



## การปรับปรุงความเรียบผิวกระเบื้องแผ่นเรียบโดยใช้การทดลองสปลิตพล็อตแบบมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

กฤษกร ดวงกลาง และ ชีรเดช วุฒิพรพันธ์\*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
วัชรพันธ์ สุขเกิด

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09-8651-9554 อีเมล: teeradejw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.007

รับเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2560 ตอรับเมื่อ 12 มีนาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 14 กันยายน 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันพบว่ากระเบื้องแผ่นเรียบที่ผลิตได้จากโรงงานกรณีศึกษามีค่าความเรียบผิวไม่อยู่ในช่วงที่ลูกค้าต้องการ (8 ถึง 10.55 ไมโครเมตร) ซึ่งทำให้โรงงานกรณีศึกษา มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนสินค้าเฉลี่ยประมาณ 100,000 บาทต่อเดือน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระเบื้อง เพื่อให้ได้ค่าความเรียบผิวอยู่ในช่วงที่ลูกค้ากำหนด จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วในการป้อนกระเบื้อง ระยะห่างของลูกรีด แรงกดของลูกรีด และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองแบบสปลิตพล็อตเนื่องจากความเร็วในการป้อนกระเบื้องเป็ยกันนั้นปรับตั้งได้ยาก ส่วนปัจจัยทางด้านความชื้นสัมพัทธ์จะถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยที่ทราบค่าแต่ไม่สามารถควบคุมได้ จากการทดลองพบว่าควรกำหนดความเร็วในการป้อนกระเบื้องที่ 60 เมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกรีด 7.0 มิลลิเมตร แรงกดของลูกรีด 90 บาร์ และความชื้นสัมพัทธ์ของกระบวนการที่ 27.98 เปอร์เซ็นต์ โดยจะทำให้ได้ค่าความเรียบผิวของกระเบื้องอยู่ที่ 8.73 ไมโครเมตร ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้โรงงานสามารถลดต้นทุนในการเปลี่ยนสินค้าที่เกิดจากปัญหาความเรียบผิวลงได้ทั้งหมด

**คำสำคัญ:** กระเบื้องซีเมนต์แผ่นเรียบ, การทดลองแบบสปลิตพล็อต, ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้, การวิเคราะห์เชิงสถิติ

การอ้างอิงบทความ: กฤษกร ดวงกลาง ชีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ วัชรพันธ์ สุขเกิด, “การปรับปรุงความเรียบผิวกระเบื้องแผ่นเรียบโดยใช้การทดลองสปลิตพล็อตแบบมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 737-745, ต.ค.-ธ.ค. 2561.

## Flatness Improvement of Fiber-cement Flat Sheet Using Split Plot Experiment with Uncontrollable Factor

Kritsakorn Duangklang and Teeradej Wuttiornpun\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Watcharapan Sukkerd

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09-8651-9554, E-mail: teeradejw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.007

Received 17 November 2017; Accepted 12 March 2018; Published online: 14 September 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Currently, the flatness of fiber-cement flat sheets produced from the selected factory does not meet the customer's specification (8–10.55  $\mu\text{m}$ ). This leads to many customer claims, of which the estimating costs may reach 100,000 baht per month approximately. This paper aims to determine an optimal factor setting of fiber-cement flat sheet process to deal with the issue. Based on the study, the factors concerned are feeding speed, roll gap, roll pressure, and relative humidity. A split-plot design is then selected since the feeding speed is a hard-to-change factor. The relative humidity is treated as a covariate factor in the experiment since it is known but still uncontrollable. The result shows that the feeding speed, roll gap and pressure, and relative humidity should be set as 60 m/s, 7 mm, 90 bar, and 27.98% respectively. The flatness obtained from this setting is about 8.73  $\mu\text{m}$ . Based on the setting, the factory can improve the flatness and can handle the claim cost caused by the flatness problem as well.

**Keywords:** Fiber-cement Flat Sheet, Split Plot Experiment, Uncontrollable Factor, Statistical Analysis

Please cite this article as: K. Duangklang, T. Wuttiornpun, and W. Sukkerd, "Flatness improvement of fiber-cement flat sheet using split plot experiment with uncontrollable factor," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 737–745, Oct.–Dec. 2018 (in Thai).

