วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

บทความวิจัย

การศึกษาปัจจัยเพื่อลดต้นทุนผงเคมีในการผลิตผ้าเบรก

สรวิชญ์ สุวรรณอักษร* และ ชูศักดิ์ พรสิงห์

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ,
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: suwanauksorn_s@su.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 พฤศจิกายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 1 มีนาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มีนาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: บริษัทกรณีศึกษามีปริมาณของผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกมากถึง 180,000 กิโลกรัมต่อปี หรือประมาณ 15.84% ของปริมาณวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิต ซึ่งส่งผลให้มีต้นทุนการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นมูลค่าวัตถุดิบเคมีที่สูญเสียไปประมาณ 13 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือใช้จากการผลิตผ้าเบรก และเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกลดลง โดยจากการระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญของทางบริษัทกรณีศึกษาพบว่า สาเหตุของปริมาณผงเคมีที่เหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมากนั้น เกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกมีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต ได้แก่ 1) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่ง 2) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และ 3) ค่าเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการผ่าร่องและการลบมุม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อค้นหาปัจจัยเบื้องต้นที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชิ้นงาน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis และนำปัจจัยเหล่านั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Design) เพื่อค้นหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบอย่างแท้จริง และนำปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบอย่างแท้จริงนั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 3 ระดับ (3^k Full Factorial Design) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงสามารถลดปริมาณการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกลดลงได้ 8.75% ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตผ้าเบรกลงได้ 2.60%

คำสำคัญ: ผ้าเบรก; ค่าความเผื่อของชิ้นงาน; การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 2 ระดับ; การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 3 ระดับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

บทความวิจัย

A Study of Factors for Chemical Cost Reduction in the Brake Pad Manufacturing Process

Sorawich Suwanauksorn* **and Choosak Pornsing**

Division of Engineering Management, Department of Industrial Engineering and Management,
Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

* Corresponding author, E-mail: suwanauksorn_s@su.ac.th

Received: 30 November 2020; Revised 1 March 2021; Accepted: 2 March 2021
Online Published: 9 March 2021

Abstract: The case study company had a surplus chemical powder from brake pad manufacturing processes at 180,000 kilograms per year or 15.84% of all chemical powder in manufacturing processes and was resulting in high manufacturing cost. The cost of a surplus chemical powder was about 13 million baht per year. The objective of this research was to find the cause and reduced a surplus chemical powder from brake pad manufacturing processes. Brainstorming of case study company experts found the cause of a surplus chemical powder in brake pad manufacturing from necessary tolerance weight of chemical powder in the production so that no problem in production: 1) variation of thickness in grinding process 2) variation of thickness in hot press process and 3) variation of slotting process and chamfering process. After that break pad thickness variation problem was analyzed preliminary affect factor by Why-Why Analysis. And factors were analyzed to decide which factors affected the problem by 2^k Full Factorial Design experiment. The factors that were obtained were then tested in 3^k Full Factorial Design to find the optimal levels of various factors. In conclusion, the optimum level of each factor from the experiment can be reduced chemical powders by 8.75% in the brake pads production and can be reduced cost by 2.60% in brake pad manufacturing processes.

Keywords: Brake Pad; Tolerances; 2^k Full Factorial Design; 3^k Full Factorial Design

บทความวิจัย

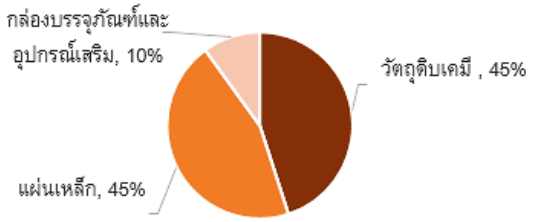
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบัน [1] เนื่องจากด้วยปริมาณความต้องการและกำลังผลิตที่เพิ่มขึ้นภายในประเทศประกอบกับประเทศไทยมีลักษณะทำเลที่ตั้งและสิ่งแวดล้อมที่เป็นประโยชน์ในการผลิตและขนส่ง ทำให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต่างชาติจำนวนมากย้ายฐานการผลิตเข้ามาลงทุนในประเทศไทย ส่งผลให้การแข่งขันในธุรกิจอุตสาหกรรมนี้มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งลูกค้ามีตัวเลือกในการตัดสินใจซื้อเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตในประเทศไทยจึงพยายามให้ความใส่ใจในรายละเอียดกระบวนการทำงานแต่ละกระบวนการเพิ่มขึ้นและให้ความสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนลงให้น้อยที่สุดและได้กำไรในการประกอบการเพิ่มขึ้น

ในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้มีนักวิจัยหลายท่านใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม [2-6] โดยหลังปรับปรุงพบว่าสามารถลดความผันแปรของกระบวนการผลิต และลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้

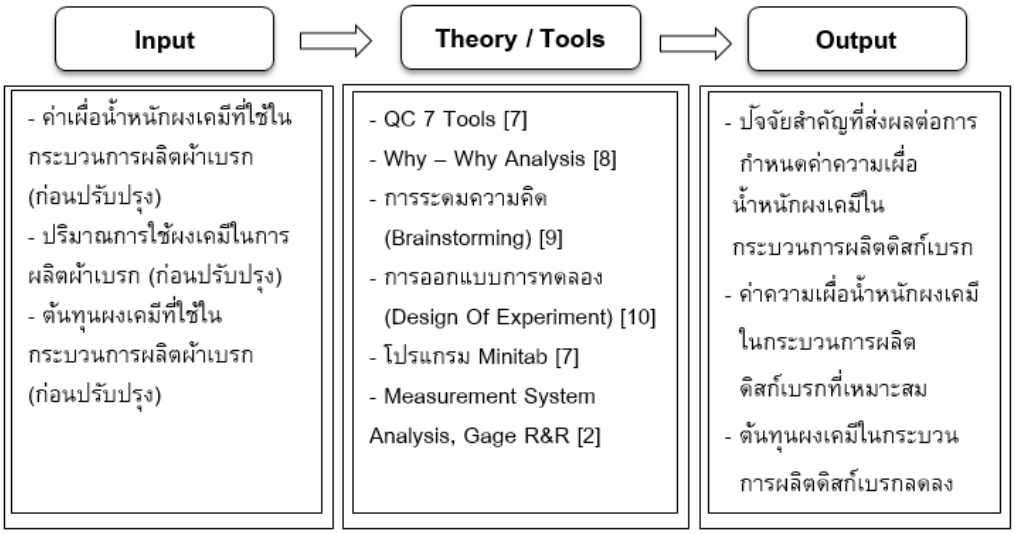
บริษัทกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นบริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ ประเภทผ้าเบรก โดยมี 2 ผลิตภัณฑ์หลักคือ ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกและผลิตภัณฑ์ก้ามเบรก ผู้วิจัยเลือกผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกสำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากการผลิตดิสก์เบรกมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีมากถึง 83.61% ส่วนผลิตภัณฑ์ก้ามเบรกมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีเพียง 16.39% จากการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนในกระบวนการผลิตดิสก์เบรก พบว่าสัดส่วนของต้นทุนที่มากสุดอยู่ในส่วนของต้นทุนวัสดุทางตรงที่ใช้ในการผลิตดิสก์เบรก ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 65 หากพิจารณาในรายละเอียดของต้นทุนดังกล่าวพบว่าร้อยละ 45 เป็นต้นทุนของวัตถุดิบเคมี ร้อยละ 45 เป็นต้นทุนของแผ่นเหล็กและอีกร้อยละ 10 เป็นต้นทุนกล่องบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์เสริมดังรูปที่ 1 ทั้งนี้จากการเก็บข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าในปี พ.ศ. 2559-2562 มีปริมาณเฉลี่ยของผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตมากถึง 180,000 กิโลกรัมต่อปีหรือประมาณ 15.84% ของปริมาณวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิตทั้งหมดจากการเผื่อน้ำหนักผงเคมีในกระบวนการผลิต คิดเป็นมูลค่าวัตถุดิบเคมีที่สูญเสียไปประมาณ 13 ล้านบาทต่อปี และค่าส่งกำจัดฝุ่นผงเคมีซึ่งเป็นภาระกับอุตสาหกรรมอีกประมาณ 5 แสนบาทต่อปี



รูปที่ 1 สัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบทางตรงดิสก์เบรก

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงต้องการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือใช้จากการผลิตผ้าเบรกเป็นจำนวนมาก เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกลดลง ซึ่งจะก่อให้เกิดต้นทุนการผลิตที่ลดลงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัตถุดิบโดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ตามกรอบแนวคิดในรูปที่ 2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตอย่างละเอียดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา แล้วจึงนำสาเหตุมาวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข เพื่อปรับปรุงปริมาณการใช้ผงเคมีของบริษัทกรณีศึกษาให้มีความเหมาะสมต่อไป ดังรูปที่ 3

