บทความวิจัย

# นโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่สำหรับการซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขในหลายเครื่องจักรที่มีอัตราการเกิดชำรุดแตกต่างกัน

วิสุทธิ์ สุพิทักษ์* และ มนตรี ฉัตรจินดากุล
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1689 5500 อีเมล: fengwsst@ku.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.07.003
รับเมื่อ 3 ธันวาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2564 ตอบรับเมื่อ 8 มีนาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 21 กรกฎาคม 2564
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยทำการกำหนดนโยบายเติมเต็มที่เหมาะสมสำหรับวัสดุคงคลังอะไหลในงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขของระบบที่มีหลายเครื่องจักรซึ่งมีค่าเฉลี่ยการเกิดชำรุดแตกต่างกัน การชำรุดของแต่ละเครื่องจักรมีการใช้วัสดุคงคลังอะไหล่ชนิดเดียวกันด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน นโยบายเติมเต็มที่นำเสนอเป็นการคำนวณปริมาณเติมเต็มที่เหมาะสมสำหรับแต่ละรอบเวลาเติมเต็มซึ่งถูกกำหนดไว้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุ ต้นทุนถือครอง ต้นทุนเสื่อมสภาพ และต้นทุนขาดแคลนวัสดุ จากลักษณะของนโยบายการสั่งซื้อตามรอบเวลา ปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับวัสดุคงคลังสูงสุดและระดับวัสดุคงคลังคงเหลือที่ช่วงเวลาสั่งเติมเต็ม ระดับวัสดุคงคลังสูงสุดถูกกำหนดจากความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุที่เหมาะสมซึ่งคำนวณโดยการหาอนุพันธ์ของสมการต้นทุนรวม คำตอบที่ได้จากตัวแบบการคำนวณที่นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลที่ระดับแตกต่างกันของสามปัจจัยประกอบด้วย จำนวนเครื่องจักร (2 ระดับ) ต้นทุนการขาดแคลนวัสดุ (3 ระดับ) และอัตราชำรุด (3 ระดับ) จากผลการทดสอบปัญหา 18 กรณี ตัวแบบการคำนวณที่นำเสนอให้คำตอบเดียวกับการจำลองสถานการณ์ทุกกรณี โดยระดับวัสดุคงคลังสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ระดับสูงขึ้นของแต่ละปัจจัย

**คำสำคัญ**: วัสดุคงคลัง นโยบายเติมเต็ม อะไหล่ การซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข

การอ้างอิงบทความ: วิสุทธิ์ สุพิทักษ์ และ มนตรี ฉัตรจินดากุล, "นโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่สำหรับการซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขในหลายเครื่องจักรที่มีอัตราการเกิดชำรุดแตกต่างกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 113–126, ม.ค.–มี.ค. 2566.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 33 ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2566
*The Journal of KMUTNB., Vol. 33, No. 1, Jan.–Mar. 2023*

Research Article

# Inventory Replenishment Policy for Corrective Maintenance Spare Part Inventory of Multiple Machines with Different Failure Rates

Wisut Supithak* and Montree Chatjindakul
Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1689 5500, E–mail: fengwsst@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.07.003
Received 3 December 2020; Revised 2 February 2021; Accepted 8 March 2021; Published online: 21 July 2021
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**Abstract**

The research is to determine the proper replenishment policy for corrective maintenance spare part inventory of multiple machines with different failure rates. All failure machines require the same type of spare part but with different quantities. The objective is to evaluate proper replenishment quantity, at a predetermined time between orders, such that the total cost composed of item cost, holding cost, depreciation cost, and shortage cost is minimized. From the characteristic of fixed order interval model, the replenishment quantity is the difference between the maximum inventory level and the inventory stock position at the time of placing the order. The maximum inventory level is ascertained according to the optimal probability of stock out determined by taking the derivative of the total system cost function. The result obtained from the proposed model is compared to the result yielded from the Monte Carlo simulation model at different levels of three factors: the number of machines (2 levels), the shortage costs (3 levels), and the failure rates (3 levels). According to the study result, both proposed calculation model and Monte Carlo simulation model suggest the same values of maximum inventory level for all 18 different problem cases. The maximum inventory level tends to increase at higher level of each factor.

**Keywords**: Inventory, Replenishment Policy, Spare Part, Corrective Maintenance

Please cite this article as: W. Supithak and M. Chatjindakul, "Inventory replenishment policy for corrective maintenance spare part inventory of multiple machines with different failure rates," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 113–126, Jan.–Mar. 2023 (in Thai).

**1. บทนำ**

เครื่องจักรเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต การบำรุงรักษาเครื่องจักรให้สามารถใช้การได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกิจกรรมที่จะต้องถูกพิจารณาดำเนินการอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปนโยบายการซ่อมบำรุงเครื่องจักรสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ การซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance; CM) การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance; PM) และการซ่อมบำรุงตามสภาพ (Condition Based Maintenance; CBM) ทั้งนี้การซ่อมบำรุงทั้งสามประเภทมีข้อดี และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน [1] การซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขเป็นการซ่อมแซมเครื่องจักรให้กลับมาใช้งานได้ภายหลังจากที่เครื่องจักรเกิดการชำรุดแล้ว ซึ่งถูกพิจารณาได้ว่ามีการใช้งานชิ้นส่วนอะไหล่ของเครื่องจักรได้เต็มอายุการใช้งาน จึงมีการใช้อะไหล่ทดแทนจำนวนน้อยลง แต่การที่ไม่สามารถคาดเดาเหตุการณ์ชำรุดล่วงหน้า สามารถก่อให้เกิดปัญหาเครื่องจักรหยุดเป็นระยะเวลานาน จากการเตรียมงานซ่อมบำรุง หรือการรอคอยอะไหล่ทดแทนที่ไม่ได้จัดเตรียมไว้ ลักษณะดังกล่าวแตกต่างจากการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ซึ่งเป็นการวางแผนกิจกรรมเปลี่ยนอะไหล่เครื่องจักรตามรอบระยะเวลาที่กำหนดเพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายของเครื่องจักร จึงมีค่าใช้จ่ายจากการหยุดเครื่องจักร และการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานที่ถูกผลิตจากเครื่องจักรชำรุดเสียหายน้อยลง อย่างไรก็ตาม การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีข้อจำกัดในเรื่องอรรถประโยชน์การใช้อะไหล่เครื่องจักรลดลง เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนอะไหล่เครื่องจักรตามระยะเวลา เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการจัดทำการซ่อมบำรุงตามสภาพ ซึ่งเป็นการตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องจักร เช่น การสั่นสะเทือน ความร้อน หรือเสียงขณะเครื่องจักรทำงาน เพื่อเป็นการพิจารณาจัดทำการซ่อมบำรุงก่อนที่เครื่องจักรจะเกิดการชำรุดเสียหาย ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการซ่อมบำรุงตามระยะเวลานั้น การซ่อมบำรุงตามสภาพมีแนวโน้มอรรถประโยชน์การใช้งานอะไหล่มากขึ้น แต่อาจมีโอกาสเกิดเครื่องจักรชำรุดเสียหายก่อนการซ่อมบำรุงได้มากกว่า ซึ่งจะต้องดำเนินการซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขต่อไป

