการดำเนินงานและหาแนวทางการผลิตที่เหมาะสม โดยการจำลองสถานการณ์ของสายการผลิตกรณีศึกษาได้ใช้โปรแกรม โปรโมเดล (promodel) เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถจำลองสถานการณ์ที่มีความสลับซับซ้อนของกระบวนการได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถพิจารณาการเพิ่มปัจจัยหรือส่วนประกอบในกระบวนการทำงานเพื่อจำลองการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังแสดงภาพกราฟที่สามารถเข้าใจการไหลของงานได้ง่ายและพบเห็นปัญหาอย่างชัดเจน ในการจำลองสถานการณ์ได้กำหนดตัวชี้วัด คือ ค่าการใช้อรรถประโยชน์ของกระบวนการ ประสิทธิภาพของสายการผลิตและอัตราผลผลิต สามารถรองรับปริมาณความต้องการที่มากขึ้นได้ ในการจำลองสถานการณ์นั้นจะต้องมี

การเก็บข้อมูลและทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำไปใช้ในแบบจำลอง วิเคราะห์ความเป็นอิสระ (test of independence) ทดสอบความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน (test of homogeneity) และหารูปแบบการแจกแจงของข้อมูลที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์ goodness of fit ดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นสร้างแบบจำลองและทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองรันแบบจำลองก่อนการปรับปรุงกับเวลาที่ใช้ในการผลิตจากการคำนวณ หากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยหรือใกล้เคียงกันจะสามารถสรุปได้ว่าการสร้างแบบจำลองนี้มีความถูกต้อง ซึ่งจากการทดสอบผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.01 – 0.07 เป็นค่าที่ต่ำและไม่เกินกว่าค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมมีความถูกต้องระบบไม่มีข้อผิดพลาดใด ๆ ที่จะทำให้โปรแกรมหยุดทำงานเกิดขึ้น จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเทียบผลเวลาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการทำงานของโปรแกรมจำนวน 30 รอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับเวลาที่ผลิตงานจริงด้วยการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติ t- test ของค่าเฉลี่ยในรูปแบบการแจกแจง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการผลิตของโปรแกรมกับ

การทำงานจริงไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความถูกต้องสามารถนำมาใช้แทนระบบจริงได้จึงใช้จำลองสถานการณ์เพื่อวิเคราะห์การปรับปรุงกระบวนการผลิต

4. การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงสายการผลิตโดยอาศัยแบบจำลองสถานการณ์

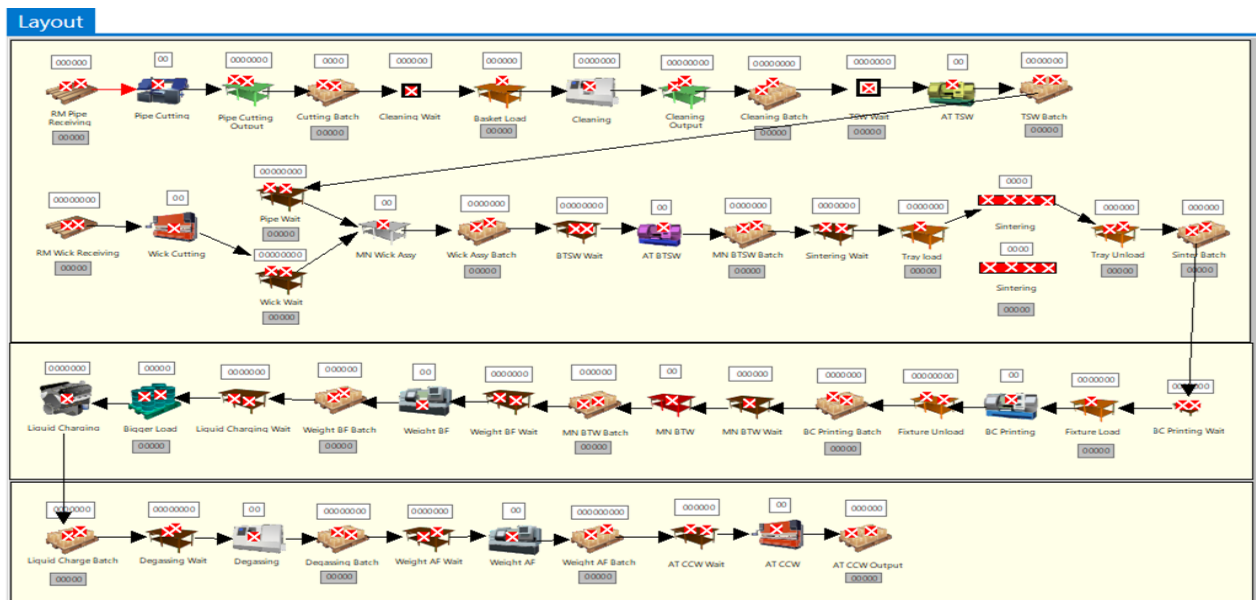
การจำลองสถานการณ์ของสายการผลิตนี้เพื่อวิเคราะห์ความสูญเสียและหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิต การใช้อรรถประโยชน์และอัตราผลผลิต ให้สามารถรองรับปริมาณความต้องการที่มากขึ้น แบบจำลองประกอบไปด้วย 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองสถานการณ์ก่อนปรับปรุงแบบจำลองหลังการปรับปรุงโดยไม่เพิ่มเครื่องจักร และสายการผลิตที่สามารถผลิตได้ 125,000 ชิ้น ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้พนักงานและเครื่องจักรประเภทเดียวกันทำงานเหมือนกันมีความสามารถเท่ากัน ไม่เกิดปัญหาเครื่องจักรขัดข้องขึ้นและไม่เกิดของเสียในกระบวนการผลิต กำหนดให้แบบจำลองซึ่งใช้การแจกแจงข้อมูลเวลาการทำงานใช้เวลาในการผลิตชิ้นงาน 19 ชั่วโมง ทำการผลิตงานจำนวน 125,000 ชิ้น ดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลทางสถิติของแต่ละสถานงาน ก่อนการปรับปรุง