2.1 เก็บข้อมูลการใช้ปริมาณผงเคมีแต่ละผลิตภัณฑ์

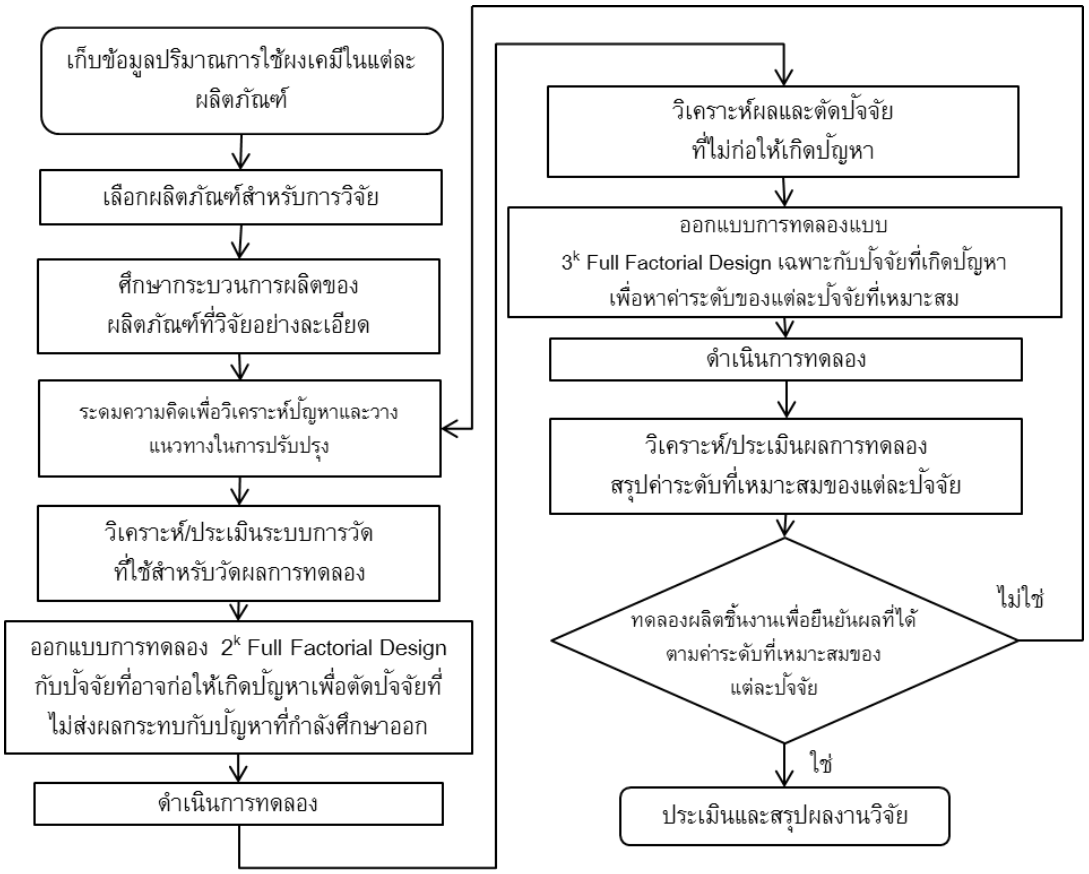
จากการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีนั้น พบว่า จากข้อมูลการผลิตในปี 2562 ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีเพื่อการผลิตผ้าเบรกสูงที่สุดนั้นได้แก่ ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกซึ่งมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีจำนวน 950,201 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 83.61% ของปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีทั้งหมด ส่วนผลิตภัณฑ์ก้ามเบรกนั้นมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีจำนวน 186,208 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 16.39% ของปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีทั้งหมด จึงเลือกทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกเนื่องจากมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีสูงที่สุด

สำหรับผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกนั้นทางบริษัทกรณีศึกษามีสูตร การผสมวัตถุดิบเคมีที่ใช้ในการผลิตหลายสูตร จากข้อมูลการผลิตพบว่า สูตรการผสมวัตถุดิบเคมีที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุดนั้นได้แก่ สูตรเคมี A

2.2 เลือกผลิตภัณฑ์วิจัย

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีการผลิตผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกมากกว่า 400 รุ่น ดังนั้นจึงเลือกผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรก รุ่น A สูตรเคมี A เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับงานวิจัย เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการใช้ผงเคมีในปี 2562 เท่ากับ 8,000 กิโลกรัม และมีมูลค่าการสูญเสียประมาณ 100,000 บาท ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณการใช้ผงเคมีและมูลค่าการสูญเสียมากที่สุด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002



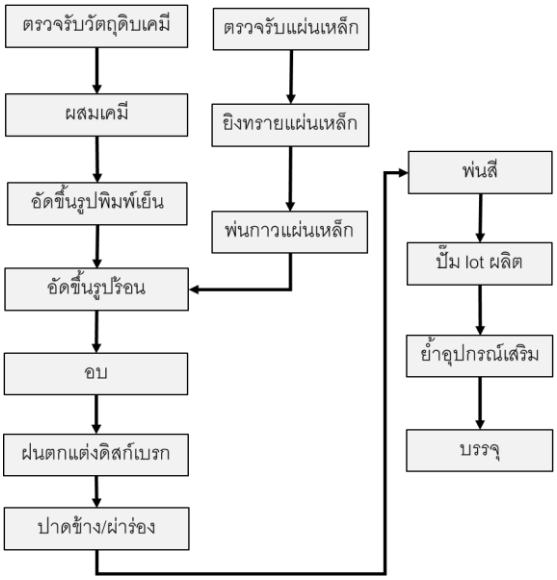
รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการดำเนินงานวิจัย

2.3 ศึกษากระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตดิสก์เบรกเริ่มจากการตรวจรับวัตถุดิบเคมีและแผ่นเหล็กจากนั้นนำวัตถุดิบเคมีแต่ละชนิดที่กำหนดปริมาณการใช้ไว้ในแต่ละสูตรการผสมผงเคมีมาทำการผสมในเครื่องผสมผงเคมีจนได้ผงเคมีที่ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันและมีค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ตามที่กำหนด ผงเคมีที่ได้หลังการผสมนั้นจะนำไปอัดขึ้นรูปพิมพ์เย็นตามค่าน้ำหนักผงเคมีที่กำหนดในแม่พิมพ์ของแต่ละรุ่น หลังจากนั้นจึงนำผงเคมีที่อัดเป็นก้อนแล้วพร้อมกับแผ่นเหล็กที่ผ่านกระบวนการยิงทรายเพื่อทำความสะอาดผิวเหล็กและพ่นกาวสำหรับการยึดติดผงเคมีกับแผ่นเหล็กไปเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีการกำหนดค่าแรงดันของเครื่องจักรและความร้อนของแม่พิมพ์ เพื่ออัดให้ก้อนผงเคมีให้ทำปฏิกิริยากันเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันตามขนาดความหนาที่ต้องการและสามารถยึดติดกับแผ่นเหล็กได้ โดยบริษัท

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

กำหนดค่าเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนนั้นต้องมีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการฝนตกแต่งดังรูปที่ 7 แต่เนื่องจากความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนนั้นมีความผันแปรค่อนข้างสูง จึงมีความจำเป็นต้องเผื่อค่าความผันแปรของขนาดความหนาเพิ่มอีก 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 ซึ่งทำให้ค่าเผื่อความผันแปรของขนาดความหนาที่ใช้สำหรับกำหนดน้ำหนักผงเคมีเบื้องต้นรวมกับเท่ากับ 1.50 มิลลิเมตร เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร เมื่อได้ชิ้นงานตามความหนาที่ต้องการแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการอบตามอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อให้เนื้อเคมีที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่สมบูรณ์ และเพิ่มความแข็งให้กับดิสก์เบรก หลังกระบวนการอบแล้วจะนำไปเข้าสู่กระบวนการฝนตกแต่ง โดยบริษัทกำหนดค่าเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานสำหรับความแปรปรวนของกระบวนการฝนตกแต่งโดยเพิ่มจากขนาดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาของชิ้นงานในส่วนที่ต้องฝนตกแต่งออกเพื่อให้ได้ขนาดรูปร่างตามแบบที่กำหนด โดยความหนาตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรก รุ่น A สูตรเคมี A กำหนดความหนาที่ต้องการเท่ากับ 15.70 ± 0.30 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปพ่นสีในส่วนที่เป็นแผ่นเหล็กตามสีที่กำหนดในแต่ละยี่ห้อ (Brand) ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์รหัสผลิตและติดอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เพื่อเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ต่อไป ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังกระบวนการผลิตดิสก์เบรก