การเกิดขึ้นของอุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่ซึ่งถูกใช้ในงานซ่อมบำรุงแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน โดยอุปสงค์ที่เกิดขึ้นในงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และการซ่อมบำรุงตามสภาพซึ่งเป็นการเปลี่ยนอะไหล่ก่อนเกิดการชำรุดเสียหายของเครื่องจักรนั้น ภายหลังจากที่ได้มีการกำหนดแผนการซ่อมบำรุงชัดเจนแล้ว อุปสงค์อะไหล่ที่เกิดขึ้นจัดเป็นอุปสงค์ที่ทราบปริมาณ และช่วงเวลาการใช้ล่วงหน้า สำหรับงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขซึ่งมีอุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่เกิดขึ้นภายหลังจากเครื่องจักรเกิดการชำรุด ไม่สามารถทราบปริมาณ และช่วงเวลาการใช้วัสดุคงคลังอะไหล่ที่แน่นอนชัดเจนได้ การบริหารจัดการวัสดุคงคลังประเภทอะไหล่ซ่อมบำรุง สำหรับกรณีการซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขจึงมีความซับซ้อนสูงขึ้น การขาดแคลนวัสดุคงคลังอะไหล่เมื่อเครื่องจักรเกิดการชำรุดส่งผลให้ความสามารถในการตอบสนองความต้องการในการผลิตลดลง เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการจัดหาอะไหล่เร่งด่วน และเกิดการสูญเสียความน่าเชื่อถือของระบบ ในทำนองกลับกัน หากจำนวนวัสดุคงคลังอะไหล่ถูกเก็บไว้มากเกินไปอาจก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการถือครองสูง เกิดค่าเสียโอกาสจากต้นทุนจมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ศักยภาพในการแข่งขันขององค์กรลดลง

โดยทั่วไปนโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังที่เหมาะสมสำหรับแต่ละระบบ มักมีความแตกต่างกันตามลักษณะของอุปสงค์ ตัวแบบพื้นฐานในการเติมเต็มวัสดุคงคลัง ได้แก่ ตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัด (Economic Order Quantity Model; EOQ) ซึ่งถูกนำเสนอโดย [2] มีสมมุติฐานของลักษณะอุปสงค์คงที่ และต่อเนื่อง เป็นการเติมเต็มเมื่อระดับวัสดุคงคลังมีค่าเท่ากับจุดสั่งซื้อใหม่ โดยมีปริมาณสั่งเติมเต็มคงที่ซึ่งคำนวณจากจุดสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อและค่าใช้จ่ายในการถือครอง การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวแบบ EOQ ได้ถูกนำเสนอโดย [3] สำหรับกรณีที่อุปสงค์มีลักษณะไม่ต่อเนื่องและทราบค่าอุปสงค์ในแต่ละช่วงเวลาชัดเจน (Known Discrete Demand) ซึ่งมีรูปแบบคล้ายคลึงกับอุปสงค์อะไหล่ซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และอะไหล่ซ่อมบำรุงตามสภาพที่มีการกำหนดแผนซ่อมบำรุงไว้ล่วงหน้านั้น [4] ได้นำเสนอตัวแบบโปรแกรมพลวัติ (Dynamic Programming)

สำหรับการกำหนดนโยบายเติมเต็มที่เหมาะสม ในกรณีที่ไม่มีการขาดแคลนวัสดุคงคลัง เพื่อลดค่าใช้จ่ายรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุคงคลัง ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนถือครอง ทั้งนี้เพื่อหาคำตอบที่ดีสำหรับปัญหาดังกล่าวในระยะเวลาอันสั้น [5] ได้นำเสนอตัวแบบฮิวริสติก (Heuristic) โดยพิจารณาการลดต้นทุนแปรผันต่อคาบเวลา งานวิจัย [6] ได้ทำการศึกษานโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่ประเภทเดียวที่ถูกใช้ในงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขสำหรับเครื่องจักรที่มีอายุการใช้งานจำกัด โดยพัฒนาสมการคำนวณอุปสงค์เฉลี่ยของอะไหล่ซ่อมบำรุงทั้งสองประเภท ในระยะเวลาการใช้งานของเครื่องจักร เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของสมการค่าใช้จ่ายรวม ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนสินค้า ต้นทุนการสั่งซื้อ และต้นทุนถือครอง แล้วทำการหาอนุพันธ์ของสมการดังกล่าว ทั้งนี้ [7] ได้เพิ่มเติมการพิจารณาแผนการผลิตร่วมกับแผนการซ่อมบำรุง โดยตัวแบบการกำหนดแผนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคงคลัง และกระบวนการผลิตซึ่งถูกเสนอโดย [8] ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการเสื่อมสภาพของระบบเพื่อกำหนดแผนการซ่อมบำรุง และการสั่งอะไหล่ที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะที่อุปสงค์อะไหล่ไม่แน่นอน [9] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองมอนติคาร์โลเพื่อเปรียบเทียบนโยบายเติมเต็มที่แตกต่างกัน งานวิจัย [10] ได้นำเสนอนโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่สำหรับงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขในโรงงานอุตสาหกรรมเส้นด้าย โดยประยุกต์ใช้ตัวแบบเติมเต็มเมื่อถึงจุดสั่งซื้อ และตัวแบบเติมเต็มตามรอบเวลาเมื่ออุปสงค์ไม่แน่นอน สำหรับอะไหล่ซ่อมบำรุงในกลุ่มที่มีความเคลื่อนไหวเร็ว มูลค่าการใช้สูง และมีความสำคัญ ซึ่งการคำนวณระดับวัสดุคงคลังเผื่อจากตัวแบบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ มีสุมมติฐานการแจกแจงอุปสงค์อะไหล่เป็นแบบปกติ ทั้งนี้สมมุติฐานดังกล่าวอาจมีความเหมาะสมน้อยลงเมื่ออุปสงค์การใช้งานอะไหล่ไม่สูง เนื่องจากโดยทั่วไปอุปสงค์อะไหล่ที่มีจำนวนเป็นชิ้นเป็นตัวแปรสุ่มชนิดไม่ต่อเนื่อง แต่การแจกแจงแบบปกตินั้น เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง ซึ่งถูกใช้ได้ในการประมาณการแจกแจงอุปสงค์เมื่อค่าเฉลี่ยอุปสงค์มีค่ามากเท่านั้น สำหรับกรณีอุปสงค์อะไหล่ซ่อมบำรุงที่มีจำนวนเป็นชิ้น และมีค่าน้อย สมมุติฐานการแจกแจงของอุปสงค์ที่ถูกพิจารณาว่ามีความเหมาะสมกับลักษณะอุปสงค์วัสดุคงคลังดังกล่าว คือ การแจกแจงแบบปัวซง (Poisson Distribution) [11] ทั้งนี้อุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่มีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดชำรุด และระยะเวลาระหว่างการเกิดชำรุดของเครื่องจักร ในทฤษฎีความน่าเชื่อถือ ระยะเวลาดังกล่าวมักถูกพิจารณาว่าเป็นการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution) [12] ซึ่งเป็นส่วนกลับของการแจกแจงแบบปัวซง สำหรับกรณีที่ทราบความน่าจะเป็นที่แต่ละค่าของจำนวนครั้งการเกิดเครื่องจักรชำรุดในแต่ละคาบเวลา [13] ได้นำเสนอการคำนวณปริมาณเติมเต็มวัสดุงคงคลังอะไหล่ซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขโดยพิจารณาค่าคาดหวังของค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดจากการวิเคราะห์ตารางตัดสินใจ (Decision Table) งานวิจัยได้แสดงตัวอย่างการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับระบบที่ประกอบด้วยสองเครื่องจักร และมีคาบเวลาที่พิจารณาสองคาบเวลา อย่างไรก็ตามการคำนวณดังกล่าวจะมีความยุ่งยากซับซ้อน เมื่อระบบมีจำนวนเครื่องจักร และจำนวนคาบเวลาที่ต้องพิจารณามากขึ้น เนื่องจากต้องทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละทางเลือกสำหรับแต่ละเหตุการณ์ชำรุด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษานโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่สำหรับงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขของระบบที่มีเครื่องจักรหลายเครื่องซึ่งมีอัตราเฉลี่ยการเกิดชำรุดแตกต่างกัน การชำรุดของแต่ละเครื่องจักรมีความต้องการใช้อะไหล่ชนิดเดียวกันด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการกำหนดปริมาณเติมเต็มที่เหมาะสมสำหรับแต่ละรอบเวลาเติมเต็มที่ถูกกำหนดไว้ เพื่อลดต้นทุนรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุคงคลัง ต้นทุนการถือครอง ต้นทุนการเสื่อมสภาพ และต้นทุนการขาดแคลนวัสดุคงคลัง ตัวแบบการคำนวณปริมาณเติมเต็มที่นำเสนอถูกพัฒนาจากตัวแบบวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis) สำหรับปัญหาการสั่งซื้อวัสดุคงคลังครั้งเดียว (Single Order Quantity) [14] ทั้งนี้ปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่ถูกกำหนดจากความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังที่เหมาะสมซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบต่ำที่สุด

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 คุณลักษณะของปัญหาในงานวิจัย

งานวิจัยพิจารณาระบบที่มีเครื่องจักรหลายเครื่อง ($M_1$, $M_2$, …, $M_3$) แต่ละเครื่องจักรมีการเกิดชำรุดเป็นอิสระต่อกัน โดยจำนวนครั้งการเกิดชำรุดของเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลามีการแจกแจงแบบปัวซงด้วยค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดชำรุดที่แตกต่างกัน (ระยะเวลาระหว่างการชำรุดแต่ละครั้งของแต่ละเครื่องจักรถูกพิจารณาได้ว่ามีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล) การซ่อมแซมเครื่องจักรที่เกิดชำรุด มีการใช้วัสดุคงคลังอะไหล่ชนิดเดียวกัน แต่จำนวนอะไหล่ที่ใช้แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการคำนวณปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละคาบเวลาเติมเต็มที่กำหนดไว้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุคงคลังอะไหล่ ต้นทุนการถือครอง ต้นทุนการเสื่อมสภาพ และต้นทุนการขาดแคลนวัสดุคงคลังอะไหล่ ทั้งนี้จากลักษณะของนโยบายเติมเต็มตามรอบเวลา ปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังในแต่ละรอบสามารถคำนวณได้จากผลต่างของระดับวัสดุคงคลังสูงสุด (Maximum Inventory Level; $L_{max}$) และระดับวัสดุคงคลังที่มีในระบบช่วงเวลาสั่งเติมเต็ม โดยวัสดุคงคลังอะไหล่คงเหลือของแต่ละรอบเวลาเติมเต็มสามารถมีมูลค่าเท่าเดิมหรือลดลงจากการเสื่อมสภาพ การขาดแคลนวัสดุคงคลังอะไหล่ในแต่ละรอบเวลาถูกพิจารณาเป็นการสั่งซื้อทันที ซึ่งเกิดเป็นค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อเร่งด่วน (Expedite Cost) คุณลักษณะของปัญหาในงนวิจัยสามารถแสดงได้ดังตัวอย่าง

2.1.1 ตัวอย่างแสดงคุณลักษณะปัญหาในงานวิจัย

กำหนดให้วัสดุคงคลังอะไหล่ A ถูกใช้ในงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขสำหรับระบบที่มีเครื่องจักรสามเครื่อง เครื่องจักรแต่ละเครื่องมีจำนวนครั้งของการเกิดชำรุดในแต่ละช่วงเวลาแจกแจงแบบปัวซงด้วยค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดชำรุดแตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยอัตราการเกิดชำรุด และอุปสงค์ของอะไหล่จากการชำรุดของแต่ละครั้งของแต่ละเครื่องจักรแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 โดยมีต้นทุนที่เกี่ยวข้อง คือ ต้นทุนวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 8,000 บาทต่อชิ้น ต้นทุนการสั่งซื้อวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 4,000 บาทต่อครั้ง ค่าสัดส่วนถือครองวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 0.25 (คิดเป็นต้นทุนการถือครองวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 8,000 × 0.25 / 12 = 166.67 บาทต่อชิ้นต่อเดือน) ต้นทุนการเสื่อมสภาพวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 800 บาทต่อชิ้นต่อเดือน และต้นทุนการขาดแคลนวัสดุคงคลังเท่ากับ 12,000 บาทต่อชิ้น การเติมเต็มวัสดุคงคลังประเภทอะไหล่ดังกล่าวเป็นนโยบายการเติมตามรอบเวลา โดยระยะเวลาระหว่างการเติมเต็มเป็นรอบหนึ่งเดือน

**ตารางที่ 1** อัตราการชำรุดเฉลี่ยของเครื่องจักรและอุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่จากการชำรุด

| เครื่องจักร | อัตราชำรุดเฉลี่ย (ครั้ง/ปี) | อุปสงค์อะไหล่ (ชิ้น/ครั้ง) |
|---|---|---|
| $M_1$ | 4 | 2 |
| $M_2$ | 5 | 2 |
| $M_3$ | 2 | 1 |

คำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับปัญหาดังกล่าว คือ การกำหนดระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุด $L_{max}$ = 5 ชิ้น (คำตอบดังกล่าว อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด) ซึ่งจำนวนเติมเต็มวัสดุหรือจำนวนวัสดุซื้อเข้าในแต่ละรอบคำนวณได้จาก ระดับวัสดุคงคลังสูงสุด (5 ชิ้น) ลบด้วยจำนวนวัสดุคงคลังคงเหลือของปลายคาบเวลาก่อนหน้า

จากตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยอัตราการเกิดชำรุดต่อเดือนสำหรับเครื่องจักร $M_1$, $M_2$ และ $M_3$ มีค่าเท่ากับ $\frac{4}{12}, \frac{5}{12}$ และ $\frac{2}{12}$ ครั้ง ตามลำดับ หากกำหนดให้ ในระยะเวลา 12 เดือน มีจำนวนเหตุการณ์ชำรุดซึ่งส่งผลให้เกิดอุปสงค์อะไหล่ A ในแต่ละเดือนของแต่ละเครื่องจักรเป็นดังตารางที่ 2 (ทั้งนี้จำนวนครั้งการเกิดชำรุดในแต่ละเดือนของแต่ละเครื่องจักรสามารถสุ่มค่าได้จากการสร้างตัวเลขสุ่มที่มีค่าในช่วง [0, 1] เพื่อใช้แทนความน่าจะเป็น และใช้ฟังก์ชันการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในการหาระยะเวลาระหว่างการเกิดชำรุดครั้งปัจจุบันและครั้งถัดไปโดยสอดคล้องกับความน่าจะเป็นจากตัวเลขสุ่มดังกล่าว ซึ่งจากค่าระยะเวลาระหว่างการชำรุดทำให้ทราบว่าการชำรุดเกิดในคาบเวลาใด ซึ่งส่งผลให้ทราบจำนวนครั้งการเกิดชำรุดในแต่ละคาบเวลาได้) จากคำตอบ

