วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30, ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2563
The Journal of KMUTNB., Vol. 30, No. 1, Jan.–Mar. 2020

บทความวิจัย

การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องแตกร้าวของสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ปูพื้น

พงศภัค จักรสิรินนท์* และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3075 5000 อีเมล: peterryung@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.09.009
รับเมื่อ 24 พฤษภาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 13 มิถุนายน 2562 ตอบรับเมื่อ 9 กรกฎาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 30 กันยายน 2562
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยในการผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม. จากข้อบกพร่องแตกร้าว โดยได้นำหลักการของซิกซ์ซิกมา มาใช้ปรับปรุงงานและใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจากการแตกร้าวลดลงเหลือน้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้คือ ควรปรับปรุงขาเกลี่ยคอนกรีตเป็นแบบเหล็กคานยาว และใช้ความสูงขาเกลี่ยคอนกรีตตัวก้อน 5 มิลลิเมตร ความสูงขาเกลี่ยคอนกรีตผิวหน้า 5 มิลลิเมตร และแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า 300 กิโลนิวตัน ซึ่งส่งผลให้จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยลดลงจาก 0.031 ต่อชิ้น เหลือ 0.011 ต่อชิ้น ต่ำกว่าเป้าหมายที่ 0.012 ต่อชิ้น และสามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของเสียจะลดลงได้ 794,650 บาทต่อปี

คำสำคัญ: กระเบื้องซีเมนต์ ข้อบกพร่องแตกร้าว ขาเกลี่ยคอนกรีต แรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า การออกแบบการทดลอง

การอ้างอิงบทความ: พงศภัค จักรสิรินนท์ และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, "การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องแตกร้าวของสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ปูพื้น," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 16–25, ม.ค.–มี.ค. 2563.

Research Article

Defective Reduction from Crack Defects in Cement Paving Tiles

Pongsapak Jaksirinont* and Napassavong Osothsilp
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3075 5000, E–mail: peterryung@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.09.009
Received 24 May 2019; Revised 13 June 2019; Accepted 9 July 2019; Published online: 30 September 2019
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research is to reduce defects per unit from crack defects of 3.5 cm thickness cement paving tiles. This research adopted the Six Sigma improvement methodology and used the Center Composite Design (CCD) method to find appropriate levels of factors to minimize defects per unit from crack defects. The appropriate levels of factors were obtained by using steel beam concrete shuttle, body concrete shuttle height of 5 mm, facing concrete shuttle height of 5 mm and vibrating production force of 300 kN after improvement, defects per unit was decreased from 0.031 per unit to 0.011 per unit, which was lower than the goal of 0.012 per unit. This improvement is expected to reduce the defective cost of 794,650 Baht per year.

Keywords: Cement Paving Tiles, Crack Defects, Concrete Shuttle, Vibrating Production Force, Experimental Design

Please cite this article as: P. Jaksirinont and N. Osothsilp, "Defective reduction from crack defects in cement paving tiles," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 1, pp. 16–25, Jan.–Mar. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการผลิตสินค้าบล็อกคอนกรีต โดยศึกษาเครื่องจักรที่รองรับการผลิตบล็อกคอนกรีตที่มีความหนา 4 ซม. ขึ้นไป แต่จากแนวโน้มความต้องการของลูกค้าที่ต้องการสินค้าขนาดบางและติดตั้งได้ง่าย จึงทำให้ต้องผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม. โดยใช้เครื่องจักรเดิมเพราะมีข้อจำกัดด้านการลงทุน จึงส่งผลให้เกิดสัดส่วนของเสียที่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 3.3% เกินกว่าเป้าหมายของโรงงานที่ 1.0% และคิดเป็นมูลค่าของเสียเท่ากับ 1,116,910 บาทต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเครื่องมือซิกซ์ซิกมา [1] มาใช้ศึกษาการหาระดับที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ของเครื่องจักร เพื่อลดสัดส่วนของเสียจากการผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม.

Nopdanai และ Napassavong [2] ศึกษาผลการใช้ Oxidized White Liquor (OWL) ในการผลิตเยื่อกระดาษ เพื่อให้เกิดความสว่างในการฟอกสี โดยใช้แนวทางของซิกซ์ ซิกมามาใช้ในการวิเคราะห์การปรับปรุงงาน ซึ่งมีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อทดลองและหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ได้ความสว่างในการฟอกสีตามเป้าหมาย

ศศิวิมล [3] ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์หาสาเหตุในการลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีตัวแปรตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนชิ้นงานเสีย (Defective Proportion) และจำนวนข้อบกพร่องต่อหน่วย (Defect per Units) ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา เลือกใช้แผนผังสาเหตุและผลในการหาสาเหตุของปัญหา ส่วนในขั้นตอนการปรับปรุงปัญหา เลือกใช้ผังต้นไม้ในการแสดงแนวทางการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องและจัดลำดับความสำคัญในการเลือกวิธีการแก้ไขปัญหา

ในการทำงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาความรู้และการแก้ปัญหาโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ โดยใช้การออกแบบการทดลองประเภท Design and Analysis of Experiments [4] ชนิดการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามที่ต้องการ ได้แก่ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด หรือค่าเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งการออกแบบพื้นผิวผลตอบมีรูปแบบดังนี้

1) การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง การออกแบบประเภทนี้จะสามารถสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง

ข้อดี คือ สมการความสัมพันธ์มีประสิทธิผลในการพยากรณ์ค่าจริงได้ดีที่สุด

ข้อเสีย คือ เมื่อมีการคำนวณค่า α ออกมาได้แล้วนั้น ในการทดลองจริงอาจไม่สามารถปรับระดับปัจจัยให้เท่ากับระดับ α ที่คำนวณออกมาได้

2) การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face-Centered Central Composite Design) การออกแบบประเภทนี้มีการพัฒนามาจากการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง โดยที่ค่า α เท่ากับ 1

ข้อดี คือ เนื่องจากค่า α เท่ากับ 1 จึงสามารถใช้ในกรณีที่ปัจจัยใดๆ ปรับได้เพียง 3 ระดับเท่านั้น

ข้อเสีย คือ ประสิทธิผลในการพยากรณ์ของสมการจะด้อยกว่าจากการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง

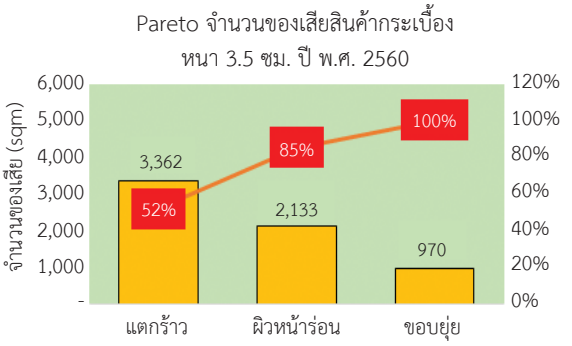
3) การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ในการออกแบบประเภทนี้เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ ได้แก่ –1, 0, +1 โดยไม่ได้มีการทดลองที่ระดับ $-\alpha$ และ $+\alpha$ และใช้ทดลองสำหรับปัจจัยตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป

ข้อดี คือ ในกรณีที่มี 3 หรือ 4 ปัจจัย จำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

ข้อเสีย คือ ประสิทธิผลในการพยากรณ์ของสมการจะด้อยกว่าจากการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง

2. วิธีการวิจัย

ใช้หลักการของซิกซ์ซิกมา และศึกษาการผลิตในอุตสาหกรรมคอนกรีต [5] ในการปรับปรุงงาน ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้



รูปที่ 1 พาเรโตจำนวนของเสียของแต่ละข้อบกพร่อง

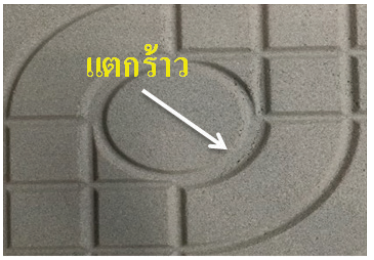
2.1 การศึกษาข้อมูลและนิยามปัญหา (Define Phase)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาข้อมูลและกำหนดขอบเขตของปัญหาในการปรับปรุงงาน โดยจากการเก็บข้อมูลสัดส่วนของเสียจากการผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม. พบข้อบกพร่องแตกร้าว (Crack) ผิวหน้าร่อน (Gliding) และขอบยุ่ย (Maceration) ซึ่งในการปรับปรุงงานนั้นได้มีการจัดตั้งทีมงานที่ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญในการผลิตและด้วยข้อจำกัดในด้านทรัพยากรและเวลา ทางทีมงานจึงเลือกปรับปรุงงานจากข้อบกพร่องแตกร้าว เพราะเป็นข้อบกพร่องที่มีสัดส่วนของเสียมากที่สุดที่ 52% ดังรูปที่ 1 โดยลักษณะข้อบกพร่องแตกร้าวแสดงได้ดังรูปที่ 2

2.2 การวัดสภาพปัญหา (Measure Phase)

ในขั้นตอนนี้เป็นการวัดความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดข้อมูลจากการทดลอง เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลแบบนับ จึงเลือกใช้การประเมินการวัดข้อมูลแบบนับ (Attribute Agreement Analysis) โดยตัวชี้วัดคือ ความแม่น (% Accuracy) และความเที่ยง (% Repeatability) ซึ่งทั้ง 2 ตัวชี้วัด ใช้เกณฑ์ยอมรับที่ค่ามากกว่า 85% ขึ้นไป ในส่วนของวิธีการประเมินนั้นใช้พนักงานที่ทำงานในตำแหน่งตรวจสอบคุณภาพสินค้าจำนวน 3 คน มาทดสอบชี้บ่งตัวอย่างสินค้าจำนวน 20 ชิ้น ทดสอบซ้ำ 2 ครั้งต่อชิ้น แสดงได้ดังรูปที่ 3

ในการทดสอบเพื่อประเมินการวัดข้อมูลแบบนับ ได้ผลของตัวชี้วัดดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ข้อบกพร่องประเภทแตกร้าวของสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม.

