



การหาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ โดยใช้วิธีการทดลองแบบลำดับขั้นและการวิเคราะห์ความผันแปร

ปวีณา นาคำเพ็ญ และ ชีรเดช วุฒิพรพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ช่อแก้ว จตุรานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8141 อีเมล: teeradejw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.06.005

รับเมื่อ 28 สิงหาคม 2560 ตอรับเมื่อ 25 ตุลาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 11 มิถุนายน 2561

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ ได้แก่ ผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ ผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ และผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ด เพื่อปรับปรุงค่าความกว้างของผ้าสำหรับทำพรมหลังเบาะและพรมปูพื้นรถ และปรับปรุงน้ำหนักของผ้าสำหรับทำพรมหลังคาร์ดให้มีค่าอยู่ในข้อกำหนดของลูกค้า โดยจะใช้การทดลองแบบลำดับขั้นร่วมกับการวิเคราะห์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า การปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการผลิตจะทำให้ความกว้างของผ้าสำหรับทำพรมหลังเบาะและพรมปูพื้นรถ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 175.65 และ 192.41 เซนติเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.252 และ 0.044 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักของผ้าสำหรับทำพรมหลังคาร์ดจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 190.57 กรัมต่อตารางเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.881 กรัมต่อตารางเมตร โดยค่าทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนดและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ผ้าชนิดไม่ทอ, การทดลองแบบลำดับขั้น, การทดลองพินผิวตอบสนอง, การวิเคราะห์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การอ้างอิงบทความ: ปวีณา นาคำเพ็ญ ชีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ ช่อแก้ว จตุรานนท์, “การหาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ โดยใช้วิธีการทดลองแบบลำดับขั้นและการวิเคราะห์ความผันแปร,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 3, หน้า 577-592, ก.ค.-ก.ย. 2561.

Optimal Factor Settings for Nonwoven Carpet Processes by Using Sequential Experiment and Analyze Variability

Paveena Nakbumpen and Teeradej Wuttiornpun*

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

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8141, E-mail: teeradejw@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.06.005

Received 28 August 2017; Accepted 25 October 2017; Published online: 11 June 2018

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

Abstract

This research aims to determine optimal factor settings for nonwoven carpet processes, which are seat back, floor carpet, and headliner processes. The optimal settings are determined in order to control the width of seat back and floor carpet and the weight of headliner within customer acceptable ranges. A sequential experiment and analyze variability are conducted to determine the optimal settings. The results show that the optimal settings obtain the width of seat back and floor carpet of 175.65 cm and 192.41 cm with the minimum standard deviation of 0.252 cm and 0.044 cm, and also obtain the weight of headliner of 190.57 gsm with the minimum standard deviation of 0.881 gsm. The obtained width and weight are within the acceptable ranges with the lowest standard deviation value.

Keywords: Nonwoven, Sequential Experiment, Response Surface Experiment, Analyze Variability

Please cite this article as: P. Nakbumpen, T. Wuttiornpun, and C. Jaturanonda, "Optimal factor settings for nonwoven carpet processes by using sequential experiment and analyze variability," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 577-592, Jul.-Sep. 2018 (in Thai).

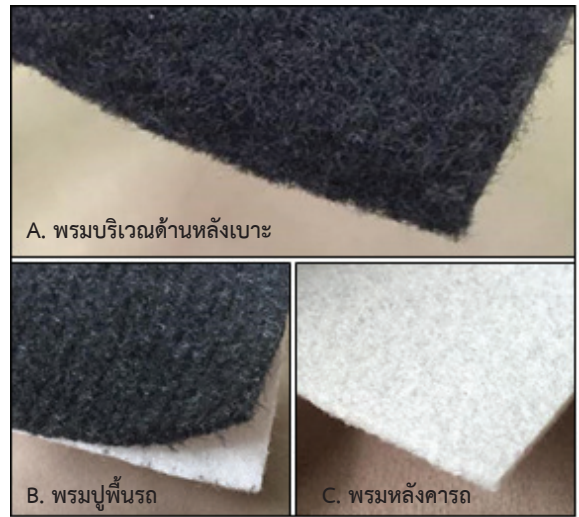
1. บทนำ

ผ้าชนิดไม่ทอ (Nonwoven) เป็นวัสดุพิเศษสำคัญที่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์สมัยใหม่ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลาสติกหรือโลหะเพื่อให้รถยนต์มีน้ำหนักเบาาลง ด้วยคุณสมบัติของผ้าที่มีลักษณะโดดเด่นและมีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา ออกแบบหรือขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถลดเสียงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้กระบวนการผลิตผ้าชนิดไม่ทอยังมีความรวดเร็ว เพราะการขึ้นรูปผ้าจะเกิดจากเส้นใยมัดติดกันเอง โดยใช้เทคนิคต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การใช้กาวหรือสารเคมี การใช้ความร้อน หรือวิธีเชิงกล

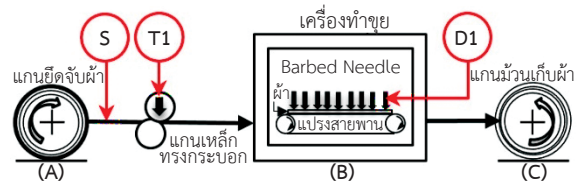
โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอด้วยวิธีเชิงกล คือ การใช้เข็มเจาะ (Needle Punch) ก่อนส่งจะไปแปรรูปเป็นผ้าที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผ้าสำหรับทำพรมบริเวณด้านหลังเบาะ (Seat Back) ผ้าสำหรับทำพรมปูพื้นรถ (Floor Carpet) และผ้าสำหรับทำพรมหลังคารถ (Headliner) โดยลักษณะของแต่ละผลิตภัณฑ์จะแสดงดังรูปที่ 1

ผ้าชนิดไม่ทอสำหรับผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ประเภท จะมีกรรมวิธีการผลิตที่มีลักษณะเฉพาะไม่เหมือนกัน โดยกระบวนการผลิตผ้าสำหรับทำพรมหลังเบาะจะผลิตขึ้นจากกระบวนการในรูปที่ 2 ผ้าสำหรับทำพรมปูพื้นรถจะผลิตขึ้นจากกระบวนการในรูปที่ 3 และสุดท้ายผ้าสำหรับพรมหลังคารถจะผลิตขึ้นจากกระบวนการในรูปที่ 4

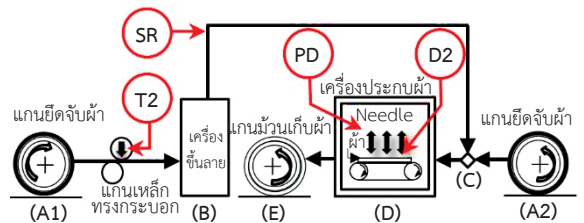
กระบวนการในรูปที่ 2 จะเริ่มจากการนำม้วนผ้าชนิดไม่ทอเข้าสู่แกนยึดจับที่ตำแหน่ง A จากนั้นผ้าจะถูกดึงออกจากแกนม้วนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง (Speed; S) และร้อยผ่านได้ฐานแกนเหล็กทรงกระบอกซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความตึงผ้า (Tension; T1) ให้เหมาะสมก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องทำขุยผ้าที่ตำแหน่ง B เมื่อผ้าเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องทำขุย ภายในเครื่องจะมีเข็ม (Barbed Needle) จำนวนมากปักลงมาที่ผ้าด้วยความลึก (Depth; D1) ลงไปกระทบกับแปรงด้านล่าง จึงทำให้ผ้าด้านที่สัมผัสกับแปรงเกิดขุยขึ้น เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอน



รูปที่ 1 ลักษณะผ้าชนิดไม่ทอของแต่ละผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ



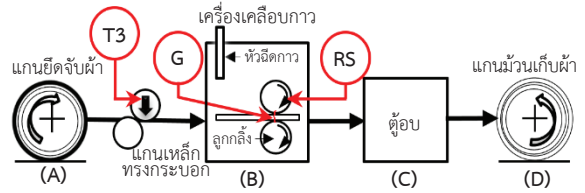
รูปที่ 3 กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ

การทำขุย ผ้าจะเคลื่อนที่มายังแกนม้วนเก็บผ้าที่ตำแหน่ง C สำหรับกระบวนการนี้จะมีปัจจัยที่ควบคุมได้อยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็ว (S) ความตึงผ้า (T1) และความลึกของเข็ม (D1)

กระบวนการในรูปที่ 3 จะเริ่มจากการนำม้วนผ้าชนิดไม่ทอ 2 ชนิด เข้าสู่แกนยึดจับที่ตำแหน่ง A1 และ A2 จากนั้นผ้าจากแกนม้วนที่ตำแหน่ง A1 จะถูกดึงเข้าสู่เครื่องขึ้นลายที่ตำแหน่ง B โดยจะต้องควบคุมความตึงผ้า (T2) ให้เหมาะสม

เมื่อผ้าทางด้านตำแหน่ง A1 ผ่านขั้นตอนการขึ้นลายแล้วจะถูกลำเลียงขึ้นไปในแนวตั้งและเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง C ในขณะที่เดียวกันผ้าที่ตำแหน่ง A2 จะถูกดึงออกจากแกนหมุนเพื่อทำการประกบผ้าทั้งสองเข้าด้วยกันที่เครื่องประกบผ้าบริเวณตำแหน่ง D วิธีการประกบผ้าจะใช้เข็มเกี่ยวเส้นใยขึ้นลงในแนวตั้งซ้ำๆ กัน ด้วยความหนาแน่นของเข็ม (Pin Density; PD) และความลึกของเข็ม (Depth; D2) ที่เหมาะสมหลังเสร็จสิ้นขั้นตอนการประกบผ้า ผ้าจะเคลื่อนที่มายังแกนหมุนเก็บผ้าที่ตำแหน่ง E สำหรับกระบวนการนี้จะมีปัจจัยที่ควบคุมได้อยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ ความตึงผ้า (T2) ความหนาแน่นของเข็ม (PD) ความลึกของเข็ม (D2) และอัตราส่วนความเร็วในการดึงผ้าที่จุด A1 และ A2 (Speed Ratio; SR)

กระบวนการในรูปที่ 4 จะเริ่มจากการนำม้วนผ้าชนิดไม่ทอเข้าสู่แกนยึดจับที่ตำแหน่ง A จากนั้นผ้าจะถูกปล่อยออกจากแกนหมุนและร้อยผ่านแกนเหล็กเพื่อควบคุมความตึงผ้า (T3) ให้มีความเหมาะสมก่อนป้อนผ้าเข้าสู่เครื่องเคลือบกาวที่ตำแหน่ง B เมื่อผ้าเข้าสู่เครื่องเคลือบกาว ภายในจะมีหัวฉีดพ่นกาวลงมาบนพื้นผิวของผ้าพร้อมกับการเกลี่ยกาวให้มีความสม่ำเสมอด้วยลูกกลิ้งแนบขนานบนล่าง หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเคลือบกาว ผ้าจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้อบที่ตำแหน่ง C เพื่ออบกาวให้แห้ง และเคลื่อนที่มายังแกนหมุนเก็บผ้าที่ตำแหน่ง D สำหรับกระบวนการนี้จะมีปัจจัยที่



รูปที่ 4 กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคารถ

ควบคุมได้อยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ ความตึงผ้า (T3) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งบนล่าง (Roller Gap; G) ความเร็วของลูกกลิ้ง (Roller Speed; RS) และสัดส่วนระหว่างกาวและน้ำ (Glue and Water Ratio; GW)

จากการศึกษากระบวนการผลิตผ้าสำหรับขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ประเภท พบว่าในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาได้ตั้งค่าปัจจัยต่างๆ โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ควบคุมการผลิตเป็นหลัก จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติไม่ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยเฉพาะคุณสมบัติที่เกี่ยวกับความกว้างและน้ำหนักของผ้าหลังผ่านกระบวนการผลิต ซึ่งผ้าแต่ละประเภทจะพบปัญหาที่แตกต่างกันดังนี้ ผ้าสำหรับพรมหลังเบาะและผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถจะมีค่าความกว้างของผ้าเกินและต่ำกว่าข้อกำหนด ส่วนผ้าสำหรับพรมหลังคารถจะมีค่าน้ำหนักค่อนข้างต่ำแต่ยังอยู่ในช่วงข้อกำหนด ซึ่งค่าที่วัดได้ในปัจจุบันจะแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการปรับตั้งปัจจัยและค่าที่วัดได้ในปัจจุบันของผ้าแต่ละประเภท

กระบวนการผลิต	ปัจจัย	ปรับตั้งที่	หน่วย	ค่าที่วัดได้ในปัจจุบัน (เฉลี่ย)	ข้อกำหนด
ผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ	S	2.75	m/min	ความกว้าง 183.60 cm	175 ± 5 cm
	T1	23	%		
	D1	4	mm		
ผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ	T2	16	%	ความกว้าง 187.40 cm	192.5 ± 2.5 cm
	PD	50	pin/cm ²		
	D2	7.5	mm		
	SR	0.8:1	-		
ผ้าสำหรับพรมหลังคารถ	T3	20	%	น้ำหนัก 185.98 gsm	190 ± 9.5 gsm
	G	0.77	mm		
	RS	12	%		
	GW	20:60	-		

จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยและวิศวกรผู้เชี่ยวชาญของโรงงานกรณีศึกษา จึงได้ร่วมกันวิเคราะห์และพบว่าสาเหตุหลักของปัญหา คือ ค่าการปรับตั้งปัจจัยในปัจจุบันไม่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เสนอให้ทางโรงงานปรับปรุงการตั้งค่าปัจจัยดังกล่าวใหม่ โดยเลือกใช้วิธีการทดลองแบบลำดับขั้นในการหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ดีที่สุดของทั้ง 3 กระบวนการ เพื่อให้ผ้าที่ได้จากการผลิตมีคุณสมบัติตรงตามที่คุณค่าต้องการ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 เรื่อง ได้แก่

- 1) การทดลองแบบลำดับขั้น (Sequential Experiments) ซึ่งประกอบไปด้วย การทดลองแฟกทอเรียล (Factorial Experiment) การทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Factorial Experiment with Center Point) วิธีไต่ขั้นตามทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent Method) และการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Experiment)
- 2) การวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองหลายตัวแปร (Multiple Response Analysis) และ 3) การวิเคราะห์ความผันแปร (Analyze Variability)