ที่กำหนดค่า $L_{max}$ = 5 ชิ้น และค่าอุปสงค์รวมของอะไหล่ในตารางที่ 2 สามารถจำลองสถานการณ์การเติมเต็มวัสดุคงคลังในระยะเวลา 12 เดือน ได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งมีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการวัสดุคงคลังอะไหล่ต่อปี ประกอบด้วย ต้นทุนอะไหล่เท่ากับ 240,000 บาท ต้นทุนการถือครองเท่ากับ 5,833.33 บาท ต้นทุนการเสื่อมสภาพเท่ากับ 28,000 บาท ต้นทุนการขาดแคลนเท่ากับ 12,000 บาท และมูลค่าอะไหล่คงเหลือปลายเดือนที่ 12 เท่ากับ 40,000 บาท คิดเป็นต้นทุนรวมการจัดการวัสดุคงคลังอะไหล่เท่ากับ 245,833.33 บาทต่อปี

**ตารางที่ 2** อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ A ที่คำนวณได้จากเหตุการณ์เครื่องจักรชำรุด

| เดือนที่ | จำนวนครั้งของการชำรุด | | | อุปสงค์รวมของอะไหล่ A (ชิ้น) |
|---|---|---|---|---|
| | เครื่องจักร $M_1$ | เครื่องจักร $M_2$ | เครื่องจักร $M_3$ | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 1) = 1 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | (2 × 1) + (2 × 1) + (1 × 0) = 4 |
| 3 | 1 | 2 | 0 | (2 × 1) + (2 × 2) + (1 × 0) = 6 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | (2 × 1) + (2 × 0) + (1 × 0) = 2 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 1) = 1 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | (2 × 0) + (2 × 1) + (1 × 0) = 2 |
| 7 | 0 | 2 | 0 | (2 × 0) + (2 × 2) + (1 × 0) = 4 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | (2 × 1) + (2 × 0) + (1 × 0) = 2 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 0) = 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 0) = 0 |
| 11 | 1 | 1 | 0 | (2 × 1) + (2 × 1) + (1 × 0) = 4 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 0) = 0 |

**2.2 คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ**

$E_i$ คือ เหตุการณ์ชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$ ($i$ = 1, 2, ..., $n$)

$N_i$ คือ จำนวนครั้งของการชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$ ในแต่ละคาบเวลา

$\lambda_i$ คือ ค่าเฉลี่ยการชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$

$m_i$ คือ อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ต่อครั้งเมื่อเกิดการชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$

$x$ คือ จำนวนเต็มบวกแทนจำนวนครั้งของการชำรุด

$P[N_i]$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$ จำนวน $N_i$ ครั้งในแต่ละคาบเวลา

$E(N_1, N_2,\ldots,N_n)$ คือ เหตุการณ์ชำรุดที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลาที่มีเครื่องจักรชำรุดจำนวน $n$ เครื่อง โดยการชำรุดของเครื่องจักร $M_1, M_2,\ldots,M_n$ เกิดขึ้นจำนวน $N_1, N_2,\ldots,N_n$ ครั้ง ตามลำดับ เช่น $E(0,1,0)$ หมายถึง เหตุการณ์ที่มีรูปแบบการชำรุดเกิดขึ้นบนเครื่องจักร 3 เครื่อง โดยเครื่องจักร $M_1$, $M_2$ และ $M_3$ มีการชำรุดเกิดขึ้น 0, 1 และ 0 ครั้ง ในแต่ละคาบเวลาตามลำดับ

$P[E(N_1, N_2,\ldots,N_n)]$ คือ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ชำรุด $E(N_1, N_2,\ldots,N_n)$ ที่เกิดขึ้น

$m[E(N_1, N_2,\ldots,N_n)]$ คือ อุปสงค์อะไหล่จากเหตุการณ์ชำรุด $E(N_1, N_2,\ldots,N_n)$ ที่เกิดขึ้น

$TC$ คือ ต้นทุนรวมในแต่ละคาบเวลา (บาท)

$C$ คือ ต้นทุนวัสดุคงคลังต่อหน่วย (บาทต่อชิ้น)

$S$ คือ ต้นทุนการสั่งซื้อวัสดุคงคลังต่อครั้ง (บาทต่อครั้ง)

$A$ คือ ต้นทุนขาดแคลนวัสดุคงคลังต่อชิ้น (บาทต่อชิ้น)

$H$ คือ ต้นทุนการถือครองวัสดุต่อชิ้นต่อคาบเวลา (บาทต่อชิ้นต่อคาบเวลา)

$K$ คือ ต้นทุนการเสื่อมสภาพของวัสดุต่อชิ้นต่อคาบเวลา (บาทต่อชิ้นต่อคาบเวลา)

$Q$ คือ ปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละคาบเวลา (ชิ้น)

$D$ คือ อุปสงค์ของวัสดุคงคลังต่อคาบเวลา (ชิ้น)

$L_{max}$ คือ ระดับวัสดุคงคลังสูงสุด สำหรับใช้อ้างอิงเพื่อคำนวณปริมาณเติมเต็ม (ชิ้น)

**ตารางที่ 3** สถานการณ์จำลองระบบการเติมเต็มวัสดุคงคลังในระยะเวลา 12 เดือนของปัญหาตัวอย่าง

| เดือน | จำนวนอะไหล่ต้นเดือน (ชิ้น) | จำนวนอะไหล่ซื้อเข้า (ชิ้น) | อุปสงค์อะไหล่ (ชิ้น) | จำนวนอะไหล่สั่งซื้อด่วน (ชิ้น) | จำนวนอะไหล่ปลายเดือน (ชิ้น) | ต้นทุนการจัดการวัสดุคงคลัง | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | ต้นทุนอะไหล่ (บาท) | ต้นทุนถือครอง (บาท) | ต้นทุนเสื่อมสภาพ (บาท) | ต้นทุนขาดแคลน (บาท) |
| 1 | 5 | 0 | 1 | 0 | 4 | 40,000 | 666.67 | 3,200 | 0 |
| 2 | 4 | 1 | 4 | 0 | 1 | 8,000 | 166.67 | 800 | 0 |
| 3 | 1 | 4 | 6 | 1 | 0 | 32,000 | 0.00 | 0 | 12,000 |
| 4 | 0 | 5 | 2 | 0 | 3 | 40,000 | 500.00 | 2,400 | 0 |
| 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 4 | 16,000 | 666.67 | 3,200 | 0 |
| 6 | 4 | 1 | 2 | 0 | 3 | 8,000 | 500.00 | 2,400 | 0 |
| 7 | 3 | 2 | 4 | 0 | 1 | 16,000 | 166.67 | 800 | 0 |
| 8 | 1 | 4 | 2 | 0 | 3 | 32,000 | 500.00 | 2,400 | 0 |
| 9 | 3 | 2 | 0 | 0 | 5 | 16,000 | 833.33 | 4,000 | 0 |
| 10 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 833.33 | 4,000 | 0 |
| 11 | 5 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 166.67 | 800 | 0 |
| 12 | 1 | 4 | 0 | 0 | 5 | 32,000 | 833.33 | 4,000 | 0 |
| | | | | | รวม (บาท) | 240,000 | 5,833.33 | 28,000 | 12,000 |