## 1. บทนำ

กระเบื้องซีเมนต์แผ่นเรียบเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ในการตกแต่งผนัง และฝ้าเพดาน เนื่องจากมีความแข็งแรง และทนทานกว่ากระเบื้องยิปซัม ความเรียบผิวของกระเบื้องถือว่าเป็นหนึ่งในจุดขายที่สำคัญที่ผู้บริโภคต้องการ โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตกระเบื้องซีเมนต์แผ่นเรียบรายใหญ่ จากการเก็บข้อมูลปัญหาพบว่า 92.64 เปอร์เซ็นต์เป็นปัญหาเรื่องความเรียบผิว ซึ่งส่งผลให้ทางโรงงานต้องทำการเปลี่ยนสินค้าให้กับลูกค้า โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเดือนละ 100,000 บาท จากการตรวจสอบพบว่า แต่ละล็อตการผลิตมีกระเบื้องที่มีค่าความเรียบผิวเกินค่าที่ลูกค้าต้องการอยู่ถึง 86 เปอร์เซ็นต์ (8 ถึง 10.55 ไมโครเมตร) จากการตรวจสอบพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเรียบผิว ได้แก่ ความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียก ระยะห่างของลูกรีด แรงกดของลูกรีด และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของเนื้อกระเบื้องเปียก เนื่องจากความเร็วในการป้อนกระเบื้องเป็นปัจจัยที่ปรับตั้งในการทดลองได้ยาก (Hard-to-Change Factor; HTC) และทางโรงงานไม่สามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ ผู้วิจัยจึงเลือกการทดลองแบบสปลิตพล็อต และการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมมาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านี้ (Analysis of Covariance; ANCOVA) เพื่อลดค่าความเรียบผิวให้อยู่ในช่วงความต้องการของลูกค้า และเพื่อลดต้นทุนจากการเปลี่ยนสินค้าให้กับทางโรงงาน

Box และ Jones [1] ได้นำการทดลองสปลิตพล็อตไปใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ยา ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 7 ปัจจัย ได้แก่ แหล่งผลิตกระดาษ สัดส่วนของแข็ง ประเภทของลูกรีด อุณหภูมิเตาอบ ความเร็วของสายพานผลิต อุณหภูมิระหว่างปิดผนึก และระยะเวลาที่ปิดผนึก โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเตาอบเป็นปัจจัยที่ปรับได้ยาก ผลทดลองพบว่า การใช้ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองจะสามารถลดปัญหาบรรจุภัณฑ์เสียหายจากกระบวนการผลิตลงได้อย่างมีนัยสำคัญ Kowalski และ Potcner [2] ได้ใช้การทดลองสปลิตพล็อตสำหรับการทดลองที่แบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1) ระดับของปัจจัยไม่สามารถสุ่ม กำหนด หรือตั้งค่าใหม่ได้ทุกลำดับการทดลอง 2) ระดับของปัจจัยไม่เท่ากันทุกปัจจัยการทดลอง

และ 3) มีข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ได้ โดยเงื่อนไขที่ 1 ใช้การทดลองสปลิตพล็อตเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการผลิตพลาสติก ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการอบ ปริมาณสารเติมแต่ง อัตราการกวาด และระยะเวลาการอบ โดยกำหนดให้อุณหภูมิการอบเป็นปัจจัยที่ปรับตั้งได้ยาก เนื่องจากเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงแล้วจะไม่สามารถสลับมาตั้งค่าใหม่ที่อุณหภูมิต่ำได้ทันที เงื่อนไขที่ 2 ได้ใช้การทดลองสปลิตพล็อตเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการพิมพ์ภาพ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ลูกกลิ้งแม่พิมพ์ 2 ระดับ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแม่พิมพ์ 3 ระดับ และความเร็วในการพิมพ์ 2 ระดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยลูกกลิ้งแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่ปรับตั้งยาก เนื่องจากต้องใช้เวลาพอสมควรในการเปลี่ยนตัวลูกกลิ้งแม่พิมพ์ทั้งหมด และเงื่อนไขที่ 3 ได้ทำการทดลองแบบสปลิตพล็อตเพื่อศึกษาคุณสมบัติการกันน้ำของไม้ โดยมี 2 ปัจจัย ได้แก่ วิธีการเตรียมไม้ 2 วิธี และสีย้อมไม้ 4 ประเภท โดยในการเตรียมไม้จะใช้วิธีเตรียมทั้งแผ่นใหญ่ก่อนจะตัดออกเป็นชิ้นเล็กเพื่อทดลองในแต่ละประเภทของสีย้อมไม้