2.1 การทดลองแบบลำดับขั้น

ขั้นตอนแรกของการทดลองแบบลำดับขั้น จะเริ่มจากการทดลองแฟกทอเรียล ซึ่งเป็นวิธีการทดลองที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่างๆ (Main and Interaction Effect) ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง (Response) นอกจากนี้ ยังสามารถใช้หาสมการทำนายค่าตอบสนองหรือหาปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการทดลองแฟกทอเรียลควรจะต้องพิจารณาถึงสมมติฐานด้านความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) ของค่าตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ของการทดลอง ถ้าไม่มีการตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นหรือค่าความโค้ง (Curvature) อาจทำให้สมการทำนายค่าตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นไม่ถูกต้องหรือค่าตอบสนองที่ได้จากปัจจัยที่เหมาะสมนี้อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 ในการตรวจสอบค่าความโค้งจะใช้วิธีการ

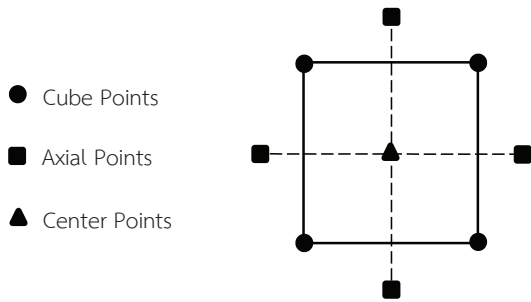
ทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง ทำได้โดยการเพิ่มการทดลองของปัจจัยที่บริเวณจุดกึ่งกลาง เพื่อวิเคราะห์ว่าค่าปัจจัยที่จุดกึ่งกลางมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองหรือไม่ หากไม่มีนัยสำคัญ จะแสดงว่าบริเวณที่เลือกนำมาทดลองเป็นบริเวณที่ไม่เหมาะสมและไม่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดได้ ในกรณีนี้ควรจะต้องทำการพิจารณาเลือกบริเวณการทดลองใหม่โดยใช้วิธีการไต่ขั้นตามทางที่ชันที่สุด แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าพบว่าค่าความโค้งมีนัยสำคัญจะแสดงว่า ค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมจะอยู่ในบริเวณที่กำลังทำการทดลองจึงสามารถเข้าสู่ขั้นตอนที่ 4 ได้

ขั้นตอนที่ 3 ในกรณีที่พบว่า ค่าความโค้งไม่มีนัยสำคัญ จะต้องทำการหาบริเวณการทดลองใหม่ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลื่อนที่จากตำแหน่งจุดกึ่งกลางของการทดลองเดิมไปยังจุดกึ่งกลางของการทดลองใหม่ จนกระทั่งพบบริเวณที่จุดกึ่งกลางของปัจจัยมีนัยสำคัญ จึงจะแสดงได้ว่าบริเวณนี้จะสามารถหาค่าตอบสนองที่ดีที่สุดได้ วิธีการนี้เรียกว่าการไต่ขั้นตามทางที่ลาดชันที่สุด

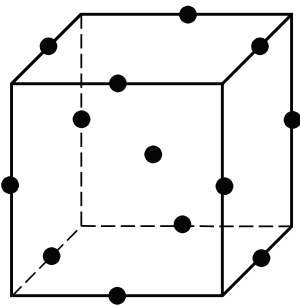
ขั้นตอนที่ 4 เมื่อพบบริเวณที่เหมาะสมแล้วให้ทำการทดลองพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดต่อไป สำหรับวิธีการทดลองพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่มี 2 วิธี ได้แก่ การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) และการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design; BBD) ซึ่งความแตกต่างของ 2 วิธีนี้ คือ การทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วยการทดลองทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ การทดลองแฟกทอเรียล (Cube Points) การทดลองที่บริเวณจุดกึ่งกลาง (Center Points) และการทดลองบริเวณนอกแกนแฟกทอเรียล (Axial Points) แสดงได้ดังรูปที่ 5 ส่วนการทดลองแบบ BBD จะไม่มีการตั้งค่าปัจจัยที่ระดับสูงและระดับต่ำไปพร้อมๆ กันทุกปัจจัย เนื่องจากจะให้ผลการทดลองไปในทิศทางที่ไม่ดี จึงทำให้ปริมาณการทดลองน้อยกว่าการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 6 [1]

2.2 การวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองหลายตัวแปร

ในการวิเคราะห์หาค่าตอบสนองที่ดีที่สุดของการ



รูปที่ 5 ลักษณะการทดลองแบบ CCD สำหรับ 2 ปัจจัย

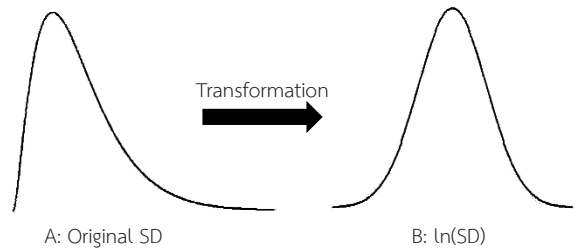


รูปที่ 6 ลักษณะการทดลองแบบ BBD สำหรับ 3 ปัจจัย

ทดลองที่มีตัวแปรตอบสนองหลายตัวแปร (Multiple Response) สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการใช้กราฟการซ้อนทับกันของตัวแปรตอบสนองทุกตัว (Overlaid Contour Plot) และเทคนิคการหาค่าจุดที่ดีที่สุด (Optimization Technique) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการใช้กราฟ ซึ่งจะใช้หลักการสร้างแบบจำลองถดถอยที่เหมาะสมของค่าตอบสนองแต่ละตัวแปรแยกกันก่อนในขั้นตอนแรก จากนั้น จะทำการซ้อนทับกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าตอบสนอง ทุกตัวเข้าด้วยกัน โดยพื้นผิวตอบสนองที่ซ้อนทับกันจะแสดง ถึงพื้นที่ของค่าตอบสนองในขอบเขตที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้ สามารถระบุปัจจัยที่เหมาะสมของบริเวณดังกล่าวเพื่อให้ได้ ค่าตอบสนองที่ต้องการได้ [1]

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ความผันแปร

ในงานวิจัยนี้ นอกจากการหาค่าตอบสนองที่ต้องการ ผู้วิจัยมีความต้องการให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) ของค่าตอบสนองนั้นมีค่าต่ำที่สุดด้วย ดังนั้น



รูปที่ 7 ลักษณะการแปลงค่า SD

จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ค่า SD ไปพร้อมๆ กับค่าตอบสนอง ที่ต้องการ โดยพิจารณาว่าค่า SD ให้เป็นค่าตอบสนองอีกค่าหนึ่ง แต่ในการวิเคราะห์ค่า SD จำเป็นต้องทำการแปลงข้อมูลของ ค่า SD ก่อนการทดลอง (Transformation) ทั้งนี้เนื่องจากว่า ค่า SD จะมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ซึ่งขัดแย้งกับหลักการ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวน [1] ในการแปลงค่า SD จะใช้ ฟังก์ชันลอการิทึม (Natural Logarithm; Ln) ของค่า SD แทน เพื่อให้การกระจายตัวของข้อมูลหลังการแปลงอยู่ในรูปแบบ ปกติก่อนการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผล ซึ่งลักษณะการแปลง ค่า SD สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 7

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตผ้า ชนิดไม่ทอจากวัตถุดิบประเภทต่างๆ เพื่อนำไปแปรรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดย งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิต ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของผ้าชนิดไม่ทอ ในที่นี้ ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