สถานี	ขั้นตอนการทำงานหลัก	ขั้นตอนการทำงานย่อย	เวลายาตรฐาน	การทดสอบข้อมูลทางสถิติ			
				ความเป็นอิสระต่อกัน	ความเป็นหนึ่งเดียวกัน	ความเหมาะสมของการแจกแจง	พารามิเตอร์
1	การตัดท่อ	ไหลตงงานเข้าเครื่องจักร	206.46	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	205+W(3.23, 1.65)
2	การทำความสะดวกผิวท่อ	ไหลตงงานเข้าเครื่องจักร	744.34	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	740+W(2.57, 4.89)
3	การลดขนาดปลายด้านบนท่อ	การลดขนาดปลายด้านบนท่อ	28.88	ผ่าน	ผ่าน	Jahnsn SB	26+4.93*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)-0.488)/1.24)))
4	การตัดวัสดุพรุณ	การตัดงานเป็นชิ้น	1.0	-	-	-	500
5	การประกอบวัสดุพรุณกับท่อ	การประกอบวัสดุพรุณใส่ในท่อ	3.81	ผ่าน	ผ่าน	Pearson 5	3+P5(188, 151)
6	การลดขนาดปลายด้านบนท่อ	การลดขนาดปลายด้านบนท่อ	15.78	ผ่าน	ผ่าน	Jahnsn SB	14+3.08*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)-0.528)/1.47)))
7	การให้ความร้อน	ไหลตงงานเข้าเครื่องจักร	68.90	ผ่าน	ผ่าน	Beta	B(3.47, 1.62, 68, 69.3)
		กระบวนการให้ความร้อน	313.53	-	-	-	313.53
		ไหลตงงานจากเครื่องจักร	53.96	ผ่าน	ผ่าน	Beta	B(3.88, 1.83, 52, 54.9)
8	การพิมพ์บาร์โค้ด	ไหลตงงานเข้าเครื่องจักร	20.09	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	19+W(3.94, 1.2)
9	การเชื่อมปิดปลายด้านล่าง	ไหลตงงานเข้าเครื่องจักร	4.01	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	3+W(9.82, 1.06)

ตารางที่ 1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลทางสถิติของแต่ละสถานงาน ก่อนการปรับปรุง