King [3] ได้ทำการศึกษาการประมาณการจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมกับการทดลองสปลิตพล็อต พร้อมทั้งนำเสนอตารางการคำนวณการประมาณการดังกล่าว ในปี 2009 Jones และ Nachtsheim [4] ได้ศึกษาการเลือกใช้การทดลองสปลิตพล็อตแบบต่างๆ ได้แก่ สปลิตพล็อตสำหรับการทดลองแฟกทอเรียล สปลิตพล็อตสำหรับการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน และสปลิตพล็อตสำหรับการทดลองพื้นผิวตอบสนอง ให้เหมาะสมกับปัญหาในงานอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันไป ในปี 2010 Schoen *et al.* [5] ได้นำเสนอการใช้การทดลองสปลิตพล็อตสำหรับการผลิตครีมกาแฟที่มีจำนวนการทดลองของหน่วยทดลองหลักไม่คงที่โดยเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของตัวแปรในหน่วยทดลองหลัก และในปีเดียวกัน Somporn *et al.* [6] ได้ทำการศึกษาการใช้ถั่วพาราเป็นปุ๋ยพืชสดในการผลิตข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง โดยใช้การทดลองแบบสปลิตพล็อตและกำหนดให้ปัจจัยวันปักดำหลังการกลบมวลชีวภาพเป็นปัจจัยที่ปรับยาก โดยมี 2 ระดับ คือ 10 และ 20 วัน ส่วนปัจจัยที่เหลือ คือ ปุ๋ยสูตรต่างๆ จำนวน 9 สูตร

ผลการทดลองพบว่า การใช้ถั่วพว้าร่วมกับปุ๋ยสูตรที่ 6 ให้ผลผลิตข้าวเฉลี่ยสูงสุดถึง 404.2 กิโลกรัมต่อไร่

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่า การทดลองแบบสปลิตพล็อตเป็นตัวเลือกที่ดี เมื่อในการทดลองมีปัจจัยที่ปรับค่าได้ยากเข้ามาเกี่ยวข้องกับ งานวิจัยนี้จึงเลือกการทดลองดังกล่าวมาใช้งาน อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังมีปัจจัยที่ทราบค่าแต่ไม่สามารถควบคุมได้เข้ามาเกี่ยวข้อง (ความชื้นสัมพัทธ์) ดังนั้นในการวิเคราะห์การทดลองจึงต้องใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance) แทนการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทั่วไป

## 2. วิธีการวิจัย

ในการออกแบบการทดลองนี้ผู้วิจัยได้แบ่งตัวแปรออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรอิสระ ตัวแปรร่วม และตัวแปรตาม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 ตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ร่วมกับวิศวกรและผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการรีดด้วยลูกรีดของโรงงานการศึกษา ทำให้สามารถกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับปัจจัย (Level)
ความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียก (Feed Rate; Speed)	50 เมตรต่อนาที
	60 เมตรต่อนาที
ระยะห่างระหว่างลูกรีด (Compression Roller Gap; Gap)	7.0 มิลลิเมตร
	7.6 มิลลิเมตร
แรงกดของลูกรีด (Compression Pressure; Pressure)	50 บาร์
	90 บาร์

เนื่องจากปัจจัยด้านความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียก จะไม่สามารถปรับตั้งให้เป็นไปตามการทดลองสุ่มได้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยชนิดปรับยาก (HTC) การมีปัจจัยลักษณะนี้ในการทดลองจะต้องใช้การทดลองแบบสปลิตพล็อตเพื่อลดความเอนเอียงและการสะสมของ

ความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในการทดลองอันเนื่องมาจากไม่ได้ทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ [7]

### 2.2 ตัวแปรร่วม

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของเนื้อกระเบื้องเปียก (Relative Humidity) จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อความเรียบผิวของกระเบื้อง จากการวิเคราะห์ร่วมกับวิศวกรควบคุมคุณภาพและผู้เชี่ยวชาญการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า ทางโรงงานยังไม่มีเครื่องมือที่สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่ได้ ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ความชื้นสัมพัทธ์ของเนื้อกระเบื้องเปียกเป็นตัวแปรร่วม (Covariate Factor) แทนที่จะเป็นปัจจัยแบบปกติเหมือนปัจจัยอื่นๆ

### 2.3 ตัวแปรตาม

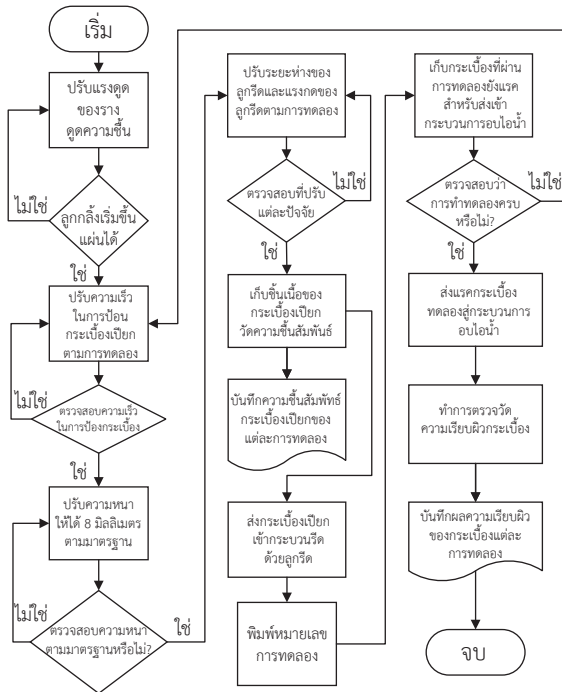
ตัวแปรตามที่กำหนดในงานวิจัยฉบับนี้คือ ความเรียบผิวของกระเบื้องแผ่นเรียบที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

### 2.4 การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1 ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการทดลองสปลิตพล็อตแบบสองระดับชนิดมีตัวแปรร่วม โดยกำหนดให้ปัจจัยความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียกเป็นปัจจัยชนิดที่ปรับตั้งยาก (Hard-to-Change Factor) และกำหนดให้ปัจจัยด้านความชื้นสัมพัทธ์เป็นปัจจัยที่ทราบค่าแต่ไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนปัจจัยที่เหลือจะเป็นปัจจัยที่ปรับตั้งได้ตามปกติ การทดลองนี้จะทำซ้ำ 2 ครั้ง จึงมีการทดลองรวมทั้งสิ้น 32 การทดลอง

## 3. ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ การตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 แผนผังกระบวนการดำเนินการทดลอง

### 3.1 การตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล

การทำอำนาจการทดสอบข้อมูลจำเป็นต้องใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง (Pooled Standard Deviation) และค่าความไวของการทดลองที่โรงงานยอมรับ (Effect) แต่เนื่องจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่อยู่ในการทดลอง ดังนั้นก่อนนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้งาน จะต้องทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีความสำคัญออกก่อน [7]

รูปที่ 2 แสดงปัจจัยทั้งหมดของการทดลอง ซึ่งมีทั้งปัจจัยที่มีความสำคัญและไม่มีความสำคัญ ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.094 ส่วนรูปที่ 3 แสดงเฉพาะปัจจัยที่มีความสำคัญ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เท่ากับรูปที่ 2 ซึ่งค่าที่จะนำไปใช้มีค่าเท่ากับ 0.092

การทำอำนาจการทดสอบจะต้องใช้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง (Split Plot Standard Deviation) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.09177 (จากรูปที่ 3) และค่าความไวของการทดลองที่โรงงานยอมรับ ซึ่งทางโรงงานกำหนดให้มีค่า