Rawal และ Anandjiwala [2] ได้ศึกษาปัจจัยอัตรา การบิด ความลึก และความหนาแน่นของเข็มในกระบวนการ ผลิตผ้าชนิดไม่ทอจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์และเส้นใยลินิน โดย ใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง จากการศึกษพบว่า ความลึก และความหนาแน่นของเข็มมีผลโดยตรงต่อความหนาและ น้ำหนักของผ้าชนิดไม่ทอ Kiekens และ Zamfir [3] ได้ศึกษา ปัจจัยความถี่ของเข็มในกระบวนการผลิตผ้าชนิดไม่ทอจาก เส้นใยฝ้าย ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยความถี่ของเข็ม มีผลต่อคุณสมบัติของผ้าชนิดไม่ทอในด้านน้ำหนักและ ความเร็วในการดูดซับของเหลว Midha และ Mukhopadyy [4] ได้ศึกษาปัจจัยความลึกและความหนาแน่นของเข็มที่มี



ผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของผ้าชนิดไม่ทอ จากการศึกษาพบว่า เมื่อความลึกและความหนาแน่นของเข็มเพิ่มขึ้น จะทำให้ผ้าชนิดไม่ทอมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ความสามารถในการรับแรงกดของผ้าชนิดไม่ทอต่ำลง Sengupta *et al.* [5] ได้ศึกษาปัจจัยความความลึกและความหนาแน่นของเข็มว่ามีผลกระทบต่อพฤติกรรมการบีบอัดของผ้าชนิดไม่ทอหรือไม่ โดยผลจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยทุกตัวมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการบีบอัดของผ้าชนิดไม่ทอ

นอกจากงานวิจัยที่กล่าวมา ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามจะลดของเสียลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการปรับตั้งปัจจัยไม่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผ้าชนิดไม่ทอหรือกระบวนการผลิตอื่นๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เสกสรร [6] ได้ปรับปรุงคุณภาพกระบวนการเคลือบพรหม เพื่อให้จุดบกพร่องบนชิ้นงานน้อยที่สุด โดยใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วของรางเลื่อน อุณหภูมิและน้ำหนักสารเคมี จากนั้นใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม วรพจน์ [7] ได้ลดของเสียประเภทรูปลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการผลิตผ้าชนิดไม่ทอ โดยใช้วิธีการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลคัดกรองปัจจัย และสรุปได้ว่ามี 3 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลัก ได้แก่ แรงดันในห้องปั่นเส้นใย อุณหภูมิดาย และอุณหภูมิลมทำความเย็น จากนั้นใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม สุพจน์ [8] ได้ลดของเสียประเภทเส้นใยหยดจากกระบวนการผลิตผ้าใยสังเคราะห์ โดยได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสีย ได้แก่ แรงดันภายในโค-เอกซ์ทรูดอร์ อุณหภูมิของเอกซ์ทรูดอร์ และอุณหภูมิของห้องลมเย็น จากนั้นใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม วีระศักดิ์ [9] ได้ลดปริมาณของเสียชนิดเส้นใยหยดจากกระบวนการผลิตผ้าใยสังเคราะห์พอลิโพรไพลีน และสรุปว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราส่วนของผ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่ อุณหภูมิในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ และแรงดันของลมเย็น จากนั้นใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับและการศึกษาที่ค่ากลางเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม กอบโชค [10] ได้ลดต้นทุนคุณภาพข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์

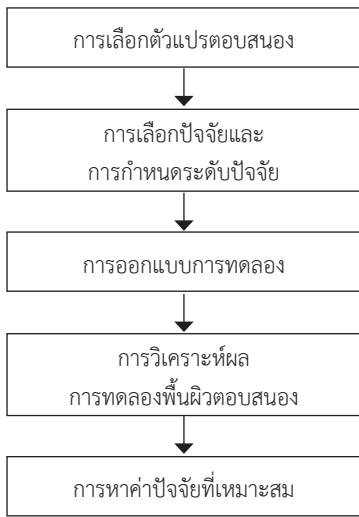
ดูล้อช่วยแรง โดยได้สรุปไว้ว่าการปรับตั้งปัจจัยความลึกตัด อัตราการป้อนมีด และความเร็วตัด ที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ต้องทิ้งชิ้นงาน จากนั้นจึงใช้วิธีการทดลองแฟกทอเรียลและการทดลองพื้นผิวตอบสนองหาการปรับตั้งระดับปัจจัยใหม่ที่เหมาะสม อนุชิต [11] ได้ลดต้นทุนคุณภาพโดยรวมในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ละค่าเพื่อศึกษาผลจากปัจจัยหลัก และได้สรุปไว้ว่า ปัจจัย แรงดันปิดแม่พิมพ์ แรงดันฉีด และระยะการจับยึดเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดครีบบนผิวแม่พิมพ์ จากนั้นจึงใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ หาระดับปัจจัยที่เหมาะสม รัฐรงค์ [12] ได้ลดการใช้วัสดุในการผลิตกระป๋อง ด้วยการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องใหม่ โดยใช้การทดลองแฟกทอเรียลศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการรับแรง จากนั้นจึงใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD หาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

นอกจากงานวิจัยที่ได้ยกตัวอย่างมานี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะทดลองเพื่อหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ โดยไม่มีการตรวจสอบค่าความโค้ง (Curvature) ซึ่งทำให้ผลที่ได้จากปัจจัยที่เหมาะสมนี้อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด

จากที่กล่าวมาสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการทดลองเพื่อศึกษาหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผ้าที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ภายในรถยนต์ทั้ง 3 กระบวนการได้ โดยงานวิจัยนี้จะใช้การทดลองแบบลำดับขั้น ซึ่งจะเริ่มจากการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ และทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง เพื่อตรวจสอบความมีนัยสำคัญของค่าความโค้ง จากนั้นจะใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยจะอธิบายเฉพาะ 3 ขั้นตอนแรก ส่วนขั้นตอนที่เหลือ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ผลการทดลองพื้นผิวตอบสนองและการหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ได้



รูปที่ 8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ค่าตอบสนองอยู่ในช่วงที่ลูกค้าต้องการจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

3.1 การเลือกตัวแปรทดสอบ

การเลือกตัวแปรทดสอบ จะกำหนดตามปัญหาที่เกิดขึ้นจากการผลิตผ้าที่มีคุณสมบัติไม่ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้าดังที่กล่าวไว้ในตารางที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 3 ตัวแปรดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรทดสอบ	สัญลักษณ์
ค่าความกว้างของผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ	W1
ค่าความกว้างของผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ	W2
ค่าน้ำหนักของผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ด	Wt

3.2 การเลือกปัจจัยและการกำหนดระดับปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองจะอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมการผลิต โดยอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาใช้พิจารณาร่วมกัน เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตัวแปร

ตอบสนองอย่างแท้จริง หลังจากการวิเคราะห์ร่วมกับวิศวกรของโรงงานทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

ในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปัจจัย S, T1 และ D1 เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบท่อตัวแปรตอบสนอง W1 เช่น การปรับตั้งปัจจัย T1 ที่ระดับต่ำเกินไปอาจทำให้ผ้าหย่อนได้ แต่ในทางกลับกันการปรับตั้งปัจจัย T1 ที่ระดับสูงจะทำให้หน้ากว้างผ้าแคบลง ส่วนในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถพบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปัจจัย T2, PD, D2 และ SR โดยปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง W2 เช่น การปรับตั้งปัจจัย D2 ให้มีความลึกน้อย (ที่ระดับต่ำ) เข็มจะเกี่ยวเส้นใยลงไปได้น้อยและไม่ทำให้ผ้าแคบลง แต่หากปรับตั้งปัจจัย D2 ให้มีความลึกมาก (ที่ระดับสูง) เข็มจะเกี่ยวเส้นใยให้ลึกลงตามเข็มได้มาก และส่งผลทำให้ความกว้างของผ้าแคบลง

ในส่วนของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ด พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปัจจัย T3, G, RS และ GW โดยปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง Wt เช่น ในขั้นตอนการเกลียว ถ้ากำหนดให้ใช้ปัจจัย G ที่ระดับต่ำ จะทำให้กาวสะสมอยู่ที่ผิวผ้าน้อยและส่งผลทำให้ผ้ามีน้ำหนักเบากว่าข้อกำหนด แต่ถ้ากำหนดให้ใช้ปัจจัย G ที่ระดับสูงจะส่งผลทำให้กาวสะสมอยู่ที่ผิวของผ้าหนาและจะทำให้ผ้ามีน้ำหนักมากขึ้น สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองจากการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง จะสรุปได้ดังตารางที่ 3 ถึง 5

ตารางที่ 3 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ W1

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	ผลกระทบต่อ W1	ระดับปัจจัยต่ำ-สูงเกินไป
S	ต่ำ	ผ้าแคบลง	ผ้าแคบลง
	สูง	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าไม่แคบลง
T1	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าหย่อน
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าขาดได้
D1	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าไม่แคบลง
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าแคบลงมาก



ตารางที่ 4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ W2

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	ผลกระทบต่อ W2	ระดับปัจจัยต่ำ-สูงเกินไป
T2	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าห้อย
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าขาดได้
PD	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าไม่แคบลง
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าแคบลงมาก
D2	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าไม่แคบลง
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าแคบลงมาก
SR	ต่ำ	ผ้าไม่แคบลง	ผ้าห้อย
	สูง	ผ้าแคบลง	ผ้าขาดได้

ตารางที่ 5 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ Wt

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	ผลกระทบต่อWt	ระดับปัจจัยต่ำ-สูงเกินไป
T3	ต่ำ	ผ้ามีน้ำหนักมาก	ผ้าห้อย
	สูง	ผ้ามีน้ำหนักเบา	ผ้าขาดได้
G	ต่ำ	ผ้ามีน้ำหนักเบา	ผ้ามีน้ำหนักเบา
	สูง	ผ้ามีน้ำหนักมาก	ผ้ามีน้ำหนักมาก
RS	ต่ำ	ผ้ามีน้ำหนักมาก	ผ้ามีน้ำหนักมาก
	สูง	ผ้ามีน้ำหนักเบา	ผ้ามีน้ำหนักเบา
GW	ต่ำ	ผ้ามีน้ำหนักเบา	ผ้ามีน้ำหนักเบา
	สูง	ผ้ามีน้ำหนักมาก	ผ้ามีน้ำหนักมาก

จากตารางที่ 3 ถึง 5 แสดงให้เห็นแนวโน้มหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองอันเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยที่ค่าต่ำและค่าสูง ผู้วิจัยจึงได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาช่วยในการวิเคราะห์หาบริเวณที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ค่าปรับตั้งปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบันเป็นจุดกึ่งกลางของการทดลอง และพิจารณาเลือกบริเวณการทดลองของปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูงร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิต ทำให้ได้ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของแต่ละกระบวนการ แสดงได้ดังตารางที่ 6 ถึง 8

ตารางที่ 6 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ

ปัจจัย	ระดับปัจจัยในการทดลอง			หน่วย
	ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)	
S	2.00	2.75	3.50	m/min
T1	16	23	30	%
D1	3.5	4.0	4.5	mm

ตารางที่ 7 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ

ปัจจัย	ระดับปัจจัยในการทดลอง			หน่วย
	ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)	
T2	12	16	20	%
PD	45	50	55	pin/cm ²
D2	5.0	7.5	10.0	mm
SR	0.7:1	0.8:1	0.9:1	-

ตารางที่ 8 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ถ

ปัจจัย	ระดับปัจจัยในการทดลอง			หน่วย
	ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)	
T3	15.0	22.5	30.0	%
G	0.69	0.81	0.92	mm
RS	10.0	17.5	25.0	%
GW	20:60	-	30:50	-

จากตารางที่ 8 เนื่องจากปัจจัย GW เป็นความสำเร็จรูปที่ทางโรงงานกรณีสศึกษานำมาใช้มีอยู่ 2 สูตร จึงไม่มีค่าระดับปัจจัยที่จุดกึ่งกลางของการทดลอง

3.3 การออกแบบการทดลอง

เมื่อได้ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการทดลองแบบลำดับขั้นตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1 โดยเริ่มจากการทดลองแพททอเรียลแบบ 2 ระดับ และเพิ่มการทดลองที่บริเวณจุดกึ่งกลางเพื่อตรวจสอบความมีนัยสำคัญของค่าความโค้ง ผลการทดสอบพบว่า ค่าความโค้งมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่า พิจารณาได้

จากค่า p -value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 9 จึงสรุปได้ว่าบริเวณระดับปัจจัยที่ทำการทดลองอยู่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดได้ จากนั้นจึงสามารถใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองในบริเวณนี้ได้ทันที โดยเลือกใช้การทดลองแบบ CCD เพื่อหาค่าตอบสนองที่ดีที่สุดต่อไป

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบที่จุดกึ่งกลาง

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าความโค้ง (Curvature)
	p -value
W1	0.0300
W2	<0.0001
Wt	<0.0001

เนื่องจากการทดลอง CCD ของแต่ละกระบวนการผลิตมีจำนวนปัจจัยไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลที่จุดกึ่งกลางและข้อมูลที่ Axial Points แตกต่างกันดังนี้

ในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะมี 3 ปัจจัย ต้องใช้ข้อมูลที่จุดกึ่งกลางและข้อมูลที่ Axial Points อย่างละ 6 การทดลอง ส่วนในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถมี 4 ปัจจัย ต้องใช้ข้อมูลที่จุดกึ่งกลางและข้อมูลที่ Axial Points เท่ากับ 7 และ 8 การทดลองตามลำดับ และในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ดมี้ 3 ปัจจัย จึงใช้ข้อมูลที่จุดกึ่งกลางและ Axial Points อย่างละ 6 การทดลอง โดยมีอีก 1 ปัจจัยที่เป็นปัจจัยเชิงคุณภาพจึงต้องเพิ่มจำนวนการทดลองเป็น 2 เท่า ทำให้ต้องใช้ข้อมูลที่จุดกึ่งกลางและ Axial Points รวมทั้งสิ้น อย่างละ 12 การทดลอง ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมดของแต่ละกระบวนการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง

Process	Design of Experiment			Total
	Cube Points	Center Points	Axial Points	
Seat Back	2 ³	6	6	20
Floor Carpet	2 ⁴	7	8	31
Headliner	2 ⁴	12	12	40

4. การวิเคราะห์ผลการทดลองพื้นผิวตอบสนอง

จากแบบจำลองที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะที่แสดงดังตารางที่ 11 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 3 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของปัจจัยหลัก S*S มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของ W1 อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า R^2 adjusted และค่า R^2 predicted เท่ากับ 97.59% และ 96.17% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เลือกมานั้นสามารถทำนายความผันแปรของค่า W1 ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยทุกตัว ซึ่งประกอบไปด้วย ปัจจัยหลัก อิทธิพลร่วมของปัจจัยหลัก และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลกระทบต่อค่า SD ของ W1 อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 11 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง W1

Term	p -value (Mean)	p -value (SD)
S	✓	✓
T1	✓	✓
D1	✓	✓
S*S	✓	✓
T1*T1	✗	✓
D1*D1	✗	✓
S*T1	✗	✓
T1*D1	✗	✓
SD	0.737107	0.384524
R^2 adjusted	97.59%	78.09%
R^2 predicted	96.17%	67.86%

หมายเหตุ: ✓ = มีนัยสำคัญ, ✗ = ไม่มีนัยสำคัญ

จากแบบจำลองที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถที่แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ปัจจัยหลัก T2, D2 และ SR รวมไปถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลัก D2*D2 และ SR*SR มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของ W2 อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า R^2 adjusted และค่า R^2 predicted เท่ากับ 77.61% และ 70.82% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าแบบจำลองที่เลือกมานี้สามารถทำนายความผันแปรของค่า W2 ได้ดีพอควร นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยทุกตัว ซึ่งประกอบด้วย ปัจจัยหลัก อิทธิพลร่วมของปัจจัยหลัก และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยล้วนมีผลกระทบต่อค่า SD ของ W2 อย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 12 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง W2

Term	p-value (Mean)	p-value (SD)
T2	✓	✓
PD	✗	✓
D2	✓	✓
SR	✓	✓
T2*T2	✗	✓
PD*PD	✗	✓
D2*D2	✓	✓
SR*SR	✓	✓
T2*D2	✗	✓
PD*D2	✗	✓
PD*SR	✗	✓
D2*SR	✗	✓
SD	1.15556	0.365457
R ² adjusted	77.61%	76.99%
R ² predicted	70.82%	65.60%

หมายเหตุ: ✓ = มีนัยสำคัญ, ✗ = ไม่มีนัยสำคัญ

สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรหมหลังครดมีค่า R² adjusted และ R² predicted เท่ากับ 88.71% และ 80.01% ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าแบบจำลองที่เลือกมาสามารถทำนายความผันแปรได้ดีเช่นเดียวกัน ในส่วนของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรหมหลังครดนั้นสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง Wt

Term	p-value (Mean)	p-value (SD)
T3	✓	✓
G	✓	✓
RS	✓	✓
GW	✓	✓
T3*T3	✓	✓
G*G	✓	✗
RS*RS	✓	✗
GW*GW	✗	✗
T3*RS	✓	✗
T3*GW	✓	✗
G*GW	✓	✓
RS*GW	✓	✓
SD	1.99337	0.426337
R ² adjusted	88.71%	78.37%
R ² predicted	80.01%	61.32%

หมายเหตุ: ✓ = มีนัยสำคัญ, ✗ = ไม่มีนัยสำคัญ

4.1 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการใช้แบบจำลองการถดถอยให้มีอำนาจการทดสอบที่สูงที่สุดนั้น จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งพิจารณาได้จากค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ของแบบจำลองที่เหมาะสม โดยค่าส่วนตกค้างจะต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างต้องมีค่าคงที่ การตรวจสอบส่วนตกค้างสามารถพิจารณาได้จากกราฟ Residual Plot ดังรูปที่ 9 ถึง 11

การตรวจสอบการกระจายตัวของส่วนตกค้าง พิจารณาได้จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีค่า p-value มากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากทั้ง 3 การทดลอง มีการกระจายตัวแบบปกติ

การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของส่วนตกค้าง พิจารณาได้จากกราฟ Residual Versus Order พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะไร้รูปแบบ (Randomization) และไม่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตกค้าง พิจารณาได้จากกราฟ Residual Versus Fits พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะสมดุลด้านบนและด้านล่างรอบค่าศูนย์ จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลทั้ง 3 การทดลองมีความสม่ำเสมอหรือมีความแปรปรวนคงที่ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของค่า SD จะได้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกับรูปที่ 9 ถึง 11 เช่นกัน

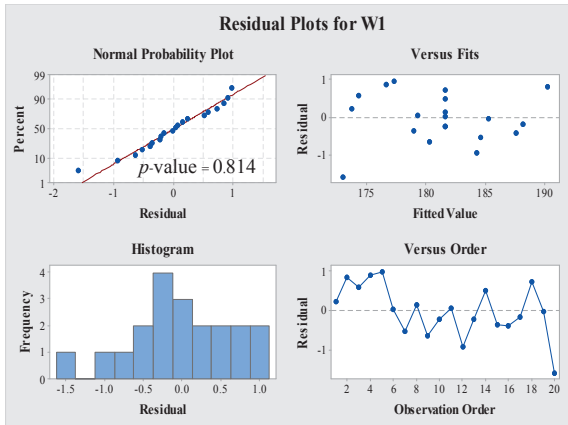
4.2 การหาสมการถดถอย (Regression Model)

จากการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 ค่าตอบสนอง สามารถเขียนสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองได้ดังนี้

สมการถดถอยของค่า W1 และค่า SD (Uncoded)

$$W1 = 203.4 + 6.03(S) - 0.78(T1) - 2.92(D1) - 1.17(S^*) \quad (1)$$

ปริมา นาคำเพ็ญ และคณะ, “การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ โดยใช้วิธีการทดลองแบบลำดับขั้นและการวิเคราะห์ความผันแปร.”

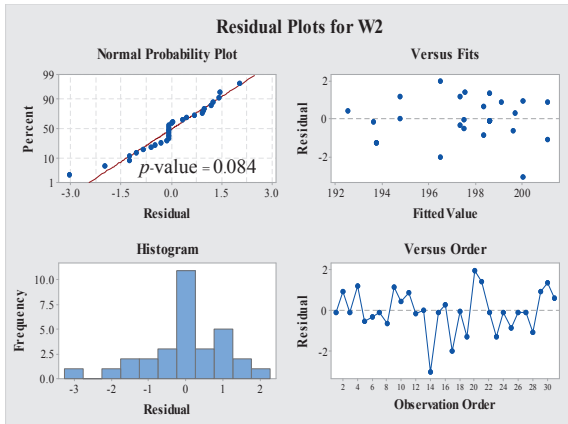


รูปที่ 9 การตรวจสอบแบบจำลองของค่าตอบสนอง W1

$$\begin{aligned} \ln(SD_{W1}) = & - 3.29 - 0.63(T1) + 4.25(D1) \\ & + 1.02(S) + 0.005(T1*T1) \\ & - 0.77(D1*D1) - 0.33(S*S) \\ & + 0.08(T1*D1) - 0.04(T1*S) \end{aligned} \quad (2)$$

สมการถดถอยของค่า W2 และค่า SD (Uncoded)

$$\begin{aligned} W2 = & 174.3 - 0.13(T2) + 0.79(D2) \\ & + 81.4(SR) - 0.09(D2*D2) \\ & - 62(SR*SR) \end{aligned} \quad (3)$$

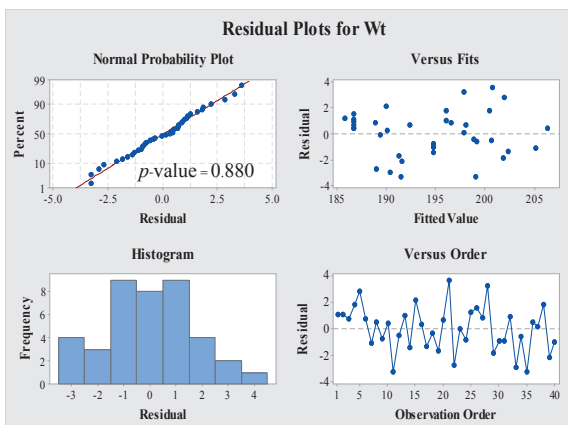


รูปที่ 10 การตรวจสอบแบบจำลองของค่าตอบสนอง W2

$$\begin{aligned} \ln(SD_{W2}) = & - 8 - 0.15(T2) - 0.7(SR) \\ & + 0.04(PD) + 1.52(D2) \\ & + 0.01(T2*T2) + 14.55(SR*SR) \\ & + 0.003(PD*PD) + 0.01(D2*D2) \\ & - 0.02(T2*D2) - 0.32(SR*PD) \\ & - 0.89(SR*D2) - 0.02(PD*D2) \end{aligned} \quad (4)$$

สมการถดถอยของค่า Wt และค่า SD (Uncoded)

$$\begin{aligned} W_{t(GW = 20/60)} = & 313.6 - 161.4(G) - 1.55(RS) \\ & - 3.59(T3) + 97.5(G*G) \\ & + 0.02(RS*RS) \\ & + 0.06(T3*T3) \\ & + 0.03(RS*T3) \end{aligned} \quad (5)$$



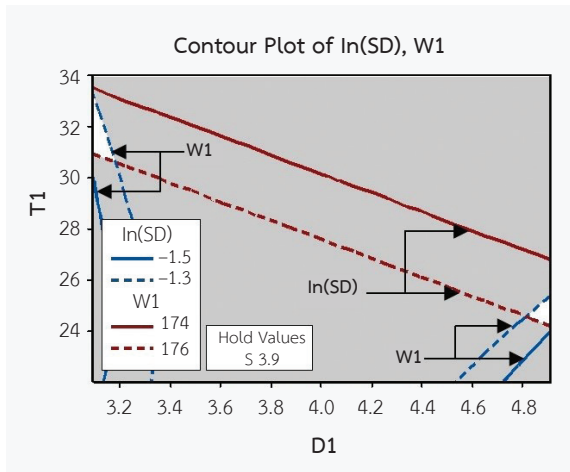
รูปที่ 11 การตรวจสอบแบบจำลองของค่าตอบสนอง Wt

$$\begin{aligned} \ln(SD_{Wt}) = & - 2.67 + 0.85(G) - 0.02(RS) \\ & + 0.24(T3) - 0.004(T3*T3) \end{aligned} \quad (6)$$

5. การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

การหาบริเวณการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการ ผู้วิจัยจะใช้ฟังก์ชัน Overlaid Contour Plot มาช่วยในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบท่อค่าตอบสนองและค่า SD ของค่าตอบสนองในเวลาเดียวกัน เพื่อระบุบริเวณของค่าตอบสนองให้อยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า

ในการแสดงผล Overlaid Contour Plot จะสามารถ

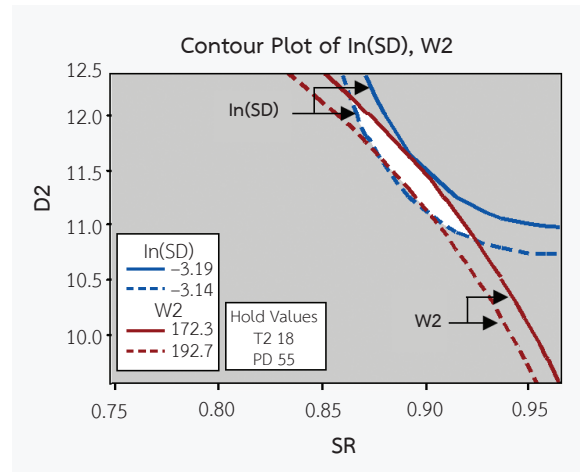
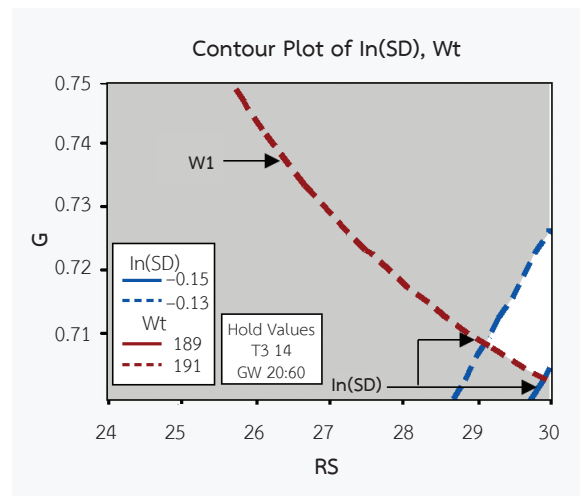
รูปที่ 12 Overlaid Contour Plot ของค่าตอบสนอง $W1$

แสดงได้เพียง 2 ปัจจัยเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องเลือกกำหนดปัจจัยโดยมีหลักการดังนี้

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรหมหลังเบาะ พิจารณาจากรูปที่ 12 ผู้วิจัยได้เลือกกำหนดปัจจัย S ให้มีค่าเท่ากับ 3.9 m/min เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องการความเร็วในการผลิตเพื่อชดเชยเวลาปรับตั้งเครื่องจักร จึงทำให้ได้คำตอบของค่าตอบสนอง $W1$ ที่เหมาะสมอยู่ภายในพื้นที่สีขาวซึ่งมีอยู่ 2 บริเวณ แต่เมื่อผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาร่วมกับงานจริงพบว่า การกำหนดค่าปรับตั้งปัจจัย $T1$ ที่ระดับสูง (พื้นที่สีขาวด้านซ้าย) อาจส่งผลให้ผ้าขาดได้แต่ในทางกลับกันการปรับตั้งค่าปัจจัย $T1$ ที่ระดับต่ำ (พื้นที่สีขาวด้านขวา) ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผ้าแต่อย่างใด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การปรับตั้งปัจจัยที่บริเวณพื้นที่สีขาวด้านขวา

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรหมปูพื้นรถ ผู้วิจัยได้เลือกกำหนดปัจจัย $T2$ และปัจจัย PD เท่ากับ 18% และ 55 pin/cm² ตามลำดับ เนื่องจากการปรับตั้งที่ค่าปัจจัยอื่นๆ ไม่สามารถหาค่าตอบสนอง $W2$ ที่เหมาะสมได้ เพราะระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีบริเวณแคบเกินไป ดังนั้นจึงพบค่าตอบสนองที่เหมาะสมปรากฏอยู่ในบริเวณพื้นที่สีขาว พิจารณาได้ดังรูปที่ 13

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรหมหลังคาร์ด ผู้วิจัยได้เลือกกำหนดปัจจัย $T3$ ที่ 14% เพราะเป็นค่าสูงสุด

รูปที่ 13 Overlaid Contour Plot ของค่าตอบสนอง $W2$ รูปที่ 14 Overlaid Contour Plot ของค่าตอบสนอง Wt

ที่สามารถปรับได้โดยไม่ทำให้ผ้าหย่อน นอกจากนี้ยังได้กำหนดปัจจัย GW ที่ 20:60 เนื่องจากเป็นกาวสูตรเดียวที่สามารถให้ค่าตอบสนอง Wt ที่เหมาะสมที่สุด จึงทำให้พบบริเวณค่าตอบสนองที่ต้องการปรากฏบนพื้นที่สีขาว ดังแสดงในรูปที่ 14

จากรูปที่ 12 ถึง 14 ผู้วิจัยได้เลือกค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเพื่อนำไปใช้ปรับตั้งในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 14

ปริมา นาคำเพ็ญ และคณะ, “การหาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ โดยใช้วิธีการทดลองแบบลำดับขั้นและการวิเคราะห์ความผันแปร.”

ตารางที่ 14 ค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมและค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง

กระบวนการผลิต	ปัจจัย	ปรับตั้งที่	หน่วย	ผลที่ได้จากการทดลอง	ค่า SD
ผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ	S	3.9	m/min	W1 เท่ากับ 175.64 cm	0.246 cm
	T1	24.7	%		
	D1	4.9	mm		
ผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ	T2	18	%	W2 เท่ากับ 192.40 cm	0.042 cm
	PD	55	pin/cm ²		
	D2	11.4	mm		
	SR	0.9:1	-		
ผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ด	T3	14	%	Wt เท่ากับ 190.90 gsm	0.870 gsm
	G	0.71	mm		
	RS	29.7	%		
	G:W	20:60	-		

6. การยืนยันผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลว่า เมื่อนำค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากหัวข้อที่ 5 มาใช้ปรับตั้งในกระบวนการผลิตจริง จะได้ผลลัพธ์เป็นไปตามผลการทดลองหรือไม่ โดยผู้วิจัยได้สุ่มเก็บตัวอย่างค่าตอบสนองมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่าง

ค่าตอบสนอง	ผลหลังจากการปรับปรุง		
	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
W1	20	175.65	0.252
W2	20	192.41	0.044
Wt	20	190.57	0.881

จากตารางที่ 15 ผู้วิจัยจะทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองโดยแบ่งการทดสอบสมมติฐานออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ย และการทดสอบสมมติฐานค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยจะใช้วิธีการ

ทดสอบสมมติฐานทางสถิติ t-test แบบข้างเดียว (One-tail Test) ทางด้านขวาสำหรับค่า W1 และ W2 ส่วน Wt จะใช้การทดสอบทางด้านซ้าย เพราะต้องการทดสอบค่าเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างว่าจะมีค่าไม่แย่ไปกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง

กรณีที่ 2 การทดสอบสมมติฐานค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ Chi-square Test แบบข้างเดียว ทางด้านขวาสำหรับทุกค่าตอบสนอง เพราะต้องการทดสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการกลุ่มตัวอย่างว่าจะมีค่าไม่แย่ไปกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง

ในการตั้งสมมติฐานของค่าเฉลี่ยและการตั้งสมมติฐานค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าตอบสนองจะทดสอบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 14 ซึ่งจะตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

สมมติฐานของค่าตอบสนอง W1

$$H_0 : \mu = 175.64 \quad \text{และ} \quad H_0 : \sigma = 0.246$$

$$H_1 : \mu > 175.64 \quad \text{และ} \quad H_1 : \sigma > 0.246$$

สมมติฐานของค่าตอบสนอง W2

$$H_0 : \mu = 192.40 \quad \text{และ} \quad H_0 : \sigma = 0.042$$

$$H_1 : \mu > 192.40 \quad \text{และ} \quad H_1 : \sigma > 0.042$$

สมมติฐานของค่าตอบสนอง Wt

$$H_0 : \mu = 190.90 \quad \text{และ} \quad H_0 : \sigma = 0.870$$
$$H_1 : \mu > 190.90 \quad \text{และ} \quad H_1 : \sigma > 0.870$$

จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 16 สรุปได้ว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ (H_0) พิจารณาได้จากค่า p -value ของทุกค่าตอบสนอง จะมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการนำค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยมาใช้ปรับตั้งในกระบวนการผลิตจริง มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยและค่า SD

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
	p -value	p -value
W1	0.431	0.395
W2	0.148	0.361
Wt	0.053	0.426

7. สรุป

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบลำดับขั้น เพื่อศึกษาหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมภายในรถยนต์จากผ้าชนิดไม่ทอ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะ กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถ และ กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ท โดยต้องการให้ค่าตอบสนองหลังการปรับตั้งปัจจัยใหม่ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งผลจากการทดลองสรุปได้ดังนี้

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังเบาะควรปรับตั้งปัจจัย S, T1 และ D1 ไว้ที่ค่า 3.9 m/min, 24.7% และ 4.9 mm ตามลำดับ จะทำให้ค่าตอบสนอง W1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 175.65 cm และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.252 cm

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมปูพื้นรถควรปรับตั้งปัจจัย T2, PD, D2 และ SR ไว้ที่ค่า 18%, 55 pin/cm², 11.4 mm และ 0.9:1 ตามลำดับ จะทำให้ค่าตอบสนอง W2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 192.41 cm และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เท่ากับ 0.044 cm

กระบวนการผลิตผ้าสำหรับพรมหลังคาร์ทควรปรับตั้งปัจจัย T3, G, RS และ GW ไว้ที่ค่า 14%, 0.71 mm, 29.7% และ 20:60 ตามลำดับ จะทำให้ค่าตอบสนอง Wt มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 190.57 gsm และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.881 gsm

จากการทดสอบเพื่อยืนยันผลของค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ได้จากการทดลองดังกล่าว พบว่า เมื่อนำมาใช้ปรับตั้งในกระบวนการผลิตจริงจะได้ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงในกระบวนการผลิตผ้าทั้ง 3 กระบวนการ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาและบุคลากรหลายฝ่ายเป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในด้านการจัดเตรียมวัสดุุดิบและการเก็บรวบรวมข้อมูล อีกทั้งการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยจนกระทั่งสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณความอนุเคราะห์ในด้านโปรแกรม Minitab สำหรับใช้ในกาวิเคราะห์ข้อมูลจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., the United States of America: Johnson Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [2] A. Rawal and R. Anandjiwala, "Comparative study between needlepunched nonwoven geotextile structures made from flax and polyester fibres," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 1, pp. 61-65, 2007.
- [3] P. Kiekens and M. Zamfir, "Non-wovens from cotton fibres for absorbent products obtained

- by the needle-punching process,” *AUTEX Research Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 166–174, 2002.
- [4] V. K. Midha and A. Mukhopadyay, “Bulk and physical properties of needle punched nonwoven fabrics,” *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, vol. 30, no. 2, pp. 218–229, 2005.
- [5] S. Sengupta, P. Ray, and P. K. Majumdar, “Effect of punch density, depth of needle penetration and mass per unit area on compressional behaviour of jute needle-punched nonwoven fabrics using central composite rotatable experimental design,” *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, vol. 33, no. 4, pp. 411–418, 2008.
- [6] S. Mongkonsong, “Study of suitable factor for carpet coating,” M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2007 (in Thai).
- [7] W. Rodraksa and W. Tharmmaphornphilas, “Appearance defective reduction in nonwoven process,” in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2013 Vol II*, 2013, pp. 1–6.
- [8] S. Khadthachan, “A study of finding optimal factor in non-woven manufacturing process,” M. Eng. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2013 (in Thai).
- [9] W. Pulkasem, “Determination of optimal factors to reduce waste of nonwovens product by using design of experiment,” M.Eng. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2014 (in Thai).
- [10] K. Gumthorn, “Defective reduction of fly wheel comp through coq analysis,” M.Eng. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2006 (in Thai).
- [11] A. Kitprakomsonti, “Cost of quality reduction in injection molding process of automotive parts,” M.Eng. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2006 (in Thai).
- [12] R. Rotbