การกำหนดรอบการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและขนาดของสินค้ากันชนที่เหมาะสมภายใต้การล้าสมัยอย่างฉับพลันและการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง

Joint Determination of Preventive Maintenance and Buffer Stock with Sudden Obsolescence and Machine Breakdowns

ศักดิกานต์ พิมพิมูล (Sakdikarn Pimpimool)* กฤตติพัฒน์ ชื่นพิทยาวุฒิ (Krittipat Chuenphitthayavut)**
ฐนวรรธน์ นิยะโมสถ (Thanawath Niyamosoth)[1]***

(Received: *March 12, 2025*; Revised: *May 30, 2025*; Accepted: *May 31, 2025*)

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเครื่องจักรในการผลิตภายใต้การเกิดความขัดข้องเชิงสุ่มและการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบคาบเวลา โดยเครื่องจักรดังกล่าวทำหน้าที่ผลิตชิ้นส่วนเพื่อส่งให้กับขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไป และเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไปจะมีชิ้นส่วนถูกส่งมาอย่างเพียงพอ เครื่องจักรดังกล่าวจึงจะทำการผลิตชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินไว้ใช้ในยามที่เครื่องจักรหยุดทำงานเนื่องจากเกิดความขัดข้องและระหว่างทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีที่รวดเร็วในปัจจุบัน การผลิตชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินไว้มากเกินความจำเป็นจะเป็นการเพิ่มความเสี่ยงที่ชิ้นส่วนนั้นจะเกิดความล้าสมัยหรือตกรุ่นอย่างฉับพลันซึ่งจะก่อให้เกิดต้นทุนสิ้นค้าล้าสมัยให้แก่บริษัท ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณหารอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและขนาดชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินที่เหมาะสมที่จะทำให้ต้นทุนรวมตลอดอายุสินค้าซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสินค้าคงคลัง ต้นทุนการบำรุงรักษา และต้นทุนสินค้าล้าสมัย มีค่าต่ำที่สุด

ABSTRACT

In this work, a production unit subject to random breakdowns and periodic preventive maintenance (PM) is investigated. This production unit is used to produce input for the subsequent production stage. To ensure that the subsequent production stage has sufficient input, a certain amount of buffer amount of buffer stock is produced for use during breakdowns and PM. However, due to the rapid change of technology today, producing excessive buffer stocks increases the risk that those buffer stocks will suddenly become obsolete incurring obsolescence cost to the firm. Therefore, in this paper, we develop a mathematical model to determine the optimal PM period and the optimal size of buffer stock minimizing the total expected cost during the product lifetime. This cost includes inventory-related cost, maintenance cost, and obsolescence cost.

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน สินค้ากันชน การล้าสมัยอย่างฉับพลัน

Keywords: Preventive maintenance, Buffer stock, Sudden obsolescence

[1]*Corresponding author: thanani@kku.ac.th*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*
Student, Master of Engineering Program in Industrial and Logistics Engineering Management, Graduate School, Khon Kaen University
***อาจารย์ สถาบันวิจัยพฤติกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*
Lecturer, Behavioral Science Research Institute, Srinakharinwirot University
****ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*
Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

บทนำ

ปัจจุบัน วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (reliability engineering) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการวางแผนด้านการผลิตและการควบคุมสินค้าคงคลัง ทั้งนี้เนื่องจาก เครื่องจักรในระบบการผลิตสามารถเกิดความขัดข้องได้ตลอดเวลาเนื่องจากอายุและการใช้งาน ซึ่งการเกิดความขัดข้องบ่อยครั้งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (corrective maintenance) และต้นทุนสินค้าขาดแคลนแก่บริษัท โดยทั่วไปแล้ว บริษัทสามารถใช้สองกลยุทธ์หลักในการลดต้นทุนดังกล่าว คือ 1) ทำการผลิตสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัย (safety stock) เพื่อรับมือกับการขาดแคลนสินค้าในระหว่างที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้อง หรือ 2) ทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (preventive maintenance) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ (reliability) ของระบบการผลิตและลดความเสี่ยงของการเกิดความขัดข้องลง [1]

ในอดีตนั้น กลยุทธ์ในการรับมือกับผลกระทบของการเกิดเครื่องจักรขัดข้องทั้งสองกลยุทธ์ข้างต้นได้ถูกศึกษาแยกกัน ต่อมาภายหลังกลยุทธ์ทั้งสองกลยุทธ์ได้ถูกนำมาบูรณาการเข้าด้วยกันและมีการศึกษาต่อยอดอย่างแพร่หลาย โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้ Cheung และ Hausman [2] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหารอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและขนาดของสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัยที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมด้านการบำรุงรักษาและด้านสินค้าคงคลังมีค่าต่ำที่สุด ปัญหาในลักษณะเดียวกันได้ถูกนำไปศึกษาต่อโดย Chelbi และ Ait-Kadi [3] เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณสินค้ากันชน (buffer stock) ส่วนเกินที่เหมาะสมในระบบการผลิตแบบสายการประกอบ Gharbi, Kenne, และ Beit [4] ได้ศึกษาปัญหาดังกล่าวโดยพิจารณาความเป็นไปได้ที่การเกิดความขัดข้องจะเกิดขึ้นระหว่างการผลิตสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัย Chakraborty และ Giri [5] ได้ศึกษาปัญหาในลักษณะเดียวกันในบริบทของการคำนวณหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด (economic production quantity, EPQ) Cheng, Zhou, และ Li [6] ได้นำแนวคิดเรื่องการบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์ (imperfect maintenance) มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง Deiranlou, Dehghanian, และ Pirayesh [7] ได้ศึกษาปัญหาดังกล่าวโดยเพิ่มเงื่อนไขให้สินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัยบางส่วนสามารถซื้อมาจากผู้รับจ้างผลิตภายนอกได้ Niyamosoth และ Pathumnakul [8] และ Niyamosoth และคณะ [1] ได้ศึกษาปัญหาดังกล่าวโดยกำหนดเงื่อนไขให้เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตได้รับมาโดยการเช่า