สถานี	ขั้นตอนการทำงานหลัก	ขั้นตอนการทำงานย่อย	เวลามาตรฐาน	การทดสอบข้อมูลทางสถิติ			
				ความเป็นอิสระต่อกัน	ความเป็นหนึ่งเดียวกัน	ความเหมาะสมของการแจกแจง	พารามิเตอร์
10	การซึ้่งน้ำหนักก่อน	กระบวนการซึ้่งน้ำหนักงาน	4.48	-	-	-	4.48
11	การเติมสารทำงาน	โหลตงานเข้าเครื่องจักร	347.85	ผ่าน	ผ่าน	Triangular	T(346, 349, 349)
12	การกำจัดอากาศ	โหลตงานเข้าเครื่องจักร	5.51	ผ่าน	ผ่าน	Inverse Weibull	$5+(1/2.03)*(-\text{LN}(U(0.5,0.5)))^{**}(-1/14.9)$
13	การซึ้่งน้ำหนักงานหลัง	กระบวนการซึ้่งน้ำหนักงาน	4.48	-	-	-	4.48
14	การตัดปลายท่อยาวด้านบน	โหลตงานเข้าเครื่องจักร	4.50	ผ่าน	ผ่าน	Loglogistic	$4+0.498*(1/(1/U(0.5,0.5)-1)))^{**}(1/11.5)$
15	การเชื่อมปิดปลายด้านบน	โหลตงานเข้าเครื่องจักร	4.07	ผ่าน	ผ่าน	Pearson 5	$3+P5(86.4, 91.5)$



รูปที่ 6 แบบจำลองสถานการณ์ของสายการผลิต หลังการปรับปรุง

ตารางที่ 2 ผลตัวชี้วัดเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยแบบจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

การวัดผล	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง		ผลประโยชน์ที่ได้รับ
		ไม่เพิ่มเครื่องจักร	ผลิตได้ตามความต้องการ	
ผลผลิตที่ได้ (ชิ้น)	21,000	31,000	125,000	495.24%
จำนวนเครื่องจักร (เครื่อง)	78	78	106	-
จำนวนพนักงาน (คนต่อวัน)	158	65	116	26.58%
ค่าใช้จ่ายที่ลดได้ (บาท)	-	4,413,955	5,288,082	-
อัตราผลผลิต (ชิ้นต่อชั่วโมงต่อคน)	6	25	56	833.33%
อรรถประโยชน์โดยรวมเฉลี่ย (ร้อยละ)	24.50	42.43	86.94	254.86%
ประสิทธิภาพของสายการผลิต (ร้อยละ)	27.64	30.38	93.42	237.99%

ตารางที่ 3 งบประมาณเงินสดการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการ สายการผลิตหลังการปรับปรุงโดยไม่เพิ่มจำนวนเครื่องจักร

ระยะ	ระยะเริ่มต้น			ระยะปรับปรุงกระบวนการ					รวม	
	เดือน	1	2	3	4	5	6	7		8
ก. งบกระแสเงินสดรับ	-	-	-	701,350	1,098,500	1,233,700	1,453,400	1,394,250	1,394,250	7,275,450
1. ผลตอบแทนจากการลดค่าใช้จ่ายจ้างพนักงาน	-	-	-	726,700	1,115,400	1,250,600	1,504,100	1,436,500	1,436,500	7,469,800
ข. งบกระแสเงินสดจ่าย	- 121,560	- 172,794	- 311,432	- 499,061	- 427,859	- 327,195	- 412,675	- 294,459	- 294,459	- 2,861,495
1. การลงทุนปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักร	-	-	-	- 347,320	- 192,505	- 67,985	- 105,675	-	-	- 713,485
2. ค่าจ้างพนักงาน	- 118,300	- 169,000	- 304,200	- 109,850	- 169,000	- 185,900	- 219,700	- 211,250	- 211,250	- 1,698,450
3. ค่าไฟฟ้า	- 3,260	- 3,794	- 7,232	- 41,891	- 66,354	- 73,310	- 87,300	- 83,209	- 83,209	- 449,560
ค. งบกระแสเงินสดรับสุทธิ	- 121,560	- 172,794	- 311,432	202,289	670,641	906,505	1,040,725	1,099,791	1,099,791	4,413,955
ง. ดุลเงินสดสะสม	- 121,560	- 294,354	- 605,786	- 403,498	267,143	1,173,649	2,214,374	3,314,165	4,413,955	4,413,955

ตารางที่ 4 งบประมาณเงินสดการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการ สายการผลิตหลังการปรับปรุงที่สามารถผลิตได้ 125,000 ชิ้น

ระยะ	ระยะเริ่มต้น			ระยะปรับปรุงกระบวนการ					รวม	
	เดือน	1	2	3	4	5	6	7		8
ก. งบกระแสเงินสดรับ	-	-	-	726,700	1,115,400	1,250,600	1,504,100	1,436,500	1,436,500	7,469,800
1. ผลตอบแทนจากการลดค่าใช้จ่ายจ้างพนักงาน	-	-	-	726,700	1,115,400	1,250,600	1,504,100	1,436,500	1,436,500	7,469,800
ข. งบกระแสเงินสดจ่าย	- 121,560	- 164,344	- 311,432	- 339,538	- 305,242	- 246,368	- 275,522	- 208,856	- 208,856	- 2,181,718
1. การลงทุนปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักร	-	-	-	- 234,250	- 119,590	- 40,950	- 65,520	-	-	- 460,310
2. ค่าจ้างพนักงาน	- 118,300	- 160,550	- 304,200	- 84,500	- 152,100	- 169,000	- 169,000	- 169,000	- 169,000	- 1,495,650
3. ค่าไฟฟ้า	- 3,260	- 3,794	- 7,232	- 20,788	- 33,552	- 36,418	- 41,002	- 39,856	- 39,856	- 225,758
ค. งบกระแสเงินสดรับสุทธิ	- 121,560	- 164,344	- 311,432	387,162	810,158	1,004,232	1,228,578	1,227,644	1,227,644	5,288,082
ง. ดุลเงินสดสะสม	- 121,560	- 285,904	- 597,336	- 210,174	599,984	1,604,216	2,832,794	4,060,438	5,288,082	5,288,082

จากผลการจำลองสถานการณ์สายการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าสายการผลิตหลังการปรับปรุงตามหลักการ ECRS โดยยังไม่เพิ่มจำนวนเครื่องจักรที่ระดับการผลิต 125,000 ชิ้นต่อวัน ใช้จำนวนพนักงานลดลงเหลือ 65 คนต่อวัน เนื่องจากมีการปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายที่เสียไปกับผลตอบแทนที่ได้รับแล้วนั้น พบว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการจ้างพนักงานลงได้เป็นเงิน 4,413,995 บาท ตลอดระยะเวลาโครงการของผลิตภัณฑ์การศึกษาคือ 9 เดือน ดังตารางที่ 3 กระบวนการผลิตมีอัตราผลผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 25 ชิ้นต่อชั่วโมงต่อคน ร้อยละการใช้อรรถประโยชน์โดยรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 42.43 ร้อยละประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 30.38 แต่ยังไม่สามารถผลิตงานได้ตามเป้าหมายความต้องการของลูกค้า เมื่อเพิ่มจำนวนเครื่องจักรให้

สามารถทำการผลิตได้ตามเป้าหมาย พบว่าอัตราผลผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 56 ชิ้นต่อชั่วโมงต่อคน ร้อยละการใช้อรรถประโยชน์โดยรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 86.94 ร้อยละประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 93.42 แต่เนื่องจากจำนวนเครื่องจักรเพิ่มขึ้นเป็น 106 เครื่อง ทั้งนี้เป็นเครื่องจักรที่มีอยู่แล้วในโรงงานกรณีศึกษา จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องจักรใหม่ มีเพียงค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์ภายในเครื่องจักรบางส่วนเท่านั้น เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายที่เสียไปกับผลตอบแทนที่ได้รับแล้วนั้น พบว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการจ้างพนักงานลงได้เป็นเงิน 5,288,082 บาท ตลอดระยะเวลาโครงการของผลิตภัณฑ์การศึกษาคือ 9 เดือน ดังตารางที่ 4