2.4 ระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์ปัญหา

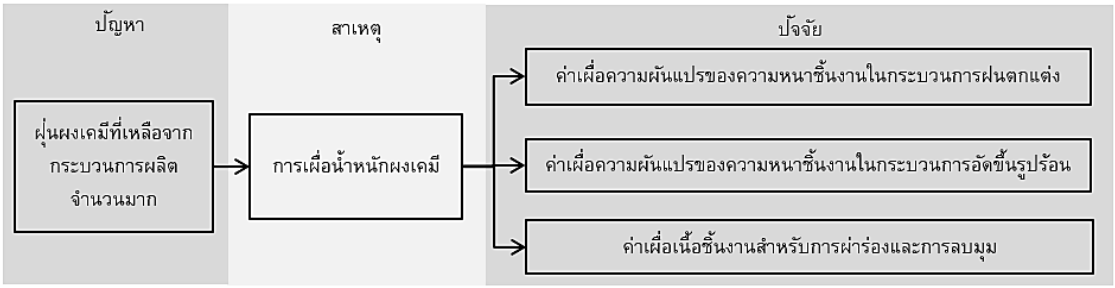
การระดมความคิดเป็นกระบวนการที่มีแบบแผนที่ใช้เพื่อรวบรวมความคิดเห็น ปัญหา หรือข้อเสนอแนะจำนวนมากในเวลาที่รวดเร็ว เป็นวิธีการที่ดีในการกระตุ้นความคิดสร้างสรรค์และเกิดการมีส่วนร่วมของกลุ่มมากที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ 1) ตั้งผู้ดำเนินการ 2) กำหนดหัวข้อ 3) ระดมความคิด 4) สรุปผล และ 5) ติดตามผล โดยจากการระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญของทางบริษัทกรณีศึกษา โดยมีผู้เชี่ยวชาญเข้าร่วม ดังนี้ 1) ผู้จัดการฝ่ายผลิต จำนวน 1 ท่าน 2) หัวหน้างานในกระบวนการผลิต จำนวน 3 ท่าน 3) วิศวกรกระบวนการผลิตที่มีอายุงานไม่ต่ำกว่า 5 ปี จำนวน 2 ท่าน ซึ่งพบว่าสาเหตุของปริมาณผงเคมีที่เหลือจากการผลิตนั้นเกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกมีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 5 และตารางที่ 1 โดยมีสาเหตุจาก 3 ปัจจัย คือ 1) ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตร 2) ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเท่ากับ 1.00 มิลลิเมตร และ 3) การเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการผ่าร่องและการลบมุม ซึ่งจากทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้น ทำให้ต้องมีการเผื่อน้ำหนักผงเคมีรวมทั้งหมด 24 กรัม คิดเป็น 17.85% จากค่าน้ำหนักมาตรฐาน และจากการร่วมกันระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์ 3 ปัจจัยข้างต้น ที่เป็นเหตุต่อการกำหนดค่าความเผื่อน้ำหนักผงเคมีนั้นพบว่า ค่าความเผื่อความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งที่ 0.50 มิลลิเมตรนั้นมากเกินความจำเป็น ซึ่งค่าความเผื่อที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.10 มิลลิเมตร เนื่องจากความสามารถของกระบวนการฝนตกแต่งที่ทำการศึกษามีค่าค่อนข้างสูงโดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ C_p ซึ่งเท่ากับ 17.82 และค่า C_{pk} ซึ่งเท่ากับ 15.00 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33 ดังรูปที่ 6 ทำให้ค่าความผันแปรของกระบวนการฝนตกแต่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจจะไม่มีความจำเป็นที่ต้องเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่ขนาดความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สูญเสียผงฝุ่นเคมีจากกระบวนการผลิตเกินความจำเป็น จึงทำการกำหนดค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่งใหม่ โดยเผื่อความหนาไว้เพียง 0.10 มิลลิเมตร เนื่องจากกระบวนการฝนตกแต่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.007 และมีค่าพิสัย (R) เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6

ส่วนการเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการผ่าร่องและลบมุมนั้นเดิมมีค่าเผื่อน้ำหนักเคมีเท่ากับ 2.04% แต่ไม่สามารถปรับลดลงได้เนื่องจากรูปแบบแม่พิมพ์ไม่สามารถสร้างเพื่อรองรับการผ่าร่องและการลบมุมได้ เพราะอาจจะทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

สำหรับค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ดังรูปที่ 7 นั้นพบว่า มีการเผื่อค่าความหนาของชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนไว้ถึง 1.00 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากค่าความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนนั้นมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าความหนาที่ต้องการ 0.80 มิลลิเมตร โดยมีค่าพิสัยเท่ากับ 1.04 มิลลิเมตร ซึ่งมีความผันแปรค่อนข้างสูง



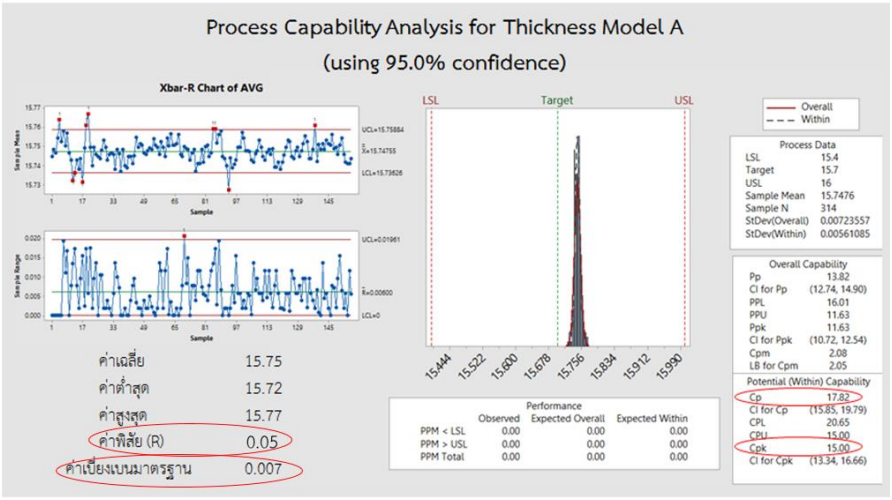
รูปที่ 5 สาเหตุปัญหาฝุ่นผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิต

บทความวิจัย

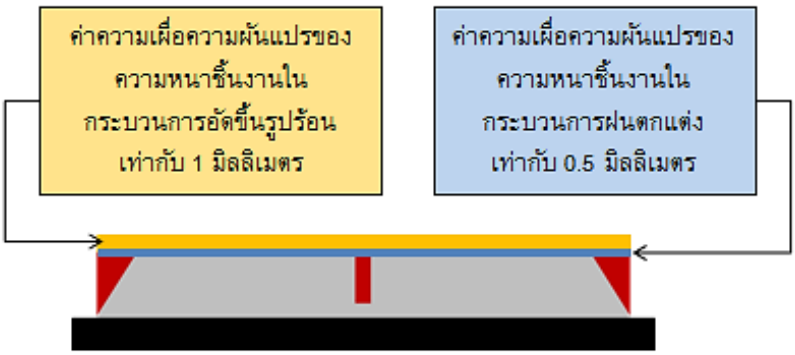
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

ตารางที่ 1 ค่าเผื่อขนาดความหนาและน้ำหนักเคมีผลิตภัณฑ์ A สูตรเคมี A ของแต่ละกระบวนการก่อนปรับปรุง

น้ำหนักเคมีมาตรฐาน	ค่าเผื่อน้ำหนักเคมี (กรัม) / ค่าเผื่อขนาดความหนา (มิลลิเมตร)								
	น้ำหนักเคมีปัจจุบัน	กระบวนการฝนตกแต่ง (+0.50 มิลลิเมตร)		กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (+1.00 มิลลิเมตร)		ผ่าร่องและลบมุม		รวมค่าเผื่อทั้งหมด (+1.50 มิลลิเมตร)	
กรัม	กรัม	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	%
136	160	7	5.25	14	10.57	3	2.04	24	17.85



รูปที่ 6 ความสามารถของกระบวนการฝนตกแต่งในการผลิตชิ้นงานรุ่น A สูตรเคมี A



รูปที่ 7 การเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานก่อนปรับปรุง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

และจากการระดมความคิดโดยผู้เชี่ยวชาญนั้นสรุปมีความเห็นร่วมกันให้ลดค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเบื้องต้นลงก่อนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ 60% ทำให้ค่าความเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานเหลือ 0.40 มิลลิเมตร โดยจะประเมินผลการวิจัยในระยะยาว (1 ปี) อีกครั้ง เพื่อลดความเสี่ยงจากปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ในระยะยาว หากไม่พบปัญหาจะดำเนินการลดค่าความเผื่อความผันแปรของขนาดความหนาและดำเนินการทดลองตามแนวทางการวิจัยนี้อีกครั้ง ซึ่งเมื่อรวมกับค่าเผื่อความหนาเพื่อรองรับความผันแปรของกระบวนฝนตกแต่ง 0.10 มิลลิเมตร รวมความหนาที่เผื่อไว้ทั้งหมดจากเดิม 1.50 มิลลิเมตร เพื่อสำหรับใช้ในการกำหนดน้ำหนักผงเคมีเบื้องต้น ให้เหลือเพียง 0.50 มิลลิเมตร โดยให้กำหนดค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานที่ต้องการในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนใหม่เท่ากับค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานสำเร็จรูป+0.50 มิลลิเมตร โดยกำหนดขอบเขตการยอมรับเท่ากับ ±0.40 มิลลิเมตร จากเดิมที่กำหนดมาตรฐานไว้ให้มีขนาดความหนาเพิ่มจากมาตรฐานความหนาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปไม่ต่ำกว่า 0.50 มิลลิเมตร

จากการกำหนดให้การเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานให้มีค่าที่ลดลงนั้น จึงต้องหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนใหม่ เพื่อให้ขนาดความหนาของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนมีความ ผันแปรลดลง โดยจากการวิเคราะห์ปัจจัยความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเบื้องต้นด้วยเครื่องมือ Why-Why Analysis ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุให้เกิดปัญหาอย่างเป็นระบบมีขั้นตอนไม่เกิดการตกหล่น โดยก่อนจะทำการวิเคราะห์ปัญหาต้องตรวจสอบที่หน้างานจริงและดูสภาพของจริงเพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับรายละเอียดของปัญหาให้ถูกต้องและชัดเจน จากนั้นจึงกำหนดปัญหา และให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการร่วมกันวิเคราะห์ โดยการตั้งคำถามหาสาเหตุด้วยคำถาม “ทำไม” ไปเรื่อย ๆ เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริง โดยจากการวิเคราะห์ Why-Why Analysis พบว่า สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 8 เมื่อทราบปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชิ้นงานแล้ว จะนำปัจจัยดังกล่าวไปเป็นปัจจัยนำเข้าสำหรับการออกแบบการทดลองต่อไป เพื่อให้ทราบว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของขนาดความหนาชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนอย่างแท้จริง และดำเนินการออกแบบการทดลองต่อเพื่อหาค่าระดับของปัจจัยเหล่านั้นที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตต่อไป

2.5 วิเคราะห์ระบบการวัด

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาได้รับการรับรองระบบคุณภาพ ISO 9001/IATF 16949 จึงได้มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดเป็นประจำ จึงอนุมานได้ว่าคุณสมบัติด้านความถูกต้องของเครื่องมือวัดดีแล้ว งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัดเพียงอย่างเดียวโดยใช้การประเมินค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และความสามารถการทำเหมือน (Reproducibility) โดยพิจารณาดัชนีที่เรียกว่า Gage R&R (Gage Repeatability and Reproducibility) โดยมีรายละเอียดดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

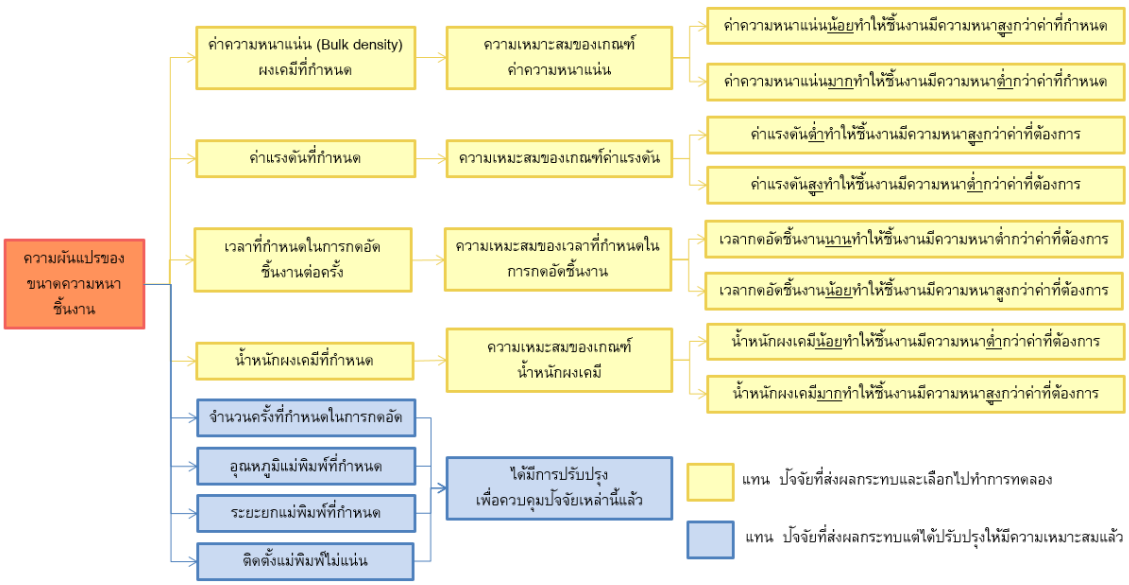
1. กำหนดผู้วัดที่ผ่านการฝึกอบรมมาเป็นอย่างดีและมีหน้าที่ในการวัดและบันทึกผลการวัด จำนวน 4 คน

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดในการเก็บข้อมูลจะใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้วชิ้นเดียวกันสำหรับผู้วัดทั้ง 4 คน

3. กำหนดจำนวนชิ้นงานที่จะวัดเพื่อศึกษา จำนวน 20 ชิ้น

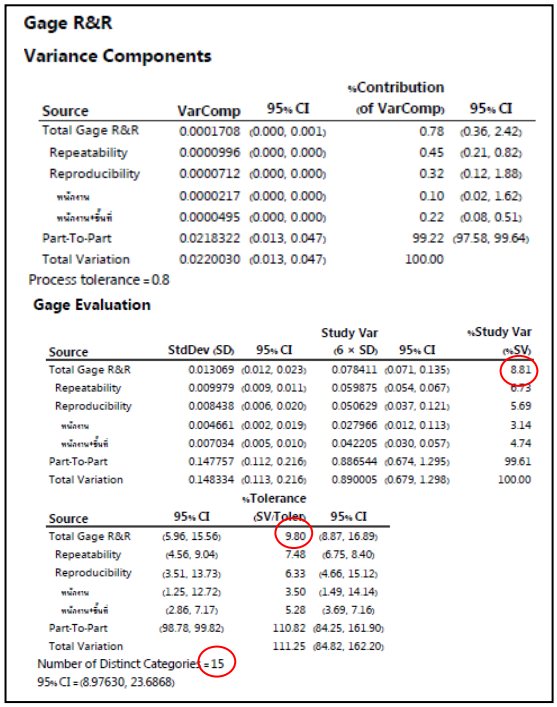
4. จำนวนการวัดซ้ำสำหรับชิ้นงานแต่ละชิ้นกำหนดให้วัดซ้ำ 3 ตำแหน่งของชิ้นงานและเลือกบันทึกค่าที่ต่ำสุดของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ระบบการวัด (Gage R&R) ด้วยโปรแกรม Minitab ในรูปที่ 9 ซึ่งจากการพิจารณาค่า Number of Distinct Categories = 15 แสดงว่าระบบการวัดสามารถแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 15 ประเภทที่แตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลความหนาที่ได้สามารถใช้การประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ และจากการทดสอบพบว่า %Precision to total variation = 8.81% และ % Precision to tolerance = 9.80 % ซึ่งถือว่าระบบการวัดผ่านเป็นที่ยอมรับสอดคล้องกับข้อกำหนด ของ AIAG (Automotive Industry Action Group) ที่ระบุค่ายอมรับได้ของ Total Gage R&R ต้องไม่เกิน 10% ดังนั้น จากการวิเคราะห์การวัดค่าความหนาของชิ้นงานผลลัพธ์จากโปรแกรม Minitab สามารถสรุปได้ว่าความแม่นยำของระบบการวัดที่ใช้ในการวัดความหนาของชิ้นงานดิสก์เบรกรุ่น A มีความเหมาะสมและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้ และผู้วิจัยได้เลือกพนักงานจำนวน 1 คน จากผู้ทดสอบทั้งหมด 4 คน มาทำการวัดผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 8 แผนภูมิการไหลของกระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบเคมีจากต่างประเทศหลังการปรับปรุงการทำงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002



Gage R&R

Variance Components

Source	VarComp	95% CI	%Contribution (of VarComp)	95% CI
Total Gage R&R	0.0001708	(0.000, 0.001)	0.78	(0.36, 2.42)
Repeatability	0.0000996	(0.000, 0.000)	0.45	(0.21, 0.82)
Reproducibility	0.0000712	(0.000, 0.000)	0.32	(0.12, 1.88)
พนักงาน	0.0000217	(0.000, 0.000)	0.10	(0.02, 1.62)
พนักงานชิ้นที่	0.0000495	(0.000, 0.000)	0.22	(0.08, 0.51)
Part-To-Part	0.0218322	(0.013, 0.047)	99.22	(97.58, 99.64)
Total Variation	0.0220030	(0.013, 0.047)	100.00	

Process tolerance = 0.8

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	95% CI	Study Var (6 × SD)	95% CI	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.013069	(0.012, 0.023)	0.078411	(0.071, 0.135)	8.81
Repeatability	0.009979	(0.009, 0.011)	0.059875	(0.054, 0.067)	6.73
Reproducibility	0.008438	(0.006, 0.020)	0.050629	(0.037, 0.121)	5.69
พนักงาน	0.004661	(0.002, 0.019)	0.027966	(0.012, 0.113)	3.14
พนักงานชิ้นที่	0.007034	(0.005, 0.010)	0.042205	(0.030, 0.057)	4.74
Part-To-Part	0.147757	(0.112, 0.216)	0.886544	(0.674, 1.295)	99.61
Total Variation	0.148334	(0.113, 0.216)	0.890005	(0.679, 1.298)	100.00

Source	95% CI	%Tolerance (SV/Toler)	95% CI
Total Gage R&R	(5.96, 15.56)	9.80	(8.87, 16.89)
Repeatability	(4.56, 9.04)	7.48	(6.75, 8.40)
Reproducibility	(3.51, 13.73)	6.33	(4.66, 15.12)
พนักงาน	(1.25, 12.72)	3.50	(1.49, 14.14)
พนักงานชิ้นที่	(2.86, 7.17)	5.28	(3.69, 7.16)
Part-To-Part	(98.78, 99.82)	110.82	(84.25, 161.90)
Total Variation		111.25	(84.82, 162.20)

Number of Distinct Categories = 15

95% CI = (8.97630, 23.6868)

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดชิ้นงาน

2.6 การทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

ออกแบบการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design เพื่อตรวจสอบดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบกับปัญหาขนาดความหนาของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่ามีปัจจัยที่อาจจะส่งผลกระทบ 4 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนด เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด โดยกำหนดค่าระดับของแต่ละปัจจัยไว้ 2 ระดับ คือค่าระดับต่ำและค่าระดับสูง ซึ่งเป็นค่าขอบเขตการยอมรับได้ในปัจจุบันของแต่ละปัจจัยที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 2 ซึ่งการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์จะต้องทำการทดลองเท่ากับ $2^4 = 16$ การทดลองและในการวิเคราะห์จำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของจำนวนปัจจัยนำเข้า จำนวน 4 ปัจจัย จะใช้ Effect เท่ากับ 0.25 เนื่องจากเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการผลิตในปัจจุบัน โดยสามารถคำนวณจำนวนการทำซ้ำจากโปรแกรม Minitab ได้จำนวนการทดลองซ้ำไม่ต่ำกว่า 4 ครั้ง ตามรูปที่ 10 เพื่อให้ระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 95% แต่เนื่องจาก 1 โม่การผสมผงเคมีนั้น สามารถทำการทดลองซ้ำในครั้งนี้ได้ถึง 7 ครั้ง ทางผู้เชี่ยวชาญของบริษัทกรณีศึกษา จึงให้ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำ 7 ครั้ง เพื่อเพิ่มระดับความเชื่อมั่น ดังนั้นการทดลองครั้งนี้รวมเป็น 112 การทดลอง โดยจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 2 การแบ่งระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)	หน่วย
1. ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด	0.40	0.60	g/cc
2. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	305	kg/cm^2
3. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง	3	7	วินาที
4. น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด	155	165	กรัม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 4 ประการ คือ 1) มีการกระจายตัวแบบปกติ 2) ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 และ 4) มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (σ^2) ดังรูปที่ 11 จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลการทดลองได้

จากการวิเคราะห์ผลการการทดลองเบื้องต้นจากโปรแกรม Minitab โดยได้มีการกำหนดตัวแปรดังนี้ ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด (Bulk Density: A) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure: B) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time: C) และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด (Weight: D) ในรูปที่ 12 และ 13 พบว่ามีปัจจัยหลัก (Main Effect) จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure: B) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time: C) และน้ำหนักเคมีที่กำหนด (Weight: D) ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของขนาดความหนาของชิ้นงาน และมีปัจจัยร่วม (Interactions) ดังนี้ ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนดและค่าแรงดันที่กำหนด 2) ค่าแรงดันที่กำหนดและเวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง 3) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้งและน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด ปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าแรงดันที่กำหนด เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด โดยพิจารณาที่ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และจากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) จากตารางที่ 4 พบว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 94.80% และค่า R-Sq(adj) มีค่าเท่ากับ 93.99% ซึ่งมีค่ามากกว่า 75% และค่าใกล้เคียง 100% ซึ่งหมายความว่า ในความผันแปรของค่าความหนาชิ้นงานทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 93.99% แสดงว่าเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ และสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปทำนายผล เพื่อหาคำตอบได้

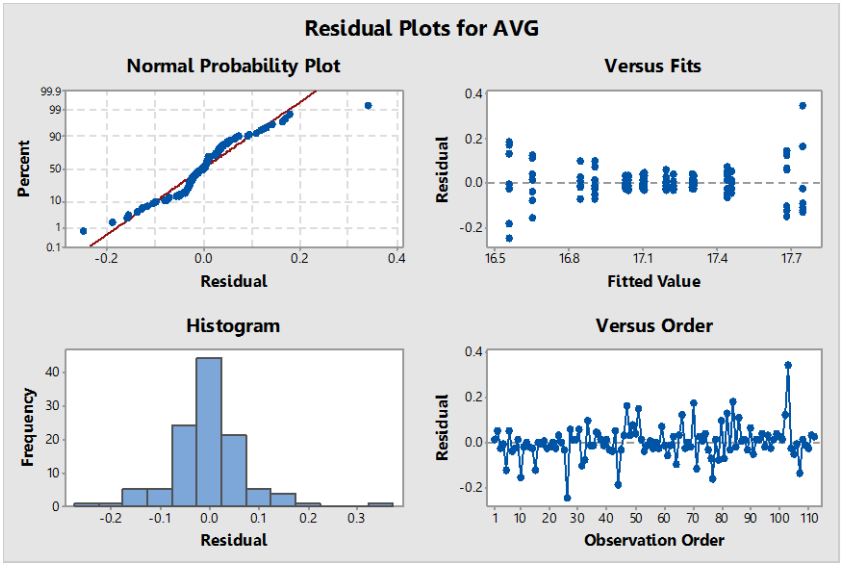
Power and Sample Size

2-Level Factorial Design
α = 0.05 Assumed standard deviation = 0.25
Factors: 4 Base Design: 4, 16
Blocks: none

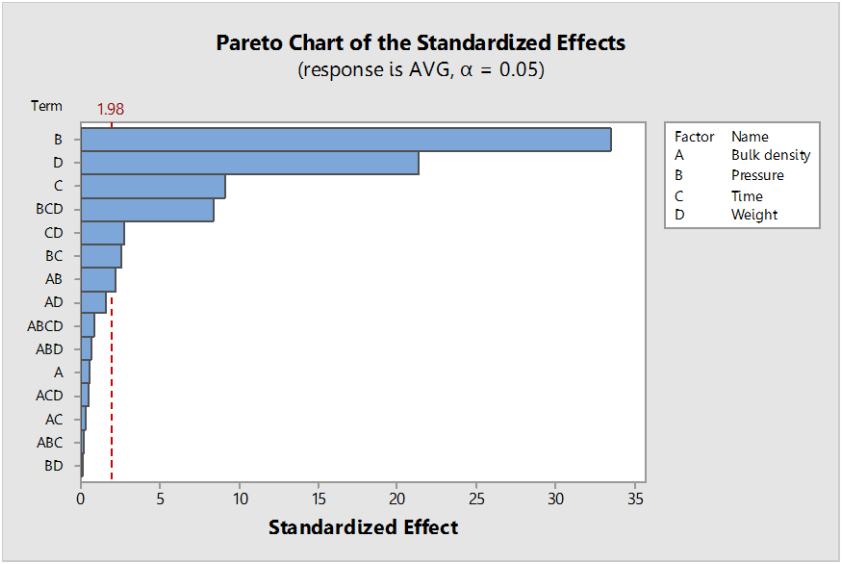
Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
0	0.25	3	48	0.90	0.919009
0	0.25	4	64	0.92	0.974932
0	0.25	4	64	0.95	0.974932
0	0.25	5	80	0.98	0.992740
0	0.25	5	80	0.99	0.992740