งานวิจัยที่กล่าวไปทั้งหมดข้างต้นมีจุดประสงค์เพื่อคำนวณหารอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและปริมาณสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัยหรือปริมาณสินค้ากันชนส่วนเกินที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมด้านการบำรุงรักษาและด้านสินค้าคงคลังมีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม ด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีที่รวดเร็วในปัจจุบัน ทำให้สินค้าสำเร็จรูปหรือชิ้นส่วนที่ผลิตออกมามีความเสี่ยงที่จะล้าสมัยหรือตกรุ่นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะก่อให้เกิดต้นทุนสินค้าล้าสมัย (obsolescence cost) แก่บริษัท ซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่ปริมาณสินค้าคงคลังล้าสมัยที่มีอยู่และมูลค่าของสินค้าล้าสมัยที่ขายได้ ดังนั้นในการวางแผนด้านการผลิตจึงควรพิจารณาความน่าจะเป็นที่สินค้าที่ผลิตออกมาจะเกิดความล้าสมัยขึ้น โดยเฉพาะความล้าสมัยที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน (sudden obsolescence) ซึ่งจะทำให้มูลค่าของสินค้าคงคลังที่มีอยู่ลดลงอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดต้นทุนสินค้าล้าสมัยอย่างสูงแก่บริษัท หรือในกรณีที่รุนแรงมาก การล้าสมัยอย่างฉับพลันของสินค้าอาจทำให้ธุรกิจถึงแก่การล่มสลายลงเลยก็ได้ ตัวอย่างหนึ่งที่ชัดเจนก็คือกรณีของโทรศัพท์มือถือ BlackBerry ซึ่งครั้งหนึ่งเคยเป็นหนึ่งในผู้นำด้านโทรศัพท์มือถือชนิดสมาร์ทโฟน โดยมีส่วนแบ่งทางการตลาดทั่วโลกถึง 20% ในปี 2009 แต่กลับสูญเสียส่วนแบ่งทางการตลาดให้กับโทรศัพท์สมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบ Android และ iOS อย่างรวดเร็ว เมื่อเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนเปลี่ยนจากระบบปุ่มกดไปเป็นแบบจอสัมผัส จึงทำให้ BlackBerry เหลือส่วนแบ่งทางการตลาดทั่วโลกเพียง 0.3% ในปี 2015 และต้องปิดตัวลงในเวลาต่อมา [9]

โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ได้นำประเด็นเรื่องการเกิดความล้าสมัยอย่างฉับพลันมาพิจารณาในปัญหาด้านการวางแผนและควบคุมสินค้าคงคลังได้แก่ Masters [10] ซึ่งได้ทำการเพิ่มต้นทุนสินค้าล้าสมัยเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองการหา

ขนาดการสั่งซื้อที่ประหยัด (economic order quantity, EOQ) ซึ่งภายหลัง Prathumthip และ Niyamosoth [11] ได้นำเอาแนวคิดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการคำนวณหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด Emsermann และ Simon [12] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาขนาดการสั่งซื้อและจุดสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับสินค้าที่มีความต้องการไม่แน่นอนและมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลัน Barron [13] ได้ศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยของ Master [10] โดยได้เพิ่มเงื่อนไขเรื่องการคืนสินค้าของลูกค้าเข้าไปในแบบจำลอง

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้แนวคิดเรื่องการเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันในปัญหาการวางแผนและควบคุมสินค้าคงคลัง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมิได้พิจารณาประเด็นเรื่องความเป็นไปได้ที่เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตจะเกิดความขัดข้องขึ้นระหว่างการผลิต ซึ่งจะส่งผลต่อทั้งปริมาณที่ต้องผลิต ปริมาณสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัย หรือสินค้ากันชนส่วนเกินที่ต้องผลิตเพิ่มเพื่อรับมือต่อการขาดแคลนสินค้าในระหว่างที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น Niyamosoth, Pathumnakul, และ Prathumthip [14] จึงได้ทำการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยของ Prathumthip และ Niyamosoth [11] โดยนำทั้งประเด็นเรื่องการเกิดความขัดข้องระหว่างการผลิตและความน่าจะเป็นที่จะเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันของสินค้ามาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด ซึ่งภายหลังแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกพัฒนาต่อยอดโดย Khurimon และ Niyamosoth [15]

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ จะเป็นการศึกษาระบบการผลิตแบบสายการผลิต ซึ่งชิ้นส่วนที่ผลิตได้ในขั้นตอนการผลิตหนึ่งจะกลายไปเป็นชิ้นส่วนนำเข้าของขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไป โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสามารถเกิดความขัดข้องเชิงสุ่มได้ และเมื่อเครื่องจักรเกิดความขัดข้องจะต้องมีการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข เพื่อซ่อมแซมเครื่องจักรที่ขัดข้องให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ การลดความเสี่ยงของการเกิดเครื่องจักรขัดข้องสามารถกระทำได้โดยการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบคาบเวลา (periodic preventive maintenance) โดยจะทำการหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามคาบเวลาคงที่ที่กำหนดไว้ และเพื่อที่จะทำให้มั่นใจว่าระบบการผลิตจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องไม่หยุดชะงัก ชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินจำนวนหนึ่งจะถูกผลิตไว้หลังจากการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเสร็จสิ้นและเริ่มรอบการผลิตใหม่ทุกครั้ง โดยชิ้นส่วนกันชนเหล่านี้จะถูกดึงมาใช้ส่งต่อให้ขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไปเมื่อเครื่องจักรเกิดความขัดข้องและต้องทำการซ่อมแซมหรือเมื่อต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามรอบเวลา นอกจากนี้ เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาจะเกิดความล้าสมัยอย่างฉับพลัน งานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาความน่าจะเป็นที่สินค้าจะเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันในแบบจำลองด้วย โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณหารอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและขนาดชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินที่เหมาะสมที่จะทำให้ต้นทุนรวมตลอดอายุสินค้าซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสินค้าคงคลัง ต้นทุนการบำรุงรักษา และต้นทุนสินค้าล้าสมัย มีค่าต่ำที่สุด