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.265	2.07388	3.02	0.095	
Humidity	0.162	0.07407	2.18	0.040	
Speed[HTC]	-2.167	-1.083	0.06388	-16.96	0.004
Gap	2.999	1.500	0.01665	90.06	0.000
Pressure	0.212	0.106	0.01697	6.24	0.000
Speed[HTC]*Gap	-1.055	-0.528	0.01697	-31.10	0.000
Speed[HTC]*Pressure	0.029	0.015	0.01665	0.88	0.387
Gap*Pressure	0.226	0.113	0.02403	4.71	0.000
Speed[HTC]*Gap*Pressure	0.013	0.007	0.01665	0.39	0.699

S = 0.0939703 R-Sq(SP) = 99.77%  
S(WP) = 0.123349 R-Sq(WP) = 99.14%

รูปที่ 2 แสดงปัจจัยทั้งหมดของการทดลอง

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.336	2.01575	3.14	0.089	
Humidity	0.159	0.07199	2.21	0.037	
Speed[HTC]	-2.167	-1.083	0.06399	-16.93	0.004
Gap	2.999	1.500	0.01626	92.22	0.000
Pressure	0.212	0.106	0.01657	6.40	0.000
Speed[HTC]*Gap	-1.056	-0.528	0.01657	-31.85	0.000
Gap*Pressure	0.225	0.113	0.02341	4.81	0.000

S = 0.0917757 R-Sq(SP) = 99.76%  
S(WP) = 0.123788 R-Sq(WP) = 99.14%

รูปที่ 3 แสดงเฉพาะปัจจัยที่มีความสำคัญ

Power and Sample Size

2-Level Factorial Design

α = 0.05 Assumed standard deviation = 0.09177

Factors: 3 Base Design: 3, 8

Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Power
0	0.15	2	16	0.816027

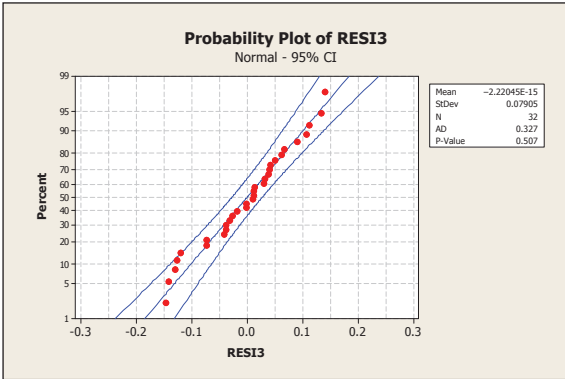
รูปที่ 4 ผลลัพธ์การหาค่าอำนาจของการทดสอบ

เท่ากับ 0.15 ไมโครเมตร จากการใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการประมวลผล ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่าที่การทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง จะให้ค่าอำนาจการทดสอบข้อมูลเท่ากับ 0.816 หมายถึง จะมีโอกาสเกิดการสรุปความผิดพลาดในแบบที่ 2 ( $\beta$ ) เพียง 18.4 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นจำนวนการทดลองซ้ำที่เพียงพอ เนื่องจากทางโรงงานต้องการควบคุมค่าความผิดพลาดนี้ไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์

### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ก่อนการวิเคราะห์ในด้านอื่นๆ ต่อไป จะต้องมีการ



รูปที่ 5 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเสียก่อน [7] โดยการตรวจสอบนี้จะผ่านการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ถ้าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไม่ผ่านการตรวจสอบ แสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้ก็ไม่น่าเชื่อถือ การตรวจสอบดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การพิจารณากระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการตั้งสมมติฐานการทดสอบดังนี้

$H_0$  : ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

$H_1$  : ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวไม่ปกติ

เมื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง ในรูปที่ 5 พบว่าค่า  $p$ -value  $> 0.05$  จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Do not Reject  $H_0$ ) และสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

3.2.2 ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง โดยมีสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

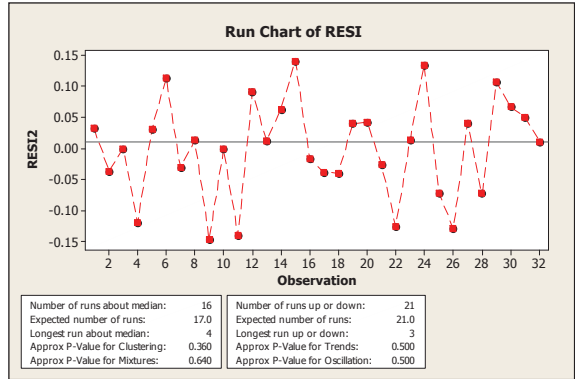
$H_0$  : ค่าส่วนตกค้างเป็นแบบสุ่ม

$H_1$  : ค่าส่วนตกค้างไม่เป็นแบบสุ่ม

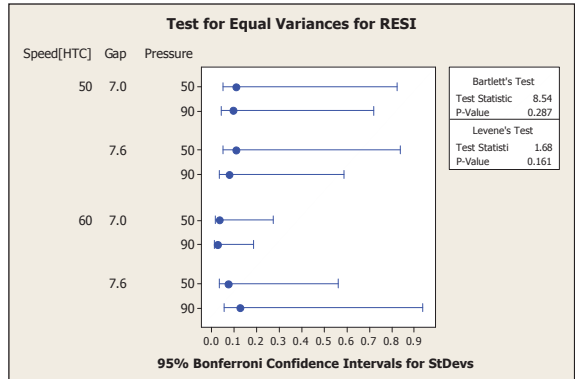
พบว่าค่า  $p$ -value for Trends  $> 0.05$  (รูปที่ 6) ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ (Do not Reject  $H_0$ ) จึงสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างเป็นแบบสุ่ม

3.2.3 การพิจารณาค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีการตั้งสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

$H_0$  : ค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีเสถียรภาพ



รูปที่ 6 การทดสอบการเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 7 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

$H_1$  : ค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างไม่มีเสถียรภาพ พบว่าค่า  $p$ -value  $> 0.05$  (รูปที่ 7) ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ (Do not Reject  $H_0$ ) จึงสรุปได้ว่าแสดงว่าค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีเสถียรภาพ

จากผลการตรวจสอบทั้ง 3 หัวข้อ จะพบว่ารูปแบบของการทดลองมีความถูกต้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมต่อไป

### 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม

การคำนวณค่าความแปรปรวนร่วมของปัจจัยต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8

จากรูปที่ 8 ผู้วิจัยได้ทำการตัดอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย และอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียก



## Analysis of Variance for Response (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speed[HTC]	1	37.736	37.3839	37.3839	286.63	0.004
WP Error	2	0.327	0.2484	0.1242	14.75	0.000
Humidity	1	0.570	0.0412	0.0412	4.89	0.037
Gap	1	71.767	71.6268	71.6268	8503.93	0.000
Pressure	1	0.357	0.3445	0.3445	40.90	0.000
Speed[HTC]*Gap	1	9.126	8.5462	8.5462	1014.65	0.000
Gap*Pressure	1	0.195	0.1950	0.1950	23.15	0.000
SP Error	23	0.194	0.1937	0.0084		
Lack of Fit	16	0.169	0.1686	0.0105	2.94	0.077
Pure Error	7	0.025	0.0251	0.0036		
Total	31	120.272				

S = 0.0917757 R-Sq(SP) = 99.76%  
S(WP) = 0.123788 R-Sq(WP) = 99.14%

## รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม

Estimated Coefficients for Response  
using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-150.305
Humidity	0.159231
Speed[HTC]	2.35217
Gap	23.0394
Pressure	-0.131737
Speed[HTC]*Gap	-0.351899
Gap*Pressure	0.0187720

## รูปที่ 9 คำสัมประสิทธิ์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

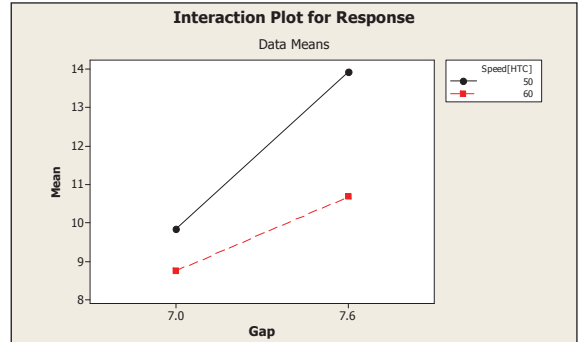
กับแรงกดของลูกรีดออก เนื่องจากทั้งสองปัจจัยมีค่า  $p$ -value มากกว่าค่านัยสำคัญที่ตั้งไว้ (0.05) ดังนั้นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยปัจจัยหลักทั้งหมด อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและระยะห่างของลูกรีด และอิทธิพลร่วมระหว่างระยะห่างของลูกรีดและแรงกดของลูกรีด