รูปที่ 10 จำนวนการทำซ้ำสำหรับการทดลอง 2^k Full Factorial Design

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002



รูปที่ 11 Residual Plots



รูปที่ 12 แสดงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดความหนาของชิ้นงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

Factorial Regression: AVG versus Bulk Density, Pressure, Time, Weight

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	11.6124	0.77416	116.75	0.000
Linear	4	11.0002	2.75005	414.73	0.000
Bulk Density	1	0.0018	0.00181	0.27	0.603
Pressure	1	7.4418	7.44176	1122.28	0.000
Time	1	0.5502	0.55020	82.97	0.000
Weight	1	3.0065	3.00645	453.40	0.000
2-Way Interactions	6	0.1438	0.02396	3.61	0.003
Bulk Density*Pressure	1	0.0319	0.03189	4.81	0.031
Bulk Density*Time	1	0.0005	0.00047	0.07	0.790
Bulk Density*Weight	1	0.0168	0.01676	2.53	0.115
Pressure*Time	1	0.0444	0.04440	6.70	0.011
Pressure*Weight	1	0.0001	0.00011	0.02	0.899
Time*Weight	1	0.0502	0.05015	7.56	0.007
3-Way Interactions	4	0.4633	0.11583	17.47	0.000
Bulk Density*Pressure*Time	1	0.0002	0.00020	0.03	0.862
Bulk Density*Pressure*Weight	1	0.0029	0.00290	0.44	0.510
Bulk Density*Time*Weight	1	0.0012	0.00122	0.18	0.669
Pressure*Time*Weight	1	0.4590	0.45901	69.22	0.000
4-Way Interactions	1	0.0050	0.00502	0.76	0.386
Bulk Density*Pressure*Time*Weight	1	0.0050	0.00502	0.76	0.386
Error	96	0.6366	0.00663		
Total	111	12.2489			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0814307	94.80%	93.99%	92.93%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		17.1629	0.0077	2230.55	0.000	
Bulk Density	0.00804	0.00402	0.00769	0.52	0.603	1.00
Pressure	-0.51554	-0.25777	0.00769	-33.50	0.000	1.00
Time	-0.14018	-0.07009	0.00769	-9.11	0.000	1.00
Weight	0.32768	0.16384	0.00769	21.29	0.000	1.00
Bulk Density*Pressure	0.03375	0.01688	0.00769	2.19	0.031	1.00
Bulk Density*Time	0.00411	0.00205	0.00769	0.27	0.790	1.00
Bulk Density*Weight	-0.02446	-0.01223	0.00769	-1.59	0.115	1.00
Pressure*Time	0.03982	0.01991	0.00769	2.59	0.011	1.00
Pressure*Weight	0.00196	0.00098	0.00769	0.13	0.899	1.00
Time*Weight	0.04232	0.02116	0.00769	2.75	0.007	1.00
Bulk Density*Pressure*Time	0.00268	0.00134	0.00769	0.17	0.862	1.00
Bulk Density*Pressure*Weight	-0.01018	-0.00509	0.00769	-0.66	0.510	1.00
Bulk Density*Time*Weight	0.00661	0.00330	0.00769	0.43	0.669	1.00
Pressure*Time*Weight	0.12804	0.06402	0.00769	8.32	0.000	1.00
Bulk Density*Pressure*Time*Weight	-0.01339	-0.00670	0.00769	-0.87	0.386	1.00

Regression Equation in Uncoded Unit

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

2.7 การทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อขนาดความหนาที่ได้จากการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design มาหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย เพื่อกำหนดเป็นค่าที่เหมาะสมกับการผลิตต่อไป ด้วยการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design เพื่อให้ได้ขนาดความหนาชิ้นงานมีขนาดความหนาไม่ต่ำกว่า 15.80 มิลลิเมตร (15.70 + 0.10 มิลลิเมตร) ซึ่งความหนา 15.70 มิลลิเมตร เป็นข้อกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ และ0.10 มิลลิเมตร เป็นค่าเผื่อความผันแปรของกระบวนการฝนตกแต่งตามที่ระบุในหัวข้อ 2.4 โดยกำหนดให้มาตรฐานความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเท่ากับ16.20 ± 0.40 มิลลิเมตร โดยค่าความหนา 16.20 มิลลิเมตร กำหนดจากค่ามาตรฐานความหนาชิ้นงานสำเร็จรูป +0.50 มิลลิเมตร ตามที่ระบุในหัวข้อ 2.4 และกำหนดขอบเขตการยอมรับได้ ± 0.40 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดความหนาไม่ต่ำกว่า 15.80 มิลลิเมตร และกำหนดค่าระดับของแต่ละปัจจัยไว้ 3 ระดับ คือระดับต่ำ จุดกึ่งกลาง และระดับสูง ซึ่งเป็นค่าในช่วงขอบเขตการยอมรับได้ของแต่ละปัจจัยที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 3 สำหรับน้ำหนักเคมีที่กำหนดในการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design เป็นน้ำหนักที่คำนวณเบื้องต้นจากปริมาตรของชิ้นงานเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการซึ่งแตกต่างจากการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design ซึ่งเป็นน้ำหนักเดิมที่บริษัทใช้ในการผลิต โดยต้องทำการทดลองเท่ากับ 3^3 = 27 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง รวม 54 การทดลอง จากโปรแกรม Minitab ตามรูปที่ 14 เพื่อให้ระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 95% แต่ทางบริษัทกรณีศึกษาต้องการให้ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำเท่ากับการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design คือจำนวน 7 ครั้ง รวมการทดลองในครั้งนี้ 189 การทดลอง โดยจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผล

Power and Sample Size

```
General Full Factorial Design
α = 0.05  Assumed standard deviation = 0.25
Factors: 3  Number of levels: 3,3,3
Include terms in the model up through
order:  3
Not including blocks in model.
```

Maximum Difference	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
1	2	54	0.95	1

รูปที่ 14 จำนวนการทำซ้ำสำหรับการทดลอง 3^k Full Factorial Design

ตารางที่ 3 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัย

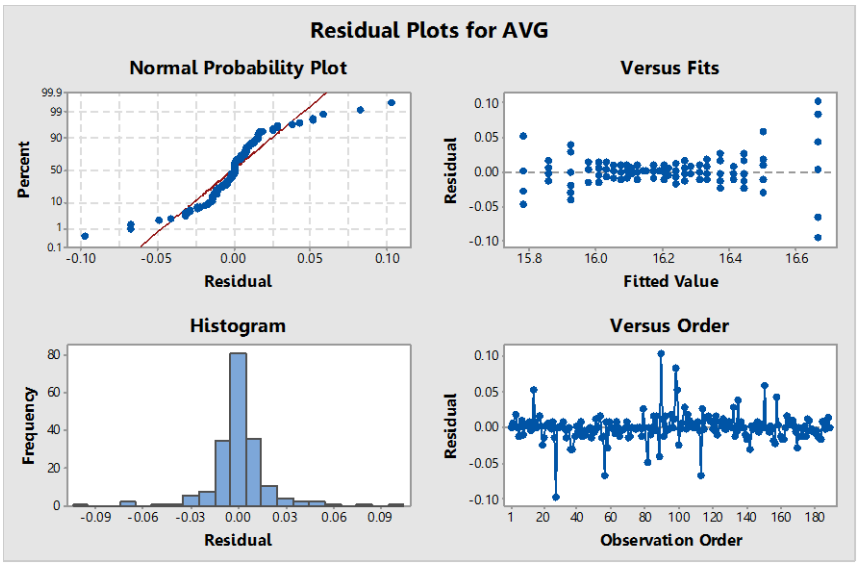
ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ระดับต่ำ (-)	จุดกึ่งกลาง (0)	ระดับสูง (+)	
1. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	300	305	kg/cm^2
2. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง	3	5	7	วินาที
3. น้ำหนักเคมีที่กำหนด	140	146	152	กรัม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 4 ประการ คือ 1) มีการกระจายตัวแบบปกติ 2) ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 และ 4) มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (σ^2) ดังรูปที่ 15 จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้

จากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) จากรูปที่ 16 พบว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 99.01% และค่า R-Sq(adj) มีค่าเท่ากับ 98.65% ซึ่งมีค่ามากกว่า 75% และค่าใกล้เคียง 100% ซึ่งหมายความว่า ในความผันแปรของค่าความหนาชิ้นงานทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 98.65% แสดงว่าเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ และสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปทำนายผล เพื่อหาคำตอบได้

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาที่ค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ 1) ค่าแรงดันที่กำหนด) Pressure) 2) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง)Time) และ 3) น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด)Weight) ส่งผลกระทบกับขนาดความหนาของชิ้นงานเช่นเดียวกันกับการทดลองแบบแบบ 2^k Full Factorial Design จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ของโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าทำนายค่าเฉลี่ย ($\bar{y}$) เท่ากับ 16.2014 ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย (Target) คือ 16.20 ที่ความพึงพอใจโดยรวม)Desirability: d เท่ากับ (0.99749 ซึ่งเป็นค่าแสดง



รูปที่ 15 Residual Plots

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

ความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยและค่าตอบสนองที่มีความสัมพันธ์กันถึง 99.75 % โดยมีค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้ ค่าแรงดันที่กำหนด)Pressure) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 295 kg/cm^2 เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง)Time) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 7 วินาที และน้ำหนักผงเคมีที่กำหนด)Weight) มีค่าระดับที่เหมาะสมเท่ากับ 146 กรัม ดังรูปที่ 17 และตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

Factor	ค่าระดับที่เหมาะสม	หน่วย
1. ค่าแรงดันที่กำหนด	295	kg/cm^2
2. เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงาน	7	วินาที
3. น้ำหนักผงเคมีที่กำหนด	146	กรัม

General Factorial Regression: AVG versus Pressure, Time, Weight

Factor Information

Factor	Levels	Values
Pressure	3	295, 300, 305
Time	3	3, 5, 7
Weight	3	140, 146, 152

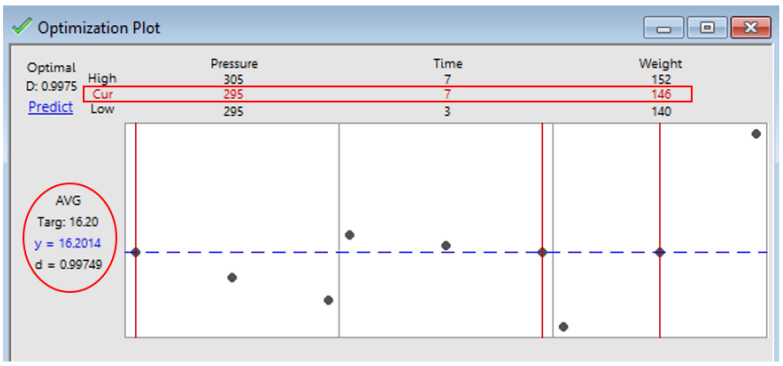
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	7.30457	0.28095	620.55	0.000
Linear	6	6.98965	1.16494	2573.13	0.000
Pressure	2	1.12584	0.56292	1243.38	0.000
Time	2	0.18972	0.09486	209.52	0.000
Weight	2	5.67410	2.83705	6266.49	0.000
2-Way Interactions	12	0.23609	0.01967	43.46	0.000
Pressure*Time	4	0.01356	0.00339	7.49	0.000
Pressure*Weight	4	0.18583	0.04646	102.62	0.000
Time*Weight	4	0.03670	0.00917	20.26	0.000
3-Way Interactions	8	0.07883	0.00985	21.76	0.000
Pressure*Time*Weight	8	0.07883	0.00985	21.76	0.000
Error	162	0.07334	0.00045		
Total	188	7.37791			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0212775	99.01%	98.85%	98.65%

รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์การทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design



รูปที่ 17 Optimization Plot

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้

เมื่อได้ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าที่ได้มาดำเนินการทดลองผลิตและติดตามผลการผลิตเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง โดยเก็บข้อมูลติดตามผลการปรับปรุงจากชิ้นงานผลิตภัณฑ์รุ่น A สูตรเคมี A จำนวน 100 ชิ้น โดยผลวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการมีรายละเอียดดังนี้ จากการทำ Normality Test ในรูปที่ 18 พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.109 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลความหนาที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยสามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 19

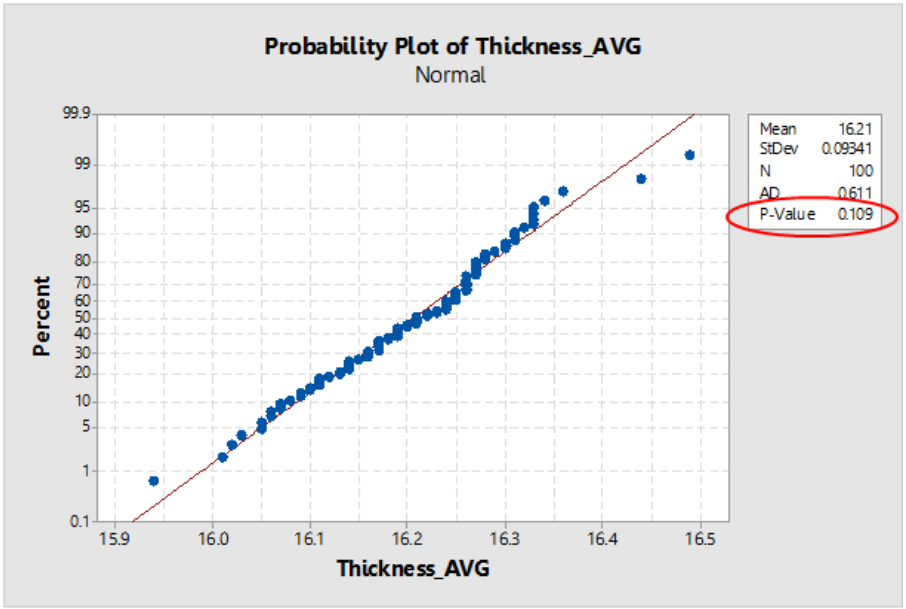
จากรูปที่ 19 ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis) จะเห็นได้ว่าความสามารถของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนหลังทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้จากชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น พบว่าขนาดความหนาของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.21 มิลลิเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 และดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ C_p ซึ่งเท่ากับ 1.47 และค่า C_{pk} ซึ่งเท่ากับ 1.44 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33 ซึ่งสรุปได้ว่าความสามารถของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนหลังทดลองผลิตชิ้นงานตามผลที่ได้นั้นมีความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้น และจากการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามรายการอื่น ๆ ที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการยอมรับชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ผลการตรวจสอบคุณภาพผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทุกรายการ และจากตารางที่ 5 พบว่า ความหนาของชิ้นงานเป็นไปตามคุณสมบัติที่กำหนดที่ต้องการความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 16.20 ± 0.40 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 16.20 มิลลิเมตร ค่าความหนาต่ำสุดเท่ากับ 15.79 มิลลิเมตร และค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 16.45 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตการยอมรับได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของความสามารถของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุงข้อมูลจากรูปที่ 20 และ 21 พบว่ากระบวนการหลังการปรับปรุงมีความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้น

จากนั้นได้นำค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลอง มาใช้กับกระบวนการผลิตจริงซึ่งพบว่าความสามารถของกระบวนการที่ดีขึ้นเช่นกัน

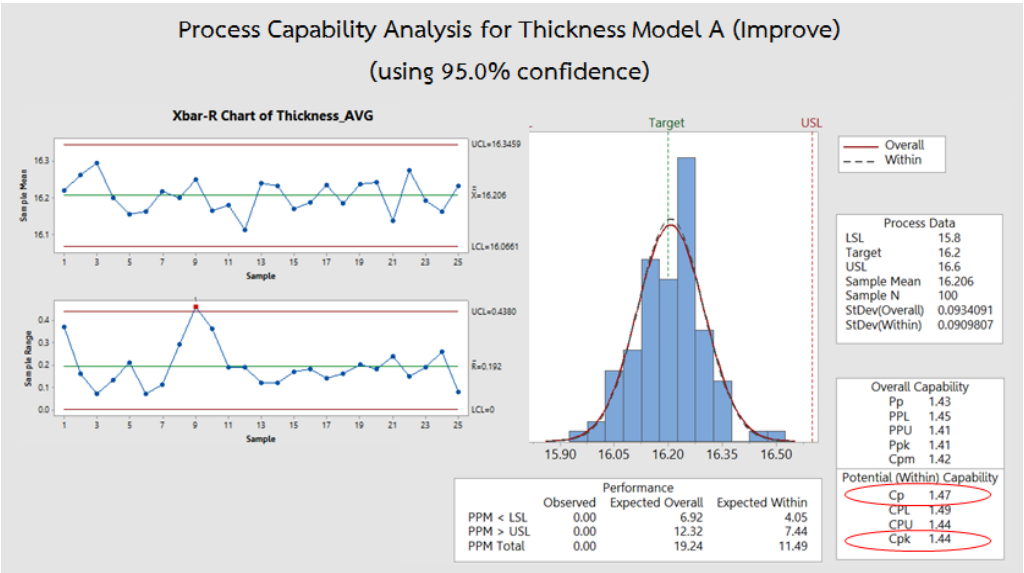
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลของความสามารถของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	หน่วย
1. ค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงาน	17.00	16.20	มิลลิเมตร
2. ค่าต่ำสุดความหนาของชิ้นงาน	16.47	15.97	มิลลิเมตร
3. ค่าสูงสุดความหนาของชิ้นงาน	17.51	16.45	มิลลิเมตร
4. ค่าพิสัย (R)	1.04	0.48	มิลลิเมตร
5. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.25	0.09	-