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากปัญหาของสายการผลิตที่นำความร้อนที่มีรอบเวลาทำงานสูง สายการผลิตขาดความสมดุลและไม่สามารถผลิตงานได้ทันตามความต้องการของลูกค้า จึงได้วิเคราะห์ถึงสาเหตุและหาแนวทางแก้ปัญหาเพื่อลดความสูญเปล่า โดยนำเทคนิคปรับปรุงงาน ECRS และการจัดสมดุลสายการผลิตเข้ามาช่วยปรับปรุงกระบวนการและประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ผล ซึ่งผลจากการจำลองก่อนและหลังการปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าสายการผลิตมีผลผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 495.24 สามารถลดจำนวนพนักงานที่ใช้ในสายการผลิตลงได้ร้อยละ 26.58 อัตราผลิตภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 833.33 ค่าอรรถประโยชน์ของกระบวนการเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 254.86 และประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 237.99 สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายตลอดโครงการได้อย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงด้วย ECRS จึงทำให้ขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนลดลงสามารถรวมขั้นตอนการทำงานเข้าด้วยกันได้ รอบเวลาการผลิตงานจึงเร็วขึ้น และการปรับปรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรทำให้สามารถนำเอาเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีอยู่มาทดแทนการทำงานของคนได้ โดยที่พนักงานทำงานได้ง่ายขึ้นไม่จำเป็นต้องทำงานไปที่ละชิ้นอยู่กับเครื่องจักรตลอดเวลา พนักงาน 1 คนสามารถที่จะควบคุมดูแลเครื่องจักรไปพร้อม ๆ กันได้หลายเครื่อง จำนวนพนักงานที่ใช้ในการผลิตจึงลดลงเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เมื่อปัจจัยที่ใช้ในการผลิตทั้งเวลาและทรัพยากรแรงงานลดลงจึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนทรัพยากรในแบบจำลองเพื่อให้เวลาที่ใช้ในการผลิตใกล้เคียงกับเวลาการผลิตที่มีต่อวันมากที่สุดและยังคงสามารถรักษาระดับการผลิตตามความต้องการของลูกค้าได้เท่านั้น ในอนาคตหากประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์นี้กับสายการผลิตใหม่ ๆ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทรัพยากรเพิ่มเติมภายใต้เป้าหมายการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดควรทำ optimization ในการจำลองสถานการณ์หรืออาจนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (math model) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการ (objective function) และข้อกำหนดของสมการเงื่อนไข (constraint) มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน และนอกจากวิธีการปรับปรุงกระบวนการด้วย ECRS แล้วการเพิ่ม

ประสิทธิภาพของสายการผลิตอาจทำได้โดยใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น การเพิ่มความสามารถของเครื่องจักรและบุคลากรในการทำงาน การลดความสูญเปล่าด้วยหลักการลีน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กิจพงษ์ แมดมิ่งเหง้า. การจัดสมดุลสายการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้การจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษา สายการผลิต Head Stack Assembly [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2556.
- [2] ภาวิณี อัยศรีคุณ. การปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตของชุดประกอบสำหรับจับหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2557.
- [3] พีระวิทย์ วันทอง. การวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์ [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2559.
- [4] นุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์, พชร อุไรพงษ์. การวิเคราะห์ปรับปรุงสายการผลิตตามการผลิตแบบลีน โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์. 2556; 1(1): 3-11
- [5] นุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์, นพพล ศรีศิลป์. การประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยระบบคัมบังสำหรับระบบการป้อนวัตถุดิบของโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์. วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์. 2557; 2(1): 16-25
- [6] ธารทิพย์ สุรินทร์. การจัดสมดุลสายการผลิตและกำจัดความสูญเปล่าโดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษา อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สิ่งทอ: [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2555.
- [7] จุฑามาศ โทปุรินทร์. การจัดสมดุลสายการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการสร้างแบบจำลองด้วย [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2554.
- [8] กัณษิรี กิตติภากร. การจัดสมดุลสายการผลิตและการวางแผนทรัพยากรโดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วย

- คอมพิวเตอร์: กรณีศึกษา อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2553.
- [9] ชานนท์ แสงเทียนมงคล. การเพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิตโดยการลดความสูญเปล่าและสมดุลการผลิตด้วยแบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2558.
- [10] ชวิศ บุญมี, ชมพูนุช เกษมเศรษฐ์. การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์สำหรับการจัดลำดับรถบรรทุกแช่แข็งภายใต้นโยบายการจัดลำดับงาน. วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์. 2563; 6(1).
- [11] รัตนา มากเพชร. การเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษา กลุ่มผลิตภัณฑ์บลิสเตอร์ [สารนิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2556.
- [12] รัชต์วัชรณ กาญจนปัญญาคม. การศึกษางานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด ; 2552.
- [13] วันชัย ริจิรวนิช. การศึกษาการทำงาน. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ; 2555.
- [14] บุญบา พุกษาพันธุ์รัตน์. การวางแผนและควบคุมการผลิต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด ; 2552.
- [15] บุญบา พุกษาพันธุ์รัตน์. การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมเดล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2562.