รูปที่ 3 ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพสินค้า

ตารางที่ 1 ผลการประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด

พนักงาน	ความแม่น	ความเที่ยง
1	90%	95%
2	95%	100%
3	100%	100%
รวมทั้งหมด	85%	85%

จากตารางที่ 1 พบว่าพนักงานทั้ง 3 คน และผลรวมทั้งหมดผ่านเกณฑ์ยอมรับของความแม่นและความเที่ยง ดังนั้นระบบการวัดนี้สามารถใช้วัดผลในการปรับปรุงงานได้ ต่อมาจึงทำการเก็บข้อมูลของขั้นตอนก่อนปรับปรุงงาน โดยกำหนดตัวแปรตอบสนองในการทดลองคือ จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ย (DPU) จากข้อบกพร่องแตกร้าว ซึ่งการทดลองเก็บของมูลนั้นใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 1,000 ชิ้น เพราะเป็นปริมาณการผลิตสินค้าต่อรอบการผลิต จากผลการทดลองพบว่าจำนวน

ข้อบกพร่องเฉลี่ย จากข้อบกพร่องแตกร้าว มีค่าเท่ากับ 0.031 โดยงานวิจัยนี้มีการตั้งเป้าหมายให้จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยลดลงจากก่อนปรับปรุงงานไม่น้อยกว่า 60% ดังนั้นเป้าหมายในการปรับปรุงงานคือ จำนวนข้อบกพร่องต่อหน่วยเท่ากับ 0.012

จากจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยของก่อนปรับปรุงและเป้าหมาย สามารถนำมาคำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการประมาณจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยก่อนและหลังปรับปรุง โดยอ้างอิงจากสมการที่ (1)

$$N = \frac{4}{\left(\sqrt{\theta_0} - \sqrt{\theta_1}\right)^2} \qquad (1)$$

โดยที่ N คือขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลก่อนและหลังปรับปรุง

θ_0 คือค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยของข้อมูลก่อนปรับปรุง

θ_1 คือค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยของเป้าหมาย

จากสมการที่ (1) แทน $\theta_0 = 0.031$ และ $\theta_1 = 0.012$ จึงได้ขนาดตัวอย่างทดลองเท่ากับ 955 ชิ้น ซึ่งเป็นจำนวนน้อยที่สุดที่ทำให้พบความแตกต่างของก่อนและปรับปรุง โดยจากการทดลองในช่วงก่อนปรับปรุงที่ใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 1,000 ชิ้น ซึ่งมากกว่าขนาดตัวอย่างจากการคำนวณตามสมการข้างต้น ดังนั้นขนาดตัวอย่าง 1,000 ชิ้น จึงเพียงพอ

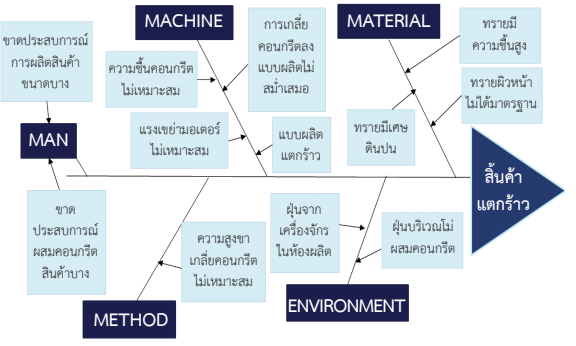
2.3 การวิเคราะห์ปัญหา (Analyze Phase)

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาสาเหตุของปัญหา โดยเริ่มจากการใช้แผนผังสาเหตุและผล แสดงได้ดังรูปที่ 4

เมื่อได้สาเหตุของปัญหาแล้วจึงทำการจัดลำดับความสำคัญ โดยใช้เครื่องมือเมทริกซ์สาเหตุและผล ดังนี้

1) ระดับสูง คือ ปัจจัยนำเข้าที่มีผลโดยตรงและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องนั้นมาก ให้คะแนนผลกระทบเป็น 9

2) ระดับปานกลาง คือ ปัจจัยนำเข้าที่มีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องนั้นในระดับปานกลาง ให้คะแนนผลกระทบเป็น 3



รูปที่ 4 แผนผังสาเหตุและผล

3) ระดับต่ำ คือ ปัจจัยนำเข้าที่มีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องนั้นน้อย ให้คะแนนผลกระทบเป็น 1

โดยผลการให้คะแนน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เมทริกซ์สาเหตุและผลของข้อบกพร่องแตกร้าว