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002



รูปที่ 18 Probability Plot สำหรับขนาดความหนาของชิ้นงาน



รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วยโปรแกรม Minitab

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

3.2 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลของผลิตภัณฑ์รุ่น A สูตรเคมี A ที่เลือกทำการศึกษาพบว่า จากการลดค่าเผื่อความผันแปรของขนาดความหนาในแต่ละกระบวนการ ตามตารางที่ 6 และใช้ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ตามตารางที่ 4 ซึ่งหลังทำการปรับปรุง สามารถทำให้ค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตเดิมที่เผื่อไว้ 24 กรัม หรือ 17.85% หลังการปรับปรุงจะเหลือค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีเพียง 10 กรัมหรือ 7.35% ตามตารางที่ 6 คิดเป็นน้ำหนักที่ลดลงต่อชิ้นเท่ากับ 14 กรัม หรือคิดเป็นน้ำหนักที่ลดลง 8.75% และได้ทำการขยายผลไปยังผลิตภัณฑ์รุ่นอื่น ๆของดิสก์เบรกสูตรเคมี A ในการผลิตจริง โดยลดค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีจากเดิม 17.85% ลงเหลือ 7.35% และใช้ระดับค่าควบคุมของแต่ละปัจจัยเช่นเดียวกันกับผลิตภัณฑ์รุ่น A ซึ่งทั้งหมดผ่านการตรวจสอบคุณภาพตามที่ทางบริษัทกรณีศึกษากำหนด

ปัจจุบันบริษัทในกรณีศึกษาได้กำหนดเกณฑ์ค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกทุกรุ่นในสูตรเคมี A ใหม่ โดยให้เผื่อไว้เพียง 7.35% ซึ่งทำให้สามารถลดน้ำหนักผงเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของทุกรุ่นลงได้ 8.75% ซึ่งอนุมานได้ว่าหากบริษัทมียอดการผลิตเท่ากับปี 2562 ซึ่งมีปริมาณการใช้วัตถุดิบเคมีสูตร A เท่ากับ 276,279 กิโลกรัม บริษัทจะมีปริมาณการใช้น้ำหนักเคมีเพียง 251,414 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักเคมีที่ลดลงเท่ากับ 24,865 กิโลกรัม ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนลงได้เป็นจำนวนเงิน 1,989,212 บาท และสามารถลดต้นทุนการผลิตดิสก์เบรกเกรดเคมี A ลงได้ 2.60%

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าเผื่อน้ำหนักเคมีและค่าเผื่อขนาดความหนา ผลิตภัณฑ์ A สูตรเคมี A ของแต่ละกระบวนการ ก่อนและหลังปรับปรุง

กระบวนการ	น้ำหนักเคมีมาตรฐาน (กรัม)	ค่าเผื่อน้ำหนักเคมี (g)/ ค่าเผื่อขนาดความหนา(mm)				
		น้ำหนักเคมีชิ้นงาน (กรัม)	กระบวนการฝนตกแต่ง	กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน	ผ่าร่องและลบมุม	รวมค่าเผื่อทั้งหมด
ก่อนปรับปรุง	136	160	7 g 5.25% +0.50 mm	14 g 10.57% +1.00 mm	3 g 2.04%	24 g 17.85% +1.50 mm
หลังปรับปรุง	136	146	2 g 1.47% +0.10 mm	5 g 3.68% +0.40 mm	3 g 2.04%	10 g 7.35% +0.50 mm

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปสาเหตุปัจจัยของปัญหาที่ทำให้มีปริมาณผงเคมีที่เหลือจากกระบวนการผลิตผ้าเบรกเป็นจำนวนมากนั้น ซึ่งพบว่าสาเหตุเกิดจากในกระบวนการผลิตผ้าเบรกก่อนปรับปรุงนั้น มีความจำเป็นต้องเผื่อน้ำหนักผงเคมีไว้เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิต อันเนื่องมาจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการฝนตกแต่ง 2) ค่าเผื่อความผันแปรของความหนาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และ 3) การเผื่อเนื้อชิ้นงานสำหรับการผ่าร่องและการลบมุม

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Design) เพื่อต้องการตรวจสอบว่ามีปัจจัยหลัก (Main Effect) ปัจจัยใดบ้าง จากทั้งหมด 4 ปัจจัยเบื้องต้น ที่ได้การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis คือ 1) ค่าความหนาแน่นผงเคมีที่กำหนด (Bulk Density) 2) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) 3) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) และ 4) น้ำหนักเคมีที่กำหนด (Weight) ที่ส่งผลกระทบต่อขนาดความหนาของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ซึ่งพบว่ามีเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้น ที่ส่งผลกระทบอย่างแท้จริงต่อขนาดความหนาของชิ้นงานดังนี้ 1) ค่าแรงดันที่กำหนด (Pressure) 2) เวลาที่กำหนดในการอัดชิ้นงานต่อครั้ง (Time) และ 3) น้ำหนักเคมีที่กำหนด (Weight) และนำปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างแท้จริงนั้นไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ 3 ระดับ (3^k Full Factorial Design) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงจะสามารถลดปริมาณการใช้ผงเคมีในการผลิตผ้าเบรกลงได้ 8.75% ส่วนค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกเกรดเคมี A ที่ทางบริษัทกรณีศึกษากำหนดไว้ 17.85% นั้นมากเกินไป ซึ่งค่าเผื่อน้ำหนักผงเคมีเกรดเคมี A ในการผลิตผ้าเบรกที่เหมาะสมนั้นควรอยู่ที่ 7.35%

4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถขยายผลการออกแบบการทดลองดังกล่าวไปยังสูตรเคมีอื่น ๆ และสามารถนำหลักการออกแบบการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้ เพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับกระบวนการผลิตและสามารถหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ในกระบวนการผลิตดิสก์เบรกที่เหมือนกัน ซึ่งทำให้มีค่าพารามิเตอร์ที่เป็นมาตรฐานโดยส่งผลให้สามารถลดต้นทุนของกระบวนการผลิตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทผู้ผลิตผ้าเบรกที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลและขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญร่วมกันระดมความคิดเพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศิลปากรที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] https://kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledKS/article/KSMEAnalysis/Pages/Thai-Automotive_4-0.aspx. (Accessed on 6 August 2019)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.002

[2] P. Boonkliang, Variation reduction of acrylic foam tape width in slitting process by six sigma approach, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009, pp. 130-138. (in Thai)

[3] M. Sae-ung, A study of factors affecting plating thickness in electro-plating Process, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2001, pp. 62-107. (in Thai)

[4] W. Thaweesuk, The study of factors effecting the crown inducement of write/read head assembly of hard disk drive by using the design of experiment, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2003, pp. 84-101. (in Thai)

[5] P. Natasan, Design of experiment for analyzing factors in corrugated box production process, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2010, pp. 93-159. (in Thai)

[6] W. Hemso, Defect reduction from brake pads production by using DMAIC method, Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. 2013, pp. 97-173. (in Thai)

[7] P. Parakawong na ayuthaya, Design of experiment to waste reduction injection process of electronic parts, Thesis, Silpakorn University, Thailand. 2018, pp. 15-21, 77-88. (in Thai)

[8] http://leanmanufacturing-tawatchai.blogspot.com/2009/12/why-why-analysis-5-gen.html (Accessed on 10 August 2019)

[9] https://www.sasimasuk.com/15842591/brainstorm. (Accessed on 15 August 2019)

[10] A. Kengwinit, Application of experimental design for improving kurtosis process capability of pitch in suspension industry, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2010, pp. 7-16. (in Thai)