วิธีการวิจัย

1. แนวคิดของปัญหา

รูปแบบของกระบวนการผลิตในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นแบบสายการผลิต แบบเดียวกันกับที่ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Chelbi และ Ait-Kadi [3] โดยชิ้นส่วนที่ผลิตได้ในขั้นตอนการผลิตหนึ่งจะกลายไปเป็นชิ้นส่วนนำเข้าของขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไป โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสามารถเกิดความขัดข้องเชิงสุ่มได้ ซึ่งจะต้องมีการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข เพื่อซ่อมแซมเครื่องจักรที่ขัดข้องให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ นอกจากนี้ เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดความขัดข้องของเครื่องจักร จึงกำหนดให้มีการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วยคาบเวลาคงที่ T, 2T, 3T,... และเพื่อที่จะบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องจักรหยุดทำงานในระหว่างเกิดความขัดข้องหรือระหว่างการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินจำนวน S หน่วยจะถูกผลิตเผื่อเอาไว้เพื่อทำให้มั่นใจว่าระบบการผลิตทั้งหมดจะสามารถ

ดำเนินดำเนินต่อไปได้ไม่หยุดชะงัก โดยชิ้นส่วนกันชนดังกล่าวจะถูกดึงมาใช้และถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไป ซึ่งจะทำให้ระบบการผลิตทั้งหมดยังดำเนินต่อไปได้ด้วยอัตราคงที่ β หน่วย/เดือน กำหนดให้อัตราการผลิตชิ้นส่วนกันชนมีค่าเท่ากับ α หน่วย/เดือน ดังนั้น ในช่วงต้นของรอบการผลิต เครื่องจักรจะต้องทำการผลิตชิ้นส่วนด้วยอัตรา $\alpha+\beta$ หน่วย/เดือน โดยการผลิตชิ้นส่วนกันชนดังกล่าวจะกระทำทันทีหลังจากการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเสร็จสิ้นและเริ่มรอบการผลิตใหม่ทุกครั้ง โดยขนาดของชิ้นส่วนกันชนจำนวน S หน่วยที่ผลิตออกมาจะต้องมากเพียงพอที่จะครอบคลุมปริมาณความต้องการของสินค้าที่เกิดขึ้นในระหว่างการซ่อมเครื่องจักรภายในช่วงเวลา T หลังการเริ่มรอบการผลิตใหม่แต่ละรอบเป็นอย่างน้อย และ ณ เวลา T เครื่องจักรจะถูกบังคับให้หยุดทำงานเพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่ง ณ เวลานี้ ชิ้นส่วนกันชนจำนวนหนึ่งจะต้องเหลืออยู่เพื่อป้องกันไม่ให้ขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไปขาดแคลนชิ้นส่วนในการผลิตในระหว่างการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

นอกจากประเด็นเรื่องการผลิตชิ้นส่วนกันชนส่วนเกิน การซ่อมแซมเครื่องจักรเมื่อเกิดความขัดข้อง และการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแล้ว แบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มประเด็นการเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันของสินค้าเข้าไปในแบบจำลองด้วย โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ผลิตมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการล้าสมัยหรือตกรุ่นอย่างฉับพลันขึ้น ณ เวลาใดๆ ซึ่งจะก่อให้เกิดต้นทุนสินค้าล้าสมัยแก่บริษัทเท่ากับ C_O \$/หน่วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยชิ้นนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดที่กล่าวไปทั้งหมดข้างต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรตัดสินใจสองตัวคือ ขนาดของชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินที่ต้องผลิต (S) และรอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (T) ที่ทำให้ต้นทุนรวมตลอดอายุสินค้าซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสินค้าคงคลัง ต้นทุนการบำรุงรักษา และต้นทุนสินค้าล้าสมัย มีค่าต่ำที่สุด

2. สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ มีดังต่อไปนี้

1) การเกิดความขัดข้องของเครื่องจักร ระยะเวลาการซ่อม ระยะเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลัน เป็นเหตุการณ์เชิงสุ่มที่ทราบการกระจายทางความน่าจะเป็น

2) การทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข เป็นชนิดการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย (minimal repair) เพื่อให้เครื่องจักรที่เกิดการขัดข้องสามารถกลับมาใช้งานได้ แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรหลังการซ่อม กล่าวคือ อัตราการเกิดความขัดข้อง (failure rate) ของเครื่องจักรหลังการซ่อมแซมจะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดความขัดข้องของเครื่องจักรก่อนการซ่อมแซม ณ เวลาที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้อง

3) การทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นแบบสมบูรณ์ (perfect maintenance) กล่าวคือ เครื่องจักรหลังการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันจะมีระดับความน่าเชื่อถือเทียบเท่าเครื่องจักรใหม่ กล่าวคือ อัตราการเกิดความขัดข้องของเครื่องจักรหลังการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันจะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดความขัดข้องของเครื่องจักรใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งาน

4) ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินขนาด S มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน T กล่าวคือ $T \gg S/\alpha$ ซึ่งภายในระยะเวลานี้สมมติว่าเครื่องจักรไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้น

5) เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมแซม (mean time to repair, MTTR) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาเฉลี่ยในการเกิดความขัดข้องแต่ละครั้ง (mean time between failure, MTBF)

6) ต้นทุนต่อหน่วยต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองทราบค่าและมีค่าคงที่

7) อัตราความต้องการสินค้า β และอัตราการผลิตชิ้นส่วนกันชน α มีค่าคงที่

8) โดยปกติแล้วอายุของเครื่องจักรและการปรับปรุงสภาพของเครื่องจักรก่อนนำไปใช้งานจะมีผลต่อระดับความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร อย่างไรก็ตาม เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและเพิ่มความสะดวกในการคำนวณ ในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงสมมติให้เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเป็นเครื่องจักรใหม่

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยชิ้นนี้มีดังต่อไปนี้

3.1 การคำนวณหาต้นทุนการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการผลิต

ในกรณีของเครื่องจักรใหม่และการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเป็นการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย เราจะสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังของจำนวนครั้งของการเกิดความขัดข้องที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา (0, T) ได้จากสมการต่อไปนี้ [1]

$$E[N(T)] = \Lambda_0(T) = \int_0^T \lambda_0(t)dt\,, \qquad (1)$$

โดย $\lambda_0(t)$ คือ ฟังกชันอัตราการเกิดความขัดข้อง (failure rate function) กรณีที่ไม่ได้มีการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และ $\Lambda_0(T)$ เป็นฟังกชันความเข้มข้นสะสมของการเกิดความขัดข้องกรณีที่ไม่ได้มีการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน กำหนดให้ต้นทุนเฉลี่ยในการซ่อมแซมต่อครั้งมีค่าเท่ากับ C_f เราจะสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังของต้นทุนการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการผลิตได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[TC_f(T)] = C_f\Lambda_0(T). \qquad (2)$$

3.2 การคำนวณหาต้นทุนการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขึ้นในหนึ่งรอบการผลิต

ในการผลิตแต่ละรอบ เครื่องจักรที่ทำการผลิตชิ้นส่วนจะถูกบังคับให้หยุดทำงาน ณ เวลา T เพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยในกรณีของเครื่องจักรใหม่และการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขที่ผ่านมาก่อนเวลา T เป็นการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย เราจะสามารถคำนวณหาต้นทุนการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขที่ขึ้นในหนึ่งรอบการผลิต ($C_p(T)$) ได้จากสมการต่อไปนี้ [16]

$$C_p(T) = a+b\lambda_0(T), \qquad (3)$$

โดย $a > 0$ เป็นต้นทุนคงที่ในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และ $b > 0$ เป็นต้นทุนผันแปรต่อขนาดของอัตราการเกิดความขัดข้องที่ลดลงหลังการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ณ เวลา T ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ $\lambda_0(T)$

3.3 การคำนวณหาต้นทุนการถือครองชิ้นส่วนกันชนในหนึ่งรอบการผลิต

ในการคำนวณหาต้นทุนการถือครองสินค้ากันชนในหนึ่งรอบการผลิต เราจำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงของระดับชิ้นส่วนกันชนในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งรอบการผลิต โดย ณ เวลาเริ่มต้น ชิ้นส่วนกันชนขนาด S จะถูกผลิตขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยอัตรา α โดยใช้เวลาในการผลิตชิ้นส่วนกันชนดังกล่าวเท่ากับ S/α (ดู Zone I ในรูปที่ 1 ประกอบ) หลังจากนั้นปริมาณของชิ้นส่วนกันชนจะมีค่าคงที่เท่ากับ S ไปจนกว่าจะเกิดความขัดข้อง (ดู Zone IV ในรูปที่ 1 ประกอบ) ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรใหม่และการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเป็นการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย เราจะสามารถคำนวณหาเวลาเฉลี่ยในการเกิดความขัดข้องแต่ละครั้ง (MTBF) ภายในช่วงเวลา (0,T) ได้จากสมการต่อไปนี้ [17]

$$MTBF = \frac{T}{E[N(T)]} = \frac{T}{\Lambda_0(T)}. \qquad (4)$$

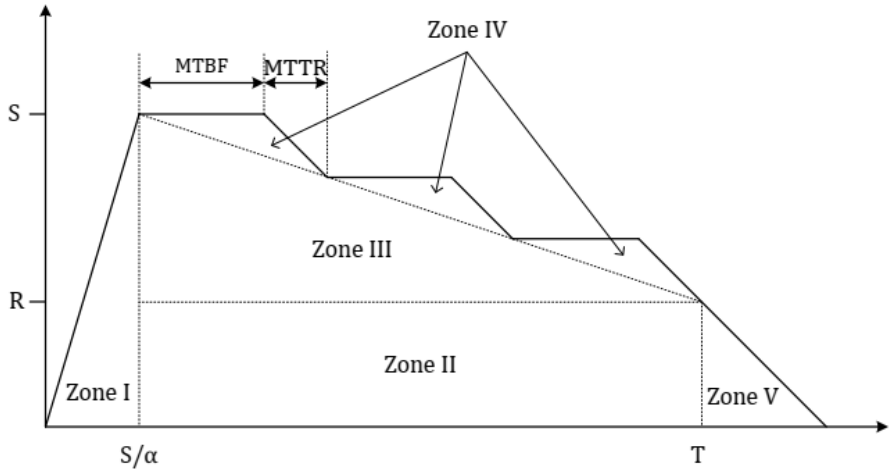
หลังจากที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องก็จะมีการทำการซ่อมแซม โดยกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมเป็นตัวแปรสุ่ม y ที่มีฟังกชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น g(y) และมีฟังกชันการแจกแจงสะสม G(y) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อม (MTTR) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$MTTR = E[y] = \int_0^\infty yg(y)dy = \int_0^\infty (1-G(y))dy. \qquad (5)$$