## 3.4 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง

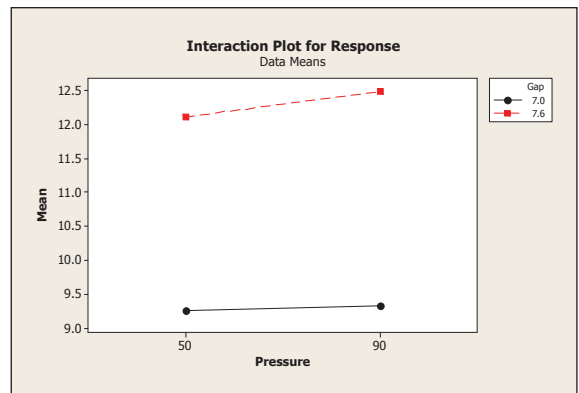
คำสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองในเทอมของค่าจริง (Uncoded) แสดงได้ดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 จะได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเรียบผิว ( $y$ ) ดังแสดงในสมการ (1) โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้มีค่า R-Sq (Adjusted) มากกว่า 99% ซึ่งหมายถึงตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้ สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นได้ดีมาก

$$y = -150.305 + 0.159Humidity + 2.352Speed + 23.039Gap - 0.1317Pressure$$



## รูปที่ 10 อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วในการป้อน กระเบื้อง กับระยะห่างระหว่างลูกรีด

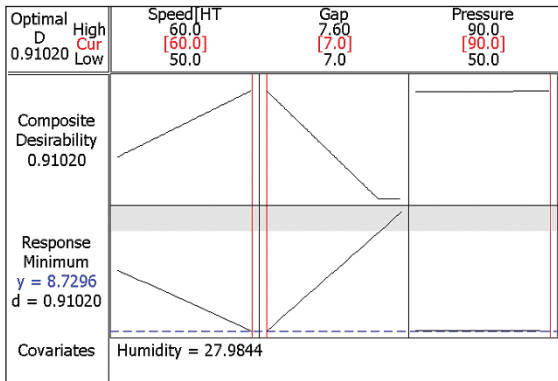


## รูปที่ 11 อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะห่างระหว่างลูกรีด กับแรงกดของลูกรีด

$$- 0.3519(Speed*Gap) + 0.0188(Gap*Pressure) \quad (1)$$

รูปที่ 10 แสดงกราฟลักษณะอิทธิพลร่วมสองปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนกระเบื้องเป็ยกกับระยะห่างระหว่างลูกรีด (Speed\*Gap) พบว่าการใช้ความเร็วสูงและระยะห่างระหว่างลูกรีดแคบๆ จะให้ความเรียบผิวดีที่สุด

รูปที่ 11 แสดงกราฟลักษณะอิทธิพลร่วมระหว่างระยะห่างของลูกรีดกับแรงกดของลูกรีด (Gap\*Pressure) พบว่าการใช้ระยะห่างแคบๆ กับแรงกดที่ต่ำจะให้ค่าความเรียบที่ดีกว่า



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสม

#### 4. การวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 17 โดยกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบหาค่าต่ำที่สุด (Minimize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ไว้ที่ 8.55 ไมโครเมตร และกำหนดค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (Upper Bound) ไว้ที่ 10.55 ไมโครเมตร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังในรูปที่ 12