### 2.3 การคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ชำรุดในแต่ละคาบเวลา

จากคุณลักษณะที่ระบบประกอบด้วยหลายเครื่องจักรที่มีการชำรุดเกิดขึ้นเป็นอิสระต่อกัน ในแต่ละคาบเวลาเครื่องจักรสามารถเกิดการชำรุดได้มากกว่าหนึ่งเครื่องโดยแต่ละเครื่องจักรสามารถเกิดการชำรุดได้มากกว่าหนึ่งครั้ง ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ชำรุดของเครื่องจักรที่ $i$ จำนวน $x$ ครั้ง ในแต่ละคาบเวลา ($P[N_i = x]$) สามารถคำนวณได้โดยฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปัวซงที่มีค่าเฉลี่ยของการชำรุดเป็น $\lambda_i$ ตามสมการที่ (1)

$$P[N_i = x] = \frac{e^{-\lambda_i}\lambda_i^{x}}{x!} \quad (1)$$

หากพิจารณาตัวอย่างแสดงคุณลักษณะของปัญหาที่มีอัตราการชำรุดและปริมาณความต้องการวัสดุเป็นไปตามตารางที่ 1 สามารถแสดงการคำนวณความน่าจะเป็นตามจำนวนครั้งของการชำรุด 0 ถึง 6 ครั้งในหนึ่งเดือนของแต่ละเครื่องจักรด้วยสมการที่ (1) แสดงดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ความน่าจะเป็นตามจำนวนครั้งของการชำรุด 0 ถึง 6 ครั้งในหนึ่งเดือนของแต่ละเครื่องจักร

| จำนวนการชำรุดต่อเดือน ($x$) | ความน่าจะเป็นของการชำรุด | | |
|---|---|---|---|
| | เครื่องจักร $M_1$ ($\lambda_1 = \frac{4}{12}$ ครั้งต่อเดือน) | เครื่องจักร $M_2$ ($\lambda_1 = \frac{5}{12}$ ครั้งต่อเดือน) | เครื่องจักร $M_3$ ($\lambda_1 = \frac{2}{12}$ ครั้งต่อเดือน) |
| 0 | 0.7165 | 0.6592 | 0.8465 |
| 1 | 0.2388 | 0.2747 | 0.1411 |
| 2 | 0.0398 | 0.0572 | 0.0118 |
| 3 | 0.0044 | 0.0079 | 0.0007 |
| 4 | 0.0004 | 0.0008 | 0.0000 |
| 5 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 |
| 6 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

พิจารณา $E(N_1, N_2,\ldots,N_n)$ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ชำรุดที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลาของเครื่องจักร $M_1, M_2,\ldots,M_n$ โดยมีการชำรุดจำนวน $N_1, N_2,\ldots,N_n$ ครั้ง ตามลำดับ ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ชำรุดที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลา ($P[E(N_1, N_2,\ldots,N_n)]$) คำนวณได้ด้วยการคูณกันของ

ความน่าจะเป็นของแต่ละการชำรุดที่เกิดขึ้นจากทั้งหมด $n$ รูปแบบ ดังสมการที่ (2)

$$P[E(N_1, N_2, ..., N_n)] = \Pi_{(i=1)}^{n} P[N_i] \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ชำรุดในตัวอย่างแสดงคุณลักษณะของปัญหาที่มีเครื่องจักรจำนวนสามเครื่อง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5

### 2.4 การคำนวณอุปสงค์และความน่าจะเป็นของอุปสงค์ในแต่ละคาบเวลา

กำหนดให้ $m_i$ คือ อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ต่อครั้งของการชำรุดของเครื่องจักร $M_i$ ค่าอุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่จากเหตุการณ์ชำรุด $E(N_1, N_2,\ldots,N_n)$ ในแต่ละคาบเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$m[E(N_1, N_2, ..., N_n)] = \Sigma_{(i=1)}^{n} m_i N_i \quad (3)$$

ผลการคำนวณความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ชำรุด และอุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่ของแต่ละเหตุการณ์ชำรุดจากตัวอย่างแสดงคุณลักษณะของปัญหา แสดงได้ดังตารางที่ 6 ซึ่งสามารถสรุปเป็นความน่าจะเป็นของอุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่แต่ละค่าได้ดังตารางที่ 7 ทั้งนี้สังเกตได้ว่าความน่าจะเป็นของอุปสงค์แต่ละค่าเกิดจากผลรวมของความน่าจะเป็นทุกเหตุการณ์ที่มีอุปสงค์ค่านั้น เช่น ความน่าจะเป็นที่อุปสงค์มีค่าเท่ากับ 2 เกิดจากผลรวมค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ชำรุด E(0,0,2) E(0,1,0) และ E(1,0,0)

**ตารางที่ 5** ความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ชำรุดในหนึ่งคาบเวลา

| เหตุการณ์ชำรุด | ความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ชำรุด |
|---|---|
| $E(0,0,0)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.8465 = 0.3998 |
| $E(0,0,1)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.1411 = 0.0666 |
| $E(0,0,2)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.0118 = 0.0056 |
| $E(0,0,3)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.0007 = 0.0003 |
| $E(0,0,4)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.0000 = 0.0000 |
| $E(0,0,5)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.0000 = 0.0000 |
| $E(0,0,6)$ | 0.7165 × 0.6592 × 0.0000 = 0.0000 |
| $E(0,1,0)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.8465 = 0.1666 |
| $E(0,1,1)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.1411 = 0.0278 |
| $E(0,1,2)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.0118 = 0.0023 |
| $E(0,1,3)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.0007 = 0.0001 |
| $E(0,1,4)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.0000 = 0.0000 |
| $E(0,1,5)$ | 0.7165 × 0.2747 × 0.0000 = 0.0000 |
| ⋮ | ⋮ |
| $E(6,6,6)$ | 0.0000 × 0.0000 × 0.0000 = 0.0000 |

**ตารางที่ 6** อุปสงค์รวมของวัสดุคงคลังอะไหล่และความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ชำรุด

| เหตุการณ์ชำรุด $E(N_1, N_2, N_3)$ | ความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ชำรุด $P[E(N_1, N_2, N_3)]$ | อุปสงค์รวมของวัสดุคงคลังอะไหล่ A (ชิ้น) $m[E(N_1, N_2, N_3)]$ |
|---|---|---|
| $E(0,0,0)$ | 0.3998 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 0) = 0 |
| $E(0,0,1)$ | 0.0666 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 1) = 1 |
| $E(0,0,2)$ | 0.0056 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 2) = 2 |
| $E(0,0,3)$ | 0.0003 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 3) = 3 |
| $E(0,0,4)$ | 0.0000 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 4) = 4 |
| $E(0,0,5)$ | 0.0000 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 5) = 5 |
| $E(0,0,6)$ | 0.0000 | (2 × 0) + (2 × 0) + (1 × 6) = 6 |
| $E(0,1,0)$ | 0.1666 | (2 × 0) + (2 × 1) + (1 × 0) = 2 |
| $E(0,1,1)$ | 0.0278 | (2 × 0) + (2 × 1) + (1 × 1) = 3 |
| $E(0,1,2)$ | 0.0023 | (2 × 0) + (2 × 1) + (1 × 2) = 4 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| $E(6,6,6)$ | 0.0000 | (2 × 6) + (2 × 6) + (1 × 6) = 30 |

**ตารางที่ 7** อุปสงค์และความน่าจะเป็นของอุปสงค์แต่ละระดับ

| อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ A (ชิ้น) | ความน่าจะเป็น | อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ A (ชิ้น) | ความน่าจะเป็น |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.3998 | 8 | 0.0057 |
| 1 | 0.0666 | 9 | 0.0009 |
| 2 | 0.3054 | 10 | 0.0009 |
| 3 | 0.0503 | 11 | 0.0001 |
| 4 | 0.1166 | 12 | 0.0001 |
| 5 | 0.0190 | 13 | 0.0000 |
| 6 | 0.0297 | ⋮ | ⋮ |
| 7 | 0.0048 | 30 | 0.0000 |

### 2.5 ตัวแบบการคำนวณปริมาณเติมเต็มที่เหมาะสม

พิจารณาปัญหาการเติมเต็มวัสดุคงคลังตามรอบเวลาที่กำหนดไว้เป็นปัญหาการสั่งซื้อวัสดุคงคลังครั้งเดียว ในแต่ละรอบเวลาเติมเต็ม กำหนดให้ $D_{max}$ $\overline{D}$ และ $P(D)$ เป็นอุปสงค์สูงสุดของวัสดุคงคลังต่อรอบเวลาเติมเต็ม ค่าเฉลี่ยอุปสงค์ของวัสดุคงคลังต่อรอบเวลาเติมเต็ม และค่าความน่าจะเป็นของอุปสงค์วัสดุคงคลังต่อรอบเวลาเติมเต็ม ตามลำดับ จะได้ว่าค่าคาดหวังของจำนวนวัสดุคงคลังที่ขาดแคลนต่อรอบเวลาเติมเต็ม $E[X_S]$ และค่าคาดหวังของจำนวนวัสดุคงคลังที่เหลือต่อรอบเวลาเติมเต็ม $E[X_L]$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$E[X_S] = \Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \quad (4)$$

$$E[X_L] = \Sigma_{(D=0)}^{Q}(Q-D)P(D) \quad (5)$$

ทั้งนี้ต้นทุนรวมคำนวณได้จากผลบวกของต้นทุนวัสดุซื้อเข้าช่วงต้นคาบเวลา ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนการขาดวัสดุ และต้นทุนการถือครอง ลบออกด้วย มูลค่าซากของวัสดุ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} TC &= CQ + S + A\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad + H\Sigma_{(D=0)}^{Q}(Q-D)P(D) \\ &\quad - (C-K)\Sigma_{(D=0)}^{Q}(Q-D)P(D) \end{aligned} \quad (6)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} TC &= CQ + S + A\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad + (H-C+K)\Sigma_{(D=0)}^{Q}(Q-D)P(D) \\ TC &= CQ + S + A\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad - (H-C+K)\Sigma_{(D=0)}^{Q}(D-Q)P(D) \\ TC &= CQ + S + A\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad - (H-C+K)\Sigma_{(D=0)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad + (H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ TC &= CQ + S \\ &\quad + (A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad - (H-C+K)\Sigma_{(D=0)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ TC &= CQ + S \\ &\quad + (A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad - (H-C+K)[\Sigma_{(D=0)}^{(D_{max})}(D)P(D) \\ &\quad - \Sigma_{(D=0)}^{(D_{max})}(Q)P(D)] \\ TC &= CQ + S \\ &\quad + (A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D) \\ &\quad - (H-C+K)(\overline{D}-Q) \end{aligned} \quad (7)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (7) เทียบกับปริมาณเติมเต็มวัสดุ ($Q$) และกำหนดสมการเท่ากับ 0 จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด แสดงดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} \frac{dTC}{dQ} &= \frac{d[CQ+S]}{dQ} + \frac{d[(A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D)]}{dQ} \\ &\quad - \frac{d[(H-C+K)(\overline{D}-Q)]}{dQ} \\ \frac{dTC}{dQ} &= C + (H-C+K) \\ &\quad + \frac{d[(A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D)]}{dQ} \\ \frac{dTC}{dQ} &= \frac{d[(A+H-C+K)\Sigma_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D-Q)P(D)]}{dQ} + (H+K) \end{aligned}$$

$$\frac{dTC}{dQ} = (A+H-C+K)\frac{d[\sum_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D)P(D)]}{dQ}$$
$$-(A+H-C+K)\frac{d[\sum_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D)P(D)]}{dQ}$$
$$+(H+K)$$
$$\frac{dTC}{dQ} = -(A+H-C+K)\frac{d[\sum_{(D=Q+1)}^{(D_{max})}(D)P(D)]}{dQ}$$
$$+(H+K)$$
$$\frac{dTC}{dQ} = (H+K)$$
$$-(A+H-C+K)P(D>Q)=0$$
$$P(D>Q) = \frac{H+K}{A+H-C+K} \quad (8)$$

โดยที่ $P(D>Q)$ สามารถถูกพิจารณาได้ว่าเป็นค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมของการขาดแคลนวัสดุซึ่งเป็นระดับที่ทำให้ต้นทุนรวมมีค่าต่ำที่สุด กรณีทราบค่า หรือกำหนดความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลัง $P(D > Q)$ และอุปสงค์มีการแจกแจงแบบไม่ต่อเนื่อง ควรทำการคัดเลือกปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังที่มีความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังใกล้เคียงที่สุดที่ไม่เกินค่าความน่าจะเป็นที่ทราบหรือกำหนดไว้ [6] ทั้งนี้จากสมการที่ (8) สามารถพิจารณาได้ว่าตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับค่า $P(D > Q)$ ประกอบด้วย ต้นทุนถือครอง ($H$) ต้นทุนการเสื่อมสภาพ ($K$) และต้นทุนการขาดแคลนวัสดุ ($A$) กรณีที่ต้นทุนถือครอง และต้นทุนการเสื่อมสภาพมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ $P(D>Q)$ มีค่าสูงขึ้นหรือควรเติมเต็มน้อยลง ในทางกลับกันหากต้นทุนการขาดแคลนวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า $P(D>Q)$ มีค่าต่ำลง หรือควรเติมเต็มมากขึ้น

### 3. ผลการทดสอบเปรียบเทียบตัวแบบการคำนวณกับการจำลองสถานการณ์

พิจารณาตัวอย่างแสดงคุณลักษณะปัญหา ความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังอะไหล่ที่เหมาะสมสามารถถูกด้วยสมการที่ (8) ได้ดังนี้

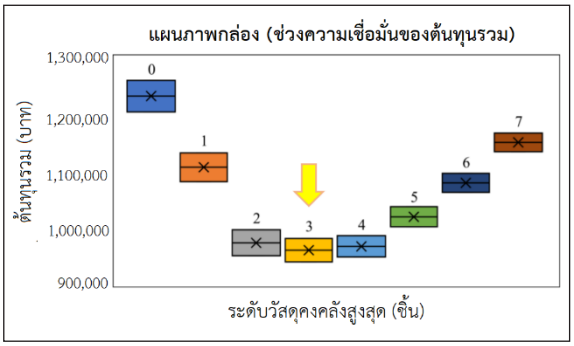
$$P(D>Q) = \frac{166.67+800}{(12,000+166.67-8,000+800)} = 0.1946$$

ที่ค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ทำให้ต้นทุนรวมมีค่าต่ำที่สุด จึงควรทำการกำหนดระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุด ($L_{max}$) ของแต่ละคาบเวลาเติมเต็มที่ส่งผลให้เกิดความน่าจะเป็นในการขาดแคลนวัสดุมีค่าใกล้เคียงที่สุดที่ไม่เกิน 0.1946 ซึ่งปริมาณดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 3 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 8 ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้ว่าในแต่ละรอบเวลาเติมเต็ม หากกำหนดให้มีปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังอะไหล่ไปถึงจุดสูงสุดสามชิ้น จะมีความน่าจะเป็นในการขาดแคลนอะไหล่เท่ากับ 0.1779 (สังเกตว่าความน่าจะเป็นที่จะไม่ขาดแคลนอะไหล่คือผลรวมของความน่าจะเป็นที่อุปสงค์เป็น 0, 1, 2 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3998 + 0.0666 + 0.3054 + 0.0503 = 0.8221)

**ตารางที่ 8** ความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังอะไหล่ที่อุปสงค์วัสดุคงคลังอะไหล่แต่ละค่า

| อุปสงค์ของวัสดุคงคลังอะไหล่ A (ชิ้น), $D$ | ความน่าจะเป็นของอุปสงค์วัสดุ $P(D)$ | ความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุ $P(D>Q)$ |
|---|---|---|
| 0 | 0.3998 | 0.6002 |
| 1 | 0.0666 | 0.5336 |
| 2 | 0.3054 | 0.2282 |
| **3** | **0.0503** | **0.1779** |
| 4 | 0.1166 | 0.0613 |
| 5 | 0.0190 | 0.0423 |
| 6 | 0.0297 | 0.0126 |
| 7 | 0.0048 | 0.0078 |
| 8 | 0.0057 | 0.0021 |
| 9 | 0.0009 | 0.0012 |
| 10 | 0.0009 | 0.0003 |
| 11 | 0.0001 | 0.0002 |
| 12 | 0.0001 | 0.0001 |
| 13 | 0.0000 | 0.0001 |

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ดังกล่าว งานวิจัยจึงทำการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของปัญหาตัวอย่าง และสร้างเหตุการณ์การชำรุดขึ้นจำนวน 60 คาบเวลาเติมเต็ม




**รูปที่ 1** ผลลัพธ์จากแบบจำลองมอนติคาร์โล

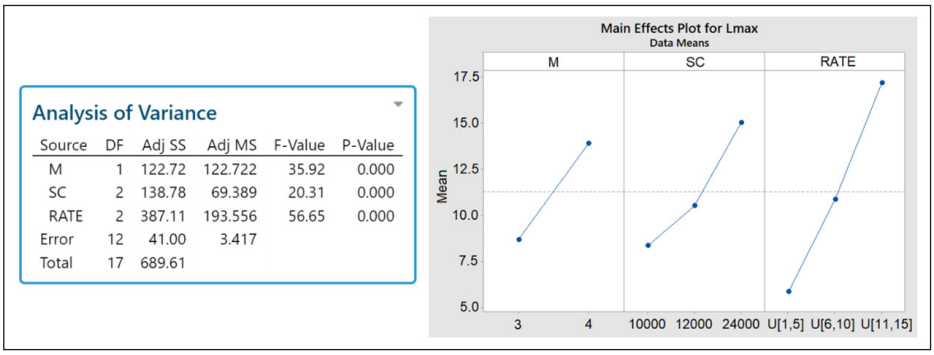
ตามอัตราการชำรุดเฉลี่ยของแต่ละเครื่องจักร ระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดถูกกำหนดค่าที่แตกต่างกัน 8 ระดับ (ตั้งแต่ 0 ชิ้น ถึง 7 ชิ้น) โดยที่แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 30 รอบ รูปที่ 1 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 95% ของต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองมอนติคาร์โล

จากรูปที่ 1 หากพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ที่ระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดเท่ากับ 2, 3 และ 4 ชิ้น ส่งผลให้เกิดต้นทุนรวมต่ำกว่าระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดค่าอื่น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวม ที่ระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดจำนวน 3 ชิ้น มีค่าเฉลี่ยต้นทุนรวมต่ำที่สุด ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยตัวแบบที่นำเสนอ

นอกจากการวิเคราะห์คำตอบที่ได้จากตัวแบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากตัวแบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลสำหรับตัวอย่างแสดงคุณลักษณะปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้น งานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบคำตอบจากตัวแบบที่นำเสนอกับคำตอบจากแบบจำลองสถานการณ์ในปัญหาที่มีระดับปัจจัยแตกต่างกัน โดยปัจจัยที่ทำการพิจารณาประกอบด้วย

- จำนวนเครื่องจักร มี 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (3 เครื่อง) และระดับสูง (4 เครื่อง)
- ต้นทุนการขาดแคลนวัสดุ มี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (10,000 บาทต่อชิ้น) ระดับกลาง (12,000 บาทต่อชิ้น) และระดับสูง (24,000 บาทต่อชิ้น)
- อัตราการชำรุดเป็นการแจกแจงแบบปัวซงโดยมีค่าเฉลี่ยของการแจกแจง ($\lambda$) จำแนกเป็น 3 ระดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปัวซงถูกกำหนดค่าจากตัวเลขสุ่มจากการแจกแจงแบบเอกรูปไม่ต่อเนื่อง คือ ระดับต่ำ (U[1, 5]), ระดับกลาง (U[6, 10]) และ ระดับสูง (U[11, 15])

จากระดับที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัย ทำให้เกิดปัญหาทดสอบทั้งสิ้น $2 \times 3 \times 3 = 18$ กรณี ผลการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากตัวแบบการคำนวณ และคำตอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ สรุปได้ดังตารางที่ 9 ซึ่งพบว่า วิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์ทุกกรณี (ตัวแบบจำลองสถานการณ์มี 60 คาบเวลาเติมเต็ม ซึ่งผลลัพธ์จากแบบจำลองสถานการณ์เกิดจากการเปลี่ยนค่าระดับวัสดุคงคลังสูงสุด และเลือกค่าระดับวัสดุคงคลังสูงสุดที่ให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด โดยที่แต่ละระดับวัสดุคงคลังสูงสุดมีการทำซ้ำ 30 รอบ) จากรูปที่ 2 สามารถพิจารณาได้ว่าที่ระดับสูงขึ้นของปัจจัยหลักทั้งสาม



Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| M | 1 | 122.72 | 122.722 | 35.92 | 0.000 |
| SC | 2 | 138.78 | 69.389 | 20.31 | 0.000 |
| RATE | 2 | 387.11 | 193.556 | 56.65 | 0.000 |
| Error | 12 | 41.00 | 3.417 | | |
| Total | 17 | 689.61 | | | |



**รูปที่ 2** ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุด

**ตารางที่ 9** ประสิทธิภาพของตัวแบบจากการทดสอบทั้ง 18 กรณี

| กรณี | ระดับของปัจจัย | | | ปริมาณวัสดุคงคลังสูงสุด (ชิ้น) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | จำนวนเครื่องจักร | ต้นทุนขาดแคลนวัสดุ (บาทต่อชิ้น) | ค่าเฉลี่ยของอัตราการชำรุด | ตัวแบบการคำนวณ | การจำลองสถานการณ์ |
| 1 | 3 | 10,000 | ระดับต่ำ | 2 | 2 |
| 2 | 3 | 10,000 | ระดับกลาง | 7 | 7 |
| 3 | 3 | 10,000 | ระดับสูง | 10 | 10 |
| 7 | 3 | 12,000 | ระดับต่ำ | 3 | 3 |
| 8 | 3 | 12,000 | ระดับกลาง | 9 | 9 |
| 9 | 3 | 12,000 | ระดับสูง | 12 | 12 |
| 13 | 3 | 24,000 | ระดับต่ำ | 5 | 5 |
| 14 | 3 | 24,000 | ระดับกลาง | 13 | 13 |
| 15 | 3 | 24,000 | ระดับสูง | 17 | 17 |
| 4 | 4 | 10,000 | ระดับต่ำ | 5 | 5 |
| 5 | 4 | 10,000 | ระดับกลาง | 9 | 9 |
| 6 | 4 | 10,000 | ระดับสูง | 17 | 17 |
| 10 | 4 | 12,000 | ระดับต่ำ | 8 | 8 |
| 11 | 4 | 12,000 | ระดับกลาง | 11 | 11 |
| 12 | 4 | 12,000 | ระดับสูง | 20 | 20 |
| 16 | 4 | 24,000 | ระดับต่ำ | 12 | 12 |
| 17 | 4 | 24,000 | ระดับกลาง | 16 | 16 |
| 18 | 4 | 24,000 | ระดับสูง | 27 | 27 |

ระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดที่เหมาะสมในแต่ละคาบเวลาจะมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้ค่าผลบวกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าผลบวกกำลังสองรวม แสดงถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยหลัก

## 4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยทำการกำหนดนโยบายเติมเต็มที่เหมาะสมสำหรับวัสดุคงคลังอะไหล่ในงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขของระบบที่มีเครื่องจักรหลายเครื่องซึ่งมีการชำรุดเกิดขึ้นเป็นอิสระต่อกันโดยการชำรุดมีการแจกแจงเป็นแบบปัวซงด้วยค่าเฉลี่ยของอัตราการชำรุดที่แตกต่างกัน การซ่อมแซมการชำรุดเสียหายของเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความต้องการใช้วัสดุคงคลังอะไหล่ประเภทเดียวกันด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน นโยบายเติมเต็มที่นำเสนอเป็นการคำนวณปริมาณสั่งซื้อที่เหมาะสมที่แต่ละรอบเวลาของการสั่งซึ่งถูกกำหนดไว้ ลักษณะดังกล่าวสามารถถูกพิจารณาได้ว่าเป็นการเติมเต็มตามรอบเวลาโดยปริมาณเติมเต็มในแต่ละรอบเวลามีค่าเท่ากับผลต่างของระดับวัสดุคงคลังสูงสุด และระดับวัสดุคงคลังคงเหลือในระบบในช่วงเวลาสั่งเติมเต็ม ทั้งนี้ระดับวัสดุคงคลังสูงสุดถูกกำหนดโดยการประยุกต์ทฤษฎีการเติมเต็มวัสดุคงคลังครั้งเดียวเข้ากับแต่ละรอบเวลาการสั่งวัสดุคงคลัง ซึ่งปริมาณดังกล่าวมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลัง โดยความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุดถูกพิจารณาจากการหาอนุพันธ์ของสมการต้นทุนรวมที่มีอุปสงค์ของวัสดุคงคลังเป็นลักษณะการแจกแจงแบบไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ต้นทุนรวมของระบบประกอบด้วย ต้นทุนวัสดุ ต้นทุนการ

ถือครอง ต้นทุนการเสื่อมสภาพ และต้นทุนการขาดแคลนวัสดุ คำตอบที่ได้จากตัวแบบการคำนวณที่นำเสนอถูกนำมาเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลที่แต่ละระดับของปัจจัยจำนวนเครื่องจักร ปัจจัยต้นทุนการขาดแคลนวัสดุ และปัจจัยอัตราการชำรุด ผลการเปรียบเทียบปัญหา 18 กรณี ที่ทำการศึกษาพบว่า ปริมาณวัสดุคงคลังสูงสุดที่เหมาะสมซึ่งคำนวณได้จากตัวแบบที่นำเสนอเป็นค่าเดียวกับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลในทุกกรณี ทั้งนี้ที่ค่าระดับสูงของทุกปัจจัย ระดับวัสดุคงคลังอะไหล่สูงสุดที่เหมาะสมมีแนวโน้มสูงขึ้น

**เอกสารอ้างอิง**

[1] J. Poppy, R. J. I. Basten, R. N. Boute, and M. R. Lambrecht, "Numerical study of inventory management under various maintenance policies," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 168, pp. 262–273, 2017.

[2] F. W. Harris, "How many parts to make at once," *Factory: The Magazine of Management*, vol. 10, no. 2, pp. 135–136, 1913.

[3] A. Andriolo, D. Battini, R. W. Grubbström, A. Persona, and F. Sgarbossa, "A century of evolution from Harris's basic lot size model: Survey and research agenda," *International Journal of Production Economics*, vol. 155, pp. 16–38, 2014.

[4] E. A. Silver and H. C. Meal, "A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 64–74, 1973.

[5] H. M. Wagner and T. Whitin, "Dynamic version of the economic lot size model," *Management Science, Journal of Operations Management*, vol. 5, pp. 89–96, 1958.

[6] B. Kader, D. Sofiene, R. Nidhal, and E. Walid, "Jointly optimal preventive maintenance under spare parts order strategy," *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, pp. 1376–1380.

[7] B. Kader, D. Sofiene, R. Nidhal, and E. Walid, "Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan," *International Federation of Automatic Control*, vol. 48, no. 3, pp. 2139–2144, 2015.

[8] Z. Hajej, S. Dellagi, and N. Rezg, "Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate," *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 19, pp. 5695–5712, 2011.

[9] P. Penpakkol and T. Intarakumthornchai, "Inventory management of spare parts under uncertain demand: A case study of particle board manufacturer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 9–22, 2018 (in Thai).

[10] S. Puspitasari, S. Amanda, and E. Agustina, "Minimizing corrective maintenance cost through spare parts classification and inventory control," in *Proceedings of the 2019 1st International Conference on Engineering and Management in Industrial System*, 2019, pp. 444–450.

[11] R. J. Tersine, "Independent demand systems: Probabilistic model," in *Principles of Inventory and Materials Management*, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice-Hall, 1994, ch. 5, pp. 204–272.

[12] S. Nahmias, "Reliability and maintainability," in *Production and operations analysis*, 6th ed. Singapore: McGraw-Hill, 2009, ch. 12,

pp. 700–753.

[13] S. Wongmongkolrit, B. Rassameethes, and W. Supithak, "Spare parts management for corrective," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 1002–1006, 2014.

[14] R. J. Tersine, "Single order quantities," in *Principles of Inventory and Materials Management*, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice-Hall, 1994, ch. 5, pp. 312–332.