สาเหตุของปัญหาแตกร้าว	คะแนนผลกระทบ
เกลี่ยคอนกรีตลงแบบผลิตไม่สม่ำเสมอ	9
ระดับความสูงขาเกลี่ยไม่เหมาะสม	9
ความชื้นของคอนกรีตไม่เหมาะสม	3
แรงเขย่าจากมอเตอร์เขย่าไม่เหมาะสม	9
แบบผลิตแตกร้าวหรือเหล็กโก่งงอ	9
ทรายผิวหน้าไม่ได้มาตรฐาน	1
ทรายมีเศษดินปน	1
ทรายมีความชื้นสูงจากต้นแหล่ง	1
ขาดประสบการณ์การผลิตสินค้าบาง	1
ขาดประสบการณ์การผสมสินค้าบาง	1
ฝุ่นจากเครื่องจักรในการผลิต	1
ฝุ่นจากเครื่องผสมคอนกรีต	1

จากตารางที่ 2 จึงคัดเลือกปัจจัยที่มีคะแนนผลกระทบเท่ากับ 9 และ 3 ไปศึกษาเพื่อปรับปรุงงาน เพราะปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อข้อบกพร่องแตกร้าวมากและปานกลาง โดยวิธีการปรับปรุงงานแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

การจัดทำมาตรฐานและควบคุมปัจจัยนำเข้า ซึ่งวิธีนี้นำมาปรับปรุงงานสาเหตุเรื่องแบบผลิตแตกร้าวหรือเหล็กโก่งงอ เพื่อให้ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน โดยได้ปรับปรุงงานในประเภทนี้แล้ว

การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงงาน โดยเริ่มจากเรื่องเกลี่ยคอนกรีตลงแบบผลิตไม่สม่ำเสมอ ซึ่งใช้การทดลองรูปแบบของขาเกลี่ยที่ทำให้คอนกรีตลงแบบได้สม่ำเสมอ และส่งผลให้ข้อบกพร่องแตกร้าวลดลงเหลือน้อยที่สุดด้วยวิธีทดลองแบบปัจจัยเดียว จากนั้นใช้รูปแบบของขาเกลี่ยดังกล่าวในการทดลองหาระดับของปัจจัยในการตั้งค่าเครื่องจักรที่ทำให้ข้อบกพร่องแตกร้าวลดลงเหลือน้อยที่สุด ด้วยวิธีออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ เรื่องระดับความสูงขาเกลี่ยไม่เหมาะสม ที่ต้องทดลองหาระดับความสูงขาเกลี่ยคอนกรีตทั้งฝั่งตัวก้อนและฝั่งผิวหน้าที่เหมาะสม เพราะในการผลิตสินค้ามีการป้อนคอนกรีตจากฝั่งตัวก้อนและผิวหน้า นอกจากนั้นยังมีเรื่องความชื้นของคอนกรีตที่ไม่เหมาะสมและแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้าที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยนำเข้าและประเภทของการทดลอง

ปัจจัยนำเข้า	ประเภทการทดลอง
รูปแบบขาเกลี่ยคอนกรีต	ทดลองแบบปัจจัยเดียว
ความสูงขาเกลี่ยฝั่งตัวก้อน	ทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ แบบส่วนประสมกลาง
ความสูงขาเกลี่ยฝั่งผิวหน้า	
ความชื้นคอนกรีต	
แรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า	

2.4 การปรับปรุง (Improve Phase)

ในขั้นตอนนี้เริ่มจากทดลองในปัจจัยนำเข้ารูปแบบขาเกลี่ยคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบดังนี้

1) ขาเกลี่ยแบบปัจจุบัน ดังรูปที่ 5

2) ขาเกลี่ยแบบเหล็กคานยาว ดังรูปที่ 6

3) ขาเกลี่ยแบบหนาม ดังรูปที่ 7

การทดลองนี้มีขนาดตัวอย่าง 1,000 ชิ้นต่อครั้ง โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

รูปที่ 5 ชุดขาเกลี่ยคอนกรีตแบบปัจจุบัน

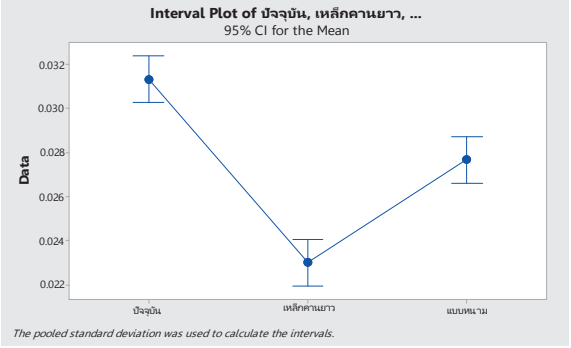
รูปที่ 6 ชุดขาเกลี่ยคอนกรีตแบบเหล็กคานยาว

รูปที่ 7 ชุดขาเกลี่ยคอนกรีตแบบหนาม

ตารางที่ 4 จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยการทดลองรูปแบบของชุดขาเกลี่ย

ลำดับ	ปัจจุบัน	เหล็กคานยาว	แบบหนาม
1	0.031	0.023	0.028
2	0.032	0.024	0.027
3	0.031	0.022	0.028
ค่าเฉลี่ย	0.031	0.023	0.028

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 เมื่อนำไปทดสอบด้วยวิธีการ One–way ANOVA และเปรียบเทียบด้วยวิธีการ Tukey Pairwise Comparisons สรุปผลได้ดังนี้



รูปที่ 8 Interval Plot

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Type	N	Mean	Grouping
ปัจจุบัน	3	0.031333	A
แบบหนาม	3	0.027667	B
เหล็กคานยาว	3	0.023000	C

Means that do not share a letter are significantly different.

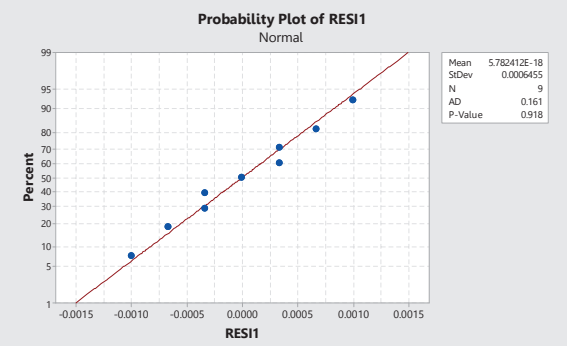
รูปที่ 9 ผลการทดสอบ Tukey Pairwise Comparisons

รูปแบบของชุดขาเกลี่ยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อข้อบกพร่องแตกร้าวที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแบบเหล็กคานยาวมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.023 แบบปัจจุบันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.031 และแบบหนามมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.028 ซึ่งมีความเชื่อมั่นที่ 95% แสดงดังรูปที่ 8

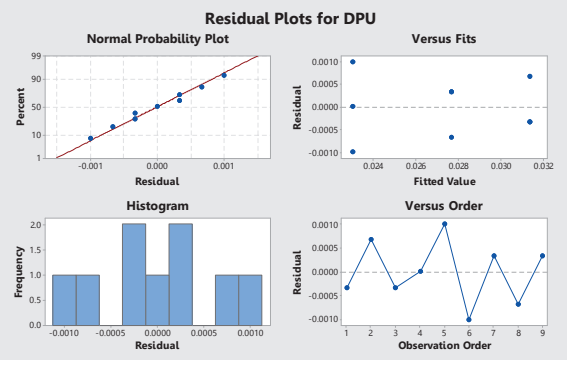
ผลการทดสอบ Tukey Pairwise Comparisons พบว่าแต่ละรูปแบบของชุดขาเกลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เพราะค่า Grouping ที่ไม่ซ้ำกันเลย โดยจากรูปที่ 9 พบว่ารูปแบบเหล็กคานยาวมีจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่ำที่สุด ซึ่งรูปแบบหนามและแบบปัจจุบันมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ จึงสรุปได้ว่ารูปแบบเหล็กคานยาวเป็นรูปแบบขาเกลี่ยที่ดีที่สุด

ผลการทดสอบมีการกระจายตัวแบบปกติเพราะค่า *p*-value จากการวิเคราะห์ Normality Test of Residual > 0.05 ดังรูปที่ 10

ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันเพราะกราฟ Versus Order ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน และมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเพราะกราฟ Versus Fits ไม่มีแนวโน้มหรือการกระจายตัวแบบกรวยปากเปิด ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 Normality Test of Residual



รูปที่ 11 Residual Plot

จากผลการทดลองรูปแบบของขาเกลี่ย จึงสรุปได้ว่ารูปแบบของชุดขาเกลี่ยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อข้อบกพร่องแตกร้าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ขาเกลี่ยรูปแบบเหล็กคานยาวในการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางต่อไป เพราะมีค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยการทดลองนี้มีเป้าหมายคือ หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจากข้อบกพร่องแตกร้าวเหลือน้อยที่สุด จึงเลือกใช้วิธีการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางแบบ CCD (Central Composite Design) เพราะสมการความสัมพันธ์มีประสิทธิผลในการพยากรณ์ค่าจริงได้ดีกว่าชนิดการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face-Centered Central Composite Design) และการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์เบห์นเคน (Box-Behnken Design) โดยปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงได้ดังตารางที่ 5

Response Surface Regression: Crack versus A, B, C, D

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.000125	0.000025	30.85	0.000
Linear	3	0.000103	0.000034	42.53	0.000
A	1	0.000051	0.000051	62.95	0.000
B	1	0.000007	0.000007	8.68	0.007
D	1	0.000045	0.000045	55.96	0.000
2-Way Interaction	2	0.000022	0.000011	13.33	0.000
A*B	1	0.000008	0.000008	9.33	0.005
B*D	1	0.000014	0.000014	17.34	0.000
Error	25	0.000020	0.000001		
Lack-of-Fit	19	0.000013	0.000001	0.55	0.854
Pure Error	6	0.000007	0.000001		
Total	30	0.000145			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0009005	86.05%	83.26%	79.90%

รูปที่ 12 ผลของ Stepwise Regression

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองแบบ CCD

ปัจจัย	หน่วย	–2	–1	0	1	2
A	mm	5	10	15	20	25
B	mm	5	10	15	20	25
C	%	4	4.5	5	5.5	6
D	kN	60	120	180	240	300

จากตารางที่ 5 สัญลักษณ์แทนปัจจัยดังนี้

A คือความสูงขาเกลี่ยฝั่งตัวก้อน

B คือความสูงขาเกลี่ยฝั่งผิวหน้า

C คือความชื้นคอนกรีต

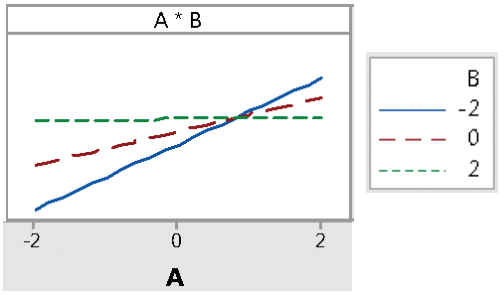
D คือแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า

จากการทดลอง CCD ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 12

จากผลการทดลองข้างต้น สรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขาเกลี่ยตัวก้อน (A) และความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า (B) ดังรูปที่ 13

เมื่อปัจจัย A ซึ่งคือความสูงขาเกลี่ยฝั่งตัวก้อน เพิ่มสูงขึ้นจาก –2 ไปที่ 2 ในทุกระดับของปัจจัย B ซึ่งคือความสูงขาเกลี่ยฝั่งผิวหน้า พบว่ามีค่า DPU แตกร้าวเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นปัจจัย A จึงมีผลต่อข้อบกพร่องแตกร้าวในทิศทางที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะขาเกลี่ยคอนกรีตตัวก้อนที่ระดับสูงขึ้น ส่งผลให้เกลี่ยคอนกรีตในชั้นตัวก้อนกระจายลงแบบผลิตได้ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การขึ้นรูปมีการแตกร้าวจากการรับแรงของคอนกรีตชั้นตัวก้อน

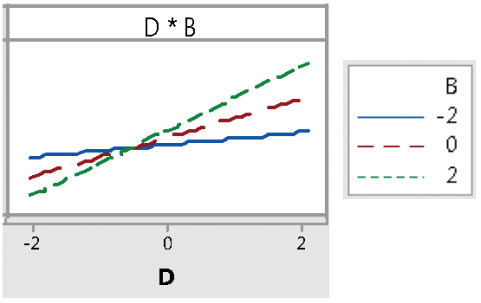


รูปที่ 13 Interaction Plot ระหว่างปัจจัย A และ B

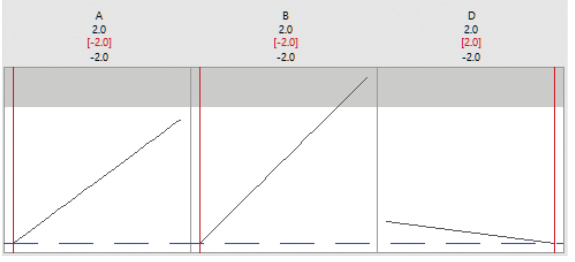
ที่ไม่เท่ากัน

เมื่อเปลี่ยนระดับปัจจัย A ลดลงจาก 2 ไปที่ -2 พบว่าปัจจัย B ที่ระดับต่ำ (–2) มีค่า DPU แตกร้าวที่ลดลงในสัดส่วนที่มากกว่า ปัจจัย B ที่ระดับสูง (2) ดังนั้นปัจจัย A และ B จึงมีผลร่วมต่อข้อบกพร่องแตกร้าว โดยที่ระดับปัจจัย A และ B ยิ่งต่ำทั้งคู่จะทำให้ DPU แตกร้าวมีค่าน้อยที่สุด เพราะที่ระดับความสูงขาเกลี่ยต่ำทำให้คอนกรีตกระจายตัวได้ดีทั้งชั้นตัวก้อนและผิวหน้า เมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ชั้นมีการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ จะยิ่งส่งผลให้การขึ้นรูปเกิดการแตกร้าวได้น้อยที่สุด ดังนั้นระดับที่เหมาะสมคือ A ที่ –2 และ B ที่ –2