จากรูปที่ 12 จะได้ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการรีดด้วยลูกรีดดังนี้คือ กำหนดระดับความเร็วในการป้อนกระเบื้องเปียก 60 เมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกรีด 7.0 มิลลิเมตร และระดับแรงกดของลูกรีด 90 บาร์ โดยที่ต้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของเนื้อกระเบื้องเปียกให้อยู่ที่ 27.98 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความชื้นสัมพัทธ์นี้เป็นเพียงค่าที่แนะนำจาก Minitab ในกรณีที่ต้องการควบคุมในอนาคต)

จากการปรับตั้งปัจจัยตามผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จะทำให้ค่าความเรียบผิวของกระเบื้องมีค่าเท่ากับ 8.73 ไมโครเมตร เพื่อทดสอบว่าการปรับตั้งนี้ใช้งานได้จริงหรือไม่ ผู้วิจัยได้นำการปรับตั้งนี้ไปใช้งานจริง โดยทดสอบการใช้งานจำนวน 100 ตัวอย่าง (ทำที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 27% ถึง 30% และเลือกเฉพาะตัวอย่างที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกับ 27.98% มาวิเคราะห์จำนวน 30 ตัวอย่าง เนื่องจากปัจจัยนี้ยังควบคุมไม่ได้) แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One Sample T-test เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ Response Optimizer ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยมี

One-Sample T: Response

Test of  $\mu = 8.7296$  vs  $> 8.7296$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% Lower Bound	T	P
Response	30	8.73067	0.01911	0.00349	8.72474	0.31	0.381

รูปที่ 13 ผลการทดสอบทางสถิติจากการใช้งานจริง

สมมติฐานการทดสอบ คือ

$$H_0 : \mu = 8.72960$$

$$H_1 : \mu > 8.72960$$

จากรูปที่ 13 พบว่าค่า  $p$ -value  $> 0.05$  จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Do not Reject  $H_0$ ) แสดงว่าค่าความเรียบผิวที่ได้จากการใช้งานจริงไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งหมายความว่าผลการทดลองสามารถนำไปใช้งานจริงได้

#### 5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระเบื้องแผ่นเรียบ เพื่อที่จะทำให้ได้ความเรียบอยู่ในเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด กล่าวคือ ต้องมีค่าความเรียบผิวอยู่ในช่วง 8 ถึง 10.55 ไมโครเมตร ผลการทดลองสรุปได้ว่าควรจะต้องกำหนดระดับความเร็วในการป้อนกระเบื้อง 60 เมตรต่อนาที ระยะห่างของลูกรีด 7.0 มิลลิเมตร และระดับแรงกดของลูกรีด 90 บาร์ โดยควรทำการผลิตที่ความชื้นสัมพัทธ์ของเนื้อกระเบื้องเปียกให้ใกล้เคียงที่ 27.98% มากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 8.73 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ลูกค้าต้องการ และจากผลที่ได้นี้ยังทำให้ทางโรงงานสามารถลดต้นทุนที่เกิดจากการเปลี่ยนสินค้าให้แก่ลูกค้าลงได้ทั้งหมดอีกด้วย

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่เอื้อเพื่อข้อมูล และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินการทดลอง และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ใช้งานโปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี





### เอกสารอ้างอิง

- [1] G. E. P. Box and S. Jones, "Split-plot designs for robust product experimentation," *Journal of Applied Statistics*, vol. 19, no.1, pp. 3–26, 1992.
- [2] S. M. Kowalsaki and K. J. Potcner, "How to recognize a split-plot experiment" *Quality Progress*, vol. 36, no. 11, pp. 60–66, 2003.
- [3] J. E. King, "Sample size determination for the split-plot factorial design," in *Annual meeting of the Southwest Educational Research Association*, Austin, Texas, 2006, pp. 1–6.
- [4] B. Jones and C. J. Nachtsheim, "Split-plot designs: What, Why, and How," *Journal of Quality Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 340–361, 2009.
- [5] E. Schoen, B. Jones, and P. Goos, "A split-plot experiment with factor-dependent whole-plot sizes," *Journal of Quality Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 66–79, 2017.
- [6] S. Dumyos, A. Kamnunrat, and V. Jarupoj, "Application of canavalia ensiformis as a green manure in sangyodphatthalung rice variety production," in *Proceedings of the 48th Kasetsart University Annual Conference*, 2010, pp. 227–235 (in Thai).
- [7] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.