โดยในระหว่างที่ทำการซ่อมแซม เครื่องจักรจะหยุดทำงาน และชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินที่ผลิตไว้จะถูกดึงมาใช้ส่งต่อไปยังขั้นตอนการผลิตในลำดับถัดไปด้วยอัตราคงที่ β เพื่อทำให้สายการผลิตยังคงดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ระดับของชิ้นส่วนกันชน S ลดลงด้วยอัตรา β ทุกๆครั้งที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องและทำการซ่อมแซม (ดู Zone IV ในรูปที่ 1 ประกอบ) โดยเหตุการณ์การเกิดเครื่องจักรขัดข้องแต่ละครั้งด้วยเวลาเฉลี่ยเท่ากับ MTTR และการซ่อมแซมเครื่องจักรด้วยเวลาเฉลี่ยในการซ่อมเท่ากับ MTTR จะเกิดขึ้นตลอดเวลาภายในช่วงเวลา (0, T) และที่เวลา T เครื่องจักรจะถูกบังคับให้หยุดทำงานเพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ซึ่ง ณ เวลา T นี้ระดับของชิ้นส่วนกันชนที่เหลืออยู่จะมีค่าเท่ากับ R ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยสมการต่อไปนี้

$$R = S - E[N(T)]\beta MTRR. \qquad (6)$$

โดยชิ้นส่วนกันชนจำนวน R ที่เหลืออยู่นี้จะถูกดึงมาใช้ส่งต่อไปยังขั้นตอนการผลิตลำดับถัดไปด้วยอัตราคงที่ β ในระหว่างที่เครื่องจักรถูกบังคับให้หยุดทำงานเนื่องจากการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (ดู Zone V ในภาพที่ 1 ประกอบ) โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับชิ้นส่วนกันชนในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามที่กล่าวไปข้างต้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของระดับชิ้นส่วนกันชนในช่วงเวลาต่างๆในหนึ่งรอบการผลิต

จากภาพที่ 1 เราสามารถทำการคำนวณหาค่าคาดหวังของปริมาณชิ้นส่วนกันชนที่ถือครองในหนึ่งรอบการผลิตได้ โดยการคำนวณหาผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ Zone I ถึง Zone V และเมื่อนำมาคูณกับต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลังต่อหน่วยต่อเวลา h เราจะได้ค่าคาดหวังของต้นทุนการถือครองชิ้นส่วนกันชนในหนึ่งรอบการผลิต ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจ T และ S ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$E[HC(T,S)] = \frac{hS^2}{2\alpha} + hR\left(T - \frac{S}{\alpha}\right) + \frac{h\left(T-\frac{S}{\alpha}\right)(S-R)}{2} + \frac{hR^2}{2\beta} + \frac{h\beta(MTBF)(MTTR)\Lambda_0(T)}{2}, \qquad (7)$$

โดย $\Lambda_0(T) = \int_0^T \lambda_0(t)dt$ ในเทอมสุดท้ายของสมการที่ (7) เป็นค่าประมาณของจำนวนครั้งของการเกิดความขัดข้องในช่วงเวลา $(S/\alpha, T)$ ในกรณีที่การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเป็นการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย และเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมเฉลี่ยมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาเฉลี่ยในการเกิดความขัดข้องแต่ละครั้ง ภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้นในช่วงเวลา $(0, S/\alpha)$

3.4 การคำนวณหาต้นทุนสินค้าขาดแคลนในหนึ่งรอบการผลิต

ในหนึ่งรอบการผลิต สินค้าขาดแคลนจะเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน z ยาวนานกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ชิ้นส่วนกันชน R ที่เหลืออยู่ ณ เวลา T ถูกใช้หมดไปด้วยอัตรา β กำหนดให้ $\eta(R, z)$ เป็นตัวแปรสุ่มที่แทนจำนวนครั้งของการเกิดสินค้าขาดแคลนในหนึ่งรอบการผลิต เราสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังของ $\eta(R,z)$ ได้โดยสมการต่อไปนี้ [1]

$$E[\eta(R,z)] = \beta \int_{R/\beta}^{\infty} (z-R/\beta)h(z)dz, \quad (8)$$

โดย h(z) คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของระยะเวลาในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน z กำหนดให้ π เป็นต้นทุนสินค้าขาดแคลนต่อหน่วยสินค้าโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาที่เกิดสินค้าขาดแลน ค่าคาดหวังของต้นทุนสินค้าขาดแคลนที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการผลิตสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[SC(T,S)]=\pi E[\eta(R,z)]. \quad (9)$$

3.5 การคำนวณหาต้นทุนรวมในหนึ่งรอบการผลิต

ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในหนึ่งรอบการผลิต (total cycle costs) สามารถหาได้จากผลบวกของต้นทุนต่างๆ ในหนึ่งรอบการผลิตซึ่งได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งได้แก่ต้นทุนด้านการบำรุงรักษา ต้นทุนการถือครองชิ้นส่วนกันชน และต้นทุนสินค้าขาดแคลน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[TCC(T,S)] = E[TC_f(T)]+C_p(T)+E[HC(T,S)]+E[SC(T,S)]. \quad (10)$$

3.5 การคำนวณหาความยาวของรอบการผลิต

ค่าคาดหวังของความยาวของรอบการผลิตแต่ละรอบ (cycle length) จะประกอบด้วยค่า T ที่กำหนดไว้บวกกับค่าคาดหวังของระยะเวลาในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน E[z] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [1]

$$E[CL(T)] = T+E[z] = T+ \int_0^{\infty} zh(z)dz. \quad (11)$$

3.4 การคำนวณหาระยะเวลาเฉลี่ยในการเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลัน

ระยะเวลาเฉลี่ยในการการเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันสามารถหาได้จากค่าคาดหวังของช่วงเวลาตลอดอายุของสินค้า (product lifetime) E[L] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Master [10] โดยกำหนดให้ช่วงเวลาตลอดอายุของสินค้ามีการแจกแจงแบบ exponential ซึ่งสามารถหาค่าคาดหวังของช่วงเวลาตลอดอายุของสินค้าได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[L]= \frac{1}{\phi}, \quad (12)$$

โดย ϕ คือค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบ exponential ซึ่งแสดงอัตราการเกิดสินค้าล้าสมัยต่อเวลา โดยเราสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังจำนวนรอบของการผลิต E[NC(T)] ที่เกิดขึ้นทั้งหมดก่อนการเกิดเหตุการณ์สินค้าล้าสมัยอย่างฉับพลันได้จาก สมการต่อไปนี้

$$E[NC(T)] = \frac{E[CL(T)]}{E[L]}. \quad (13)$$

3.5 การคำนวณหาต้นทุนสินค้าล้าสมัย

อ้างอิงจากงานวิจัยของ Masters [10] ค่าคาดหวังต้นทุนสินค้าล้าสมัย E[OC(T,S)] ที่เกิดขึ้นในหนึ่งช่วงอายุของสินค้าสามารถคำนวณได้จากผลคูณของต้นทุนสินค้าล้าสมัยต่อหน่วย C_O กับปริมาณสินค้าคงคลังที่ถือครองโดยเฉลี่ย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[OC(T,S)] = C_O \frac{E[HC(T,S)]}{hE[CL(T)]}, \quad (14)$$

โดย C_O สามารถคำนวณได้จากผลต่างของมูลค่าของชิ้นส่วนก่อนเกิดเหตุการณ์สินค้าล้าสมัยอย่างฉับพลันกับมูลค่าที่ขายออกไปได้หลังจากเกิดเหตุการณ์สินค้าล้าสมัยอย่างฉับพลัน

3.6 การคำนวณหาต้นทุนรวมตลอดช่วงอายุของสินค้า

ค่าคาดหวังของต้นทุนรวม (total costs) ตลอดช่วงอายุของสินค้าสามารถหาได้จากผลบวกของต้นทุนด้านสินค้าคงคลังและการบำรุงรักษาทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุของสินค้ากับต้นทุนสินค้าล้าสมัย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[TC(T,S)] = E[NC(T)]E[TCC(T,S)]+E[OC(T,S)], \quad (15)$$

ซึ่ง E[TC(T,S)] ในสมการที่ (15) นี้จะเป็นฟังกชันเป้าหมาย (objective function) ของงานวิจัยชิ้นนี้

3.6 การกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ T และ S

ในการกำหนดเงื่อนไข (constraints) ของตัวแปรตัดสินใจ S ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจาก Niyamosoth และคณะ [1] คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนกันชน S จะต้องน้อยกว่า T นั่นคือ $S/\alpha < T$ หรือ $S < \alpha T$ และ S ต้องมีขนาดมากพอที่จะครอบคลุมปริมาณความต้องการที่เกิดขึ้นในช่วงการทำการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขได้ นั่นคือ $S > E[N(T)]\beta MTTR$ ส่วนเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ T เพื่อไม่ให้การคำนวณยุ่งยากเกินไป เราจะกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ T ไว้กว้างๆว่าต้องเป็นค่าใดๆก็ได้ที่มากกว่าศูนย์แต่ไม่เกินค่าคาดหวังของช่วงเวลาตลอดอายุของสินค้า นั่นคือ $0 < T < E[L]$

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากฟังกชันเป้าหมายและเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } Z = E[TC(T, S)]. \quad (16)$$

Subject to

$$E[NT(T)]\beta MTTR < S < \alpha T \text{ และ } 0 < T < E[L]. \quad (17)$$

3.8 การกำหนดค่าและฟังกชันต่างๆที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง

ค่าต่างๆรวมถึงฟังกชันที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยชิ้นนี้จะอ้างอิงจาก Niyamosoth และ Pathumnakul [8] และ Niyamosoth และคณะ [1] ดังต่อไปนี้

(i) ฟังกชันอัตราการเกิดความขัดข้องกรณีไม่มีการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน $\lambda_0(t)$ กำหนดให้เป็นแบบ Weibull ที่มีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) ω และพารามิเตอร์มาตราส่วน (scale parameter) θ ดังต่อไปนี้

$$\lambda_0(t) = \frac{\omega}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\omega-1}, \; t \geq 0, \; \omega = 2, \; \theta = 0.5642, \quad (18)$$

โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำให้การเกิดความขัดข้องเป็นฟังกชันเพิ่มแบบเชิงเส้น (linearly increasing function) และมีระยะเวลาเฉลี่ยในการเกิดความขัดข้องความขัดข้องครั้งแรก (mean time to failure, MTTF) ประมาณ 0.5 เดือน

(ii) ฟังกชันการแจกแจงของระยะเวลาในการซ่อม กำหนดให้เป็นแบบ exponential ที่มีพารามิเตอร์กำหนดอัตราการซ่อม μ ดังต่อไปนี้

$$G(y) = 1-e^{-\mu y} \text{ และ } g(y) = \mu e^{-\mu y}, \; y \geq 0, \; \mu = 200, \quad (19)$$

ซึ่งการกำหนดค่าดังกล่าวจะทำให้เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแต่ละครั้งมีค่าประมาณ 4 ชั่วโมง

(iii) ฟังกชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของระยะเวลาในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน กำหนดให้เป็นแบบ exponential ที่มีพารามิเตอร์กำหนดอัตราการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน γ ดังต่อไปนี้

$h(z) = \gamma e^{-\gamma z}$, $z \geq 0$, $\gamma = 25$, (20)

ซึ่งการกำหนดค่าดังกล่าวจะทำให้เวลาเฉลี่ยในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมีค่าประมาณ 1 วัน

(iv) ต้นทุนต่อหน่วยและค่าอื่นๆที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้ C_f = \$2,500 ต่อครั้ง a = \$100 ต่อครั้ง b = \$50 ต่อหน่วยของอัตราการเกิดความขัดข้องที่ลดลง h = \$1 ต่อชิ้นต่อเดือน π = \$2 ต่อชิ้น β = 28,800 ชิ้นต่อเดือน α = 7,200 ชิ้นต่อเดือน ϕ = 0.2 ครั้งต่อปี C_O = \$10 ต่อชิ้น

ผลการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเป็นชนิดการโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear programming) ซึ่งโดยปกติแล้ว การจะหาคำตอบที่ดีที่สุดชนิด global minimum ของปัญหาชนิดนี้ได้นั้น จะต้องพิสูจน์ให้ได้เสียก่อนว่าฟังก์ชันเป้าหมายมีลักษณะเป็น convex function อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมายในงานวิจัยชิ้นนี้มีความซับซ้อนสูงมาก การพิสูจน์ convexity จึงไม่อาจทำได้โดยง่าย ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นจึงมุ่งเพียงหาค่าที่เหมาะสมที่สุดชนิด local minimum เท่านั้น ซึ่งถึงแม้ว่าฟังก์ชันเป้าหมายในงานวิจัยชิ้นนี้จะมีความซับซ้อนสูง แต่เนื่องจากปัญหาเป็นปัญหาขนาดเล็กที่มีตัวแปรตัดสินใจเพียง 2 ตัวคือ T และ S การแก้ไขปัญหาจึงสามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถแก้ไขปัญหาชนิด nonlinear optimization ได้ ซึ่งมีอยู่มากมายในท้องตลาด ยกตัวอย่างเช่น optimtool ในโปรแกรม MATLAB หรือโปรแกรม Mathematica เป็นต้น ซึ่งจากการทดสอบทางตัวเลขพบว่าระยะเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสม T^* มีค่าประมาณ 0.2759 เดือน ซึ่งน้อยกว่าค่า MTTF ที่ประมาณ 0.5 เดือน ซึ่งหมายความว่าบริษัทมีแนวโน้มที่จะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันก่อนที่เครื่องจักรจะเกิดความขัดข้องและหยุดทำงานครั้งแรก นอกจากนี้ยังพบว่าหากต้นทุนในการซ่อมแซม C_f มีค่าสูงขึ้น คาบเวลาในการในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสม T^* จะมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงบริษัทมีแนวโน้มจะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันถี่ขึ้นเมื่อต้นทุนในการซ่อมแซมมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบทางตัวเลข ณ ค่า C_f ต่างๆ

C_f (\$)	T^* (months)	S^* (units)	$E[TC(T^*,S^*)]$ (\$)
1,000	0.4481	1,242.85	281,263.53
2,500	0.2759	1,186.44	368,376.67
4,000	0.2110	1,172.13	426,464.30
5,000	0.1746	1,165.79	471,211.86
7,000	0.1616	1,163.82	508,691.12

นอกจากนี้ จากผลทดสอบทางตัวเลขในตารางที่ 1 พบว่าค่าที่ขนาดชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินที่เหมาะสม S^* มีค่าประมาณ 1,186.44 หน่วย อย่างไรก็ตามจากการทดสอบทางตัวเลขพบว่า เมื่อต้นทุนสินค้าล้าสมัยต่อหน่วย C_O มีค่าเพิ่มขึ้น S^* จะมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลทดสอบทางตัวเลข ณ ค่า C_O ต่างๆ

C_O ($)	T^* (months)	S^* (units)	E[TC(T^*,S^*)] ($)
10	0.2759	1,186.44	368,376.67
20	0.2712	1,185.28	376,684.64
50	0.2567	1,181.81	401,184.45
100	0.2306	1,176.05	440,371.60
150	0.2005	1,170.19	476,859.71

จากตารางที่ 2 พบว่าบริษัทมีแนวโน้มผลิตชิ้นส่วนกันชนส่วนเกิน S^* ลดลงเมื่อต้นทุนสินค้าล้าสมัยต่อหน่วย C_O มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหากพิจารณาดูค่า S^* จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย คือลดลงประมาณ 16.25 หน่วยหรือคิดเป็น 1.37% เมื่อ C_O เปลี่ยนจาก $10 ต่อหน่วยไปเป็น $150 ต่อหน่วย อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่า E[TC(T^*,S^*)] จะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากคือประมาณ $108,483.04 หรือประมาณ 29.45% จึงสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีเหตุการณ์สินค้าล้าสมัยเกิดขึ้น การผลิตสินค้าคงคลังส่วนเกินแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้นทุนสินค้าล้าสมัยต่อหน่วยมีค่าสูงมาก

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนกันชนส่วนเกินและรอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขของการเกิดสินค้าล้าสมัย โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ผลรวมของต้นทุนด้านการบำรุงรักษา ต้นทุนด้านสินค้าคงคลัง และต้นทุนสินค้าล้าสมัย ตลอดช่วงอายุของสินค้า มีค่าต่ำที่สุด แบบจำลองที่ได้เป็นชนิดการโปรแกรมไม่เชิงเส้นที่มีตัวแปรตัดสินใจเพียงสองตัวคือขนาดของชิ้นส่วนกันชนและรอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ซึ่งสามารถหาคำตอบได้โดยง่ายโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป อย่างไรก็ดี เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมายมีความซับซ้อนสูงมาก การทดสอบ convexity ของฟังกชันเป้าหมายจึงมีความยากเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นคำตอบที่ได้ในงานวิจัยนี้จึงเป็นชนิด local minimum เท่านั้น

ผลการทดสอบเชิงตัวเลขในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้มุมมองที่น่าสนใจบางประการ ประการแรก เมื่อต้นทุนการซ่อมแซมความขัดข้องมีค่าเพิ่มขึ้น บริษัทมีแนวโน้มที่จะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วยความถี่มากขึ้น โดยคาบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมักจะมีค่าน้อยกว่าเวลาเฉลี่ยในการเกิดความขัดข้องครั้งแรก กล่าวคือ บริษัทมักจะไม่รอให้เครื่องจักรเกิดความขัดข้องขึ้นก่อนแล้วจึงจะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน แต่มีแนวโน้มที่จะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันไว้ก่อนเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดเครื่องจักรขัดข้องขึ้นในระหว่างการผลิตมากกว่า ประการที่สอง หากต้นทุนสินค้าล้าสมัยมีค่าสูงขึ้นบริษัทมักมีแนวโน้มผลิตชิ้นส่วนกันชนด้วยขนาดที่เล็กลง และยังพบว่าขนาดชิ้นส่วนกันชนที่ผลิตมากขึ้นเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ต้นทุนรวมตลอดอายุของสินค้าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในกรณีที่ต้นทุนสินค้าล้าสมัยมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าบริษัทไม่ควรผลิตชิ้นส่วนกันชนมากเกินไปหากชิ้นส่วนนั้นมีมูลค่าสูงและมีความเสี่ยงที่จะมีการล้าสมัยหรือตกรุ่นขึ้นได้ในอนาคต

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปศึกษาต่อยอดได้ในหลายทางในอนาคต หนึ่งในแนวทางศึกษาที่เป็นไปได้ คือ การศึกษากรณีที่เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเป็นเครื่องจักรเก่าที่เคยผ่านการใช้งานมาแล้ว ซึ่งมีต้องการปรับปรุงสภาพเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรก่อนนำใช้ในการผลิต ซึ่งผู้วิจัยจะได้นำไปเป็นแนวทางในการศึกษาต่อยอดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Niyamosoth T, Yoshimoto K, Ohmori S, Sureeyatanapas P, Arunyanart S, Nakrachata-amon T. An integrated model of preventive maintenance and safety stock for a used production unit under leasing. Eng Appl Sci Res. 2021;48(4):456-65. Available from: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/243175
2. Cheung KL, Hausman WH. Joint determination of preventive maintenance and safety stocks in an unreliable production environment. Nav Res Logist. 1997;44:257-72. Available from: https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6750(199704)44:3<257::AID-NAV2>3.0.CO;2-7
3. Chelbi A, Ait-Kadi D. Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance. Eur J Oper Res. 2004;156:712-8. Available from: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00254-6
4. Gharbi A, Kenne JP, Beit M. Optimal safety stocks and preventive maintenance periods in unreliable manufacturing systems. Int J Prod Econ. 2007;107:422-34. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.018
5. Cheng GQ, Zhou BH, Li L. Joint optimisation of buffer size and preventive maintenance for a deteriorating upstream machine. Int J Syst Sci Oper Logist. 2015;2:199-210. Available from: https://doi.org/10.1080/23302674.2015.1018366
6. Chakraborty T, Giri BC. Joint determination of optimal safety stocks and production policy for an imperfect production system. Appl Math Model. 2012;36:712-22. Available from: https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.07.012
7. Deiranlou M, Dehghanian F, Pirayesh MA. The simultaneous effect of holding safety stock and purchasing policies on the economic production quantity model subject to random machine breakdown. Int J Eng. 2019;32:1643-55. Available from: https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.11b.16
8. Niyamosoth T, Pathumnakul S. Joint determination of preventive maintenance and buffer stock for a production unit under lease. J Ind Eng Manag. 2018;11:497-512. Available from: https://doi.org/10.3926/jiem.2578
9. Muthukumar R, Ramakrishnan L, Krishnamacharyulu CSG. Turnaround of BlackBerry. Int J Manag Cases. 2017;19(4):4-21. Available from: https://www.circleinternational.co.uk/wp-content/uploads/2021/01/19.4.pdf
10. Masters JM. A note on the effect of sudden obsolescence on the optimal lot size. Decis Sci. 1991;22(5):1080-6. Available from: https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1991.tb01915.x

11. Prathumthip S, Niyamosoth T. Production lot sizing for multiple products with sudden obsolescence. In: Proceedings of IE Network Conference; 2015 Aug 6-7; Bangkok, Thailand. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2015. Thai. Available from: https://sites.google.com/a/silpakorn.edu/ienet2015/
12. Emsermann M, Simon B. Optimal control of an inventory with simultaneous obsolescence. Interfaces. 2007;37(5):445-54. Available from: https://doi.org/10.1287/inte.1070.0304
13. Barron Y. An order-revenue inventory model with returns and sudden obsolescence. Oper Res Lett. 2018;46(1):88-92.
14. Niyamosoth T, Pathumnakul S, Prathumthip S. Production lot sizing problem with sudden obsolescence and machine breakdown. KKU Eng J. 2016;43:504-8. Available from: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/72628
15. Khurimon P, Niyamosoth T. Production lot sizing problem with sudden obsolescence and machine breakdowns considering repair time. Eng J CMU. 2019;26(2):167-78. Thai. Available from: https://www.thaiscience.info/view_content.asp?id=10990905
16. Jaturonnatee J, Murthy DNP, Boondiskulchok R. Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs. Eur J Oper Res. 2006;174:201-15. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.049
17. Ebeling CE. An introduction to reliability and maintainability engineering. 2nd ed. Illinois: Waveland Press; 2010.