พบข้อสังเกต กราฟปัจจัย B ที่ระดับยิ่งต่ำ (–2) จะมีความชันกราฟสูงขึ้น โดยในระดับปัจจัยของ A และ B ที่ต่ำจะส่งผลให้ DPU แตกร้าวต่ำที่สุด แต่ที่ระดับปัจจัย A สูง แต่ B ต่ำ ส่งผลให้เกิด DPU แตกร้าวสูงสุด เพราะที่ระดับปัจจัย A สูงคือ ความสูงขาเกลี่ยชั้นตัวก้อนสูง ส่งผลให้คอนกรีตชั้นตัวก้อนที่ Feed ลงในแบบผลิตก่อน มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อคอนกรีตชั้นผิวหน้าถูกป้อนลงแบบทับชั้นตัวก้อนและมีการเกลี่ยด้วยขาเกลี่ยในระดับที่ต่ำ (B ระดับต่ำ) ทำให้ขาเกลี่ยผิวหน้ามีการติดขัดในการเกลี่ยจากชั้นคอนกรีตและเม็ดหินของคอนกรีตชั้นตัวก้อนที่ไม่มีความสม่ำเสมอ และเรียบ ส่งผลให้คอนกรีตชั้นผิวหน้าไม่มีความสม่ำเสมอและคอนกรีตทั้ง 2 ชั้น เกิดการเสียดสีกัน ส่งผลให้มีการแตกร้าวที่สูงกว่าปัจจัย B ที่ระดับสูง (2) ที่แม้จะกระจายคอนกรีตชั้นผิวหน้าลงไม่ดี แต่ไม่พบการติดขัดและเสียดสีของอุปกรณ์



รูปที่ 14 Interaction Plot ระหว่างปัจจัย B และ D



รูปที่ 15 Optimization Plot

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า (B) และแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า (D) ดังรูปที่ 14

เมื่อปัจจัย D ซึ่งคือแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า เพิ่มสูงขึ้นจาก –2 ไปที่ 2 ในทุกระดับของปัจจัย B ซึ่งคือความสูงขาเกลี่ยฝั่งผิวหน้า พบว่ามีค่า DPU แตกร้าวเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นปัจจัย D จึงมีผลต่อข้อบกพร่องแตกร้าวในทิศทางที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะการเพิ่มแรงเขย่าที่สูงขึ้น ทำให้สินค้าขนาดบางต้องรับแรงการกดอัดผลิตที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดโอกาสการแตกร้าวของสินค้าได้สูงขึ้นในขณะกดอัดขึ้นรูปสินค้า

เมื่อเปลี่ยนระดับปัจจัย D เพิ่มสูงขึ้นจาก –2 ไปที่ 2 พบว่าปัจจัย B ที่ระดับสูง (2) มีค่า DPU แตกร้าวที่สูงขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่า ปัจจัย B ที่ระดับต่ำ (–2) ดังนั้นปัจจัย B และ D จึงมี Interaction Effect ต่อข้อบกพร่องแตกร้าว โดยทั้งระดับปัจจัยของ B ที่สูงขึ้นคือความสูงขาเกลี่ยคอนกรีตผิวหน้าสูง ทำให้คอนกรีตกระจายลงในแบบผลิตไม่สม่ำเสมอ และระดับปัจจัยของ D ที่สูงคือ แรงเขย่าขึ้นรูปที่สูง ซึ่งการใช้แรงกดขึ้นรูปที่สูงในบริเวณที่คอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ทำให้การรับแรงในบริเวณนั้นยิ่งเกิดการแตกร้าว ดังนั้นทั้งปัจจัย B และ D ที่ระดับสูง ยิ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวสูงที่สุด

พบข้อสังเกต กราฟปัจจัย B ที่ระดับยิ่งสูง (2) จะมีความชันกราฟสูงขึ้น ซึ่งพบว่าปัจจัย D ที่ระดับต่ำสุด (–2) และปัจจัย B ที่ระดับสูงสุด (2) จะส่งผลให้การแตกร้าวของสินค้าน้อยที่สุด เพราะที่ระดับปัจจัย D ที่ต่ำนั้นคือการใช้แรงขึ้นรูปสินค้าที่น้อย พบว่าการใช้แรงที่ต่ำเกินไปนั้น สินค้าไม่ได้เกิดการแตกร้าวขณะขึ้นรูป แต่ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยกว่าสินค้าที่ใช้แรงสูง ส่งผลในขั้นตอนการลำเลียงสินค้าที่ขึ้นรูปแล้วนำไปบ่มโดยใช้รถลำเลียงนั้นมีโอกาสเกิดการแตกร้าวในระหว่างลำเลียงได้ ซึ่งการใช้ปัจจัย B ที่ระดับสูง (2) คือคอนกรีตผิวหน้าลงสม่ำเสมอน้อยกว่าในระดับต่ำ (–2) และลงในปริมาณที่มากกว่า ทำให้คอนกรีตในส่วนนี้มีส่วนช่วยในการพยุงรับแรงการกระแทกในระหว่างการลำเลียงได้ดีกว่าปัจจัย B ที่ระดับต่ำ (–2) ดังนั้นระดับที่เหมาะสมคือ B ที่ 2 และ D ที่ –2

จากนั้นได้หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากวิธี Optimization ได้ผลดังรูปที่ 15 และตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง CCD

ปัจจัยนำเข้า	Coded Unit	Uncoded Unit
ความสูงขาเกลี่ยตัวก้อน	–2	5 mm
ความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า	–2	5 mm
แรงเขย่าในการขึ้นรูป	2	300 kN

จากระดับปัจจัยที่ได้จากตารางที่ 6 พบว่าสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขาเกลี่ยตัวก้อน (A) และความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า (B) ดังรูปที่ 13 ที่ระบุว่าระดับที่เหมาะสมคือ A ที่ –2 และ B ที่ –2 แต่ไม่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า (B) และแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า (D) ดังรูปที่ 14 ที่ระบุว่าระดับที่เหมาะสมคือ B ที่ 2 และ D ที่ –2 เพราะความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า (B) นั้นมีผลร่วมต่อทั้งความสูงขาเกลี่ยตัวก้อน (A) และแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า (D) ดังนั้นระดับที่เหมาะสมของทุกปัจจัยจึงพิจารณาจากสมการ

Regression ดังสมการที่ (2)

$$DPU = 0.013387 + 0.001458A + 0.000542B + 0.001375D - 0.000687A*B + 0.000937B*D \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) จึงเป็นการอธิบายได้ว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ได้แก่ A = –2, B = –2, D = 2 เพราะระดับของ A และ B ที่ต่ำสุดจะทำให้มีการแตกร้าวมีน้อยที่สุด เพราะความสูงขาเกลี่ยยิ่งต่ำทำให้คอนกรีตกระจายตัวได้ดีทั้งชั้นตัวก้อนและผิวหน้าและเมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ชั้น มีการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ จะยิ่งส่งผลให้การขึ้นรูปเกิดการแตกร้าวได้น้อยที่สุด ส่วนระดับของ B ที่ต่ำสุดและ D ที่สูงสุดนั้นเพราะที่ระดับปัจจัย B ต่ำสุดคือ ความสูงขาเกลี่ยผิวหน้าที่ระดับต่ำสุด ทำให้คอนกรีตกระจายลงในแบบผลิตได้อย่างดีและสม่ำเสมอ ทำให้การกดขึ้นรูปนั้นง่ายและส่งผลดี ดังนั้นแรงเขย่า (D) ที่สูงสุดจะไม่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวจากแรงที่ไปกดคอนกรีตบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอ โดยแรงเขย่าที่ต่ำกว่านี้จะทำให้สินค้าไม่แข็งแรง และแตกร้าวในการลำเลียงได้

2.5 การควบคุม (Control Phase)

ในขั้นตอนนี้จะนำค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากสมการพยากรณ์มาทดลองเพื่อยืนยันผลว่าจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจากข้อบกพร่องแตกร้าวนั้นได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ รวมทั้งจัดทำแผนควบคุมคุณภาพ

3. ผลการวิจัย

จากการทดลองโดยใช้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยกับสินค้าจำนวน 10 กลุ่มตัวอย่าง ขนาดตัวอย่างละ 1,000 ชิ้นต่อกลุ่มตัวอย่าง พบว่าจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจากข้อบกพร่องแตกร้าวลดลงจาก 0.031 ต่อชิ้น เหลือ 0.011 ต่อชิ้น ซึ่งน้อยกว่าเป้าหมายที่ 0.012 ต่อชิ้น จากนั้นได้ใช้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนี้ในการผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม. พบว่าในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน ปี พ.ศ. 2562 มีจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยอยู่ในระดับที่ ไม่เกิน 0.012 ต่อชิ้นอย่างต่อเนื่อง

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยประเภทแตกร้าวจากการผลิตสินค้ากระเบื้องซีเมนต์ความหนา 3.5 ซม. โดยนำหลักซิกซ์ซิกมา มาใช้ปรับปรุงงาน และหาระดับที่เหมาะสมของเครื่องจักร ซึ่งผลที่ได้คือ ขาเกลี่ยคอนกรีตแบบเหล็กคานยาว ความสูงขาเกลี่ยตัวก้อน 5 มม. ความสูงขาเกลี่ยผิวหน้า 5 มม. และแรงเขย่าในการขึ้นรูปสินค้า 300 กิโลนิวตัน ส่งผลให้จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจากข้อบกพร่องแตกร้าวลดลงจาก 0.031 ต่อชิ้น เหลือ 0.011 ต่อชิ้น ทำให้คาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของเสียที่จะลดลงเท่ากับ 794,650 บาทต่อปี

เอกสารอ้างอิง

[1] Pyzdek, *The Six Sigma Handbook*, 3 rd ed. McGraw-Hill., 2010.

[2] N. Khajornpaisan and N. Rojanarowan, “The effect of oxidized white liquor on pulp brightness in peroxide bleaching in pulp mills,” *Advanced Materials Research*, vol. 974, pp. 230–234, 2014.

[3] S. Vivitchanont, “Defect reduction in precast concrete production,” M.S. thesis, Department of Industrial engineering, Faculty of engineering, Chulalongkorn University, 2010 (in thai).

[4] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9 th ed. New Jersy: John Wiley & Sons, 2012.

[5] P. Wilkes, *How to Manufacture Concrete Hollow Blocks*. Forgotten Books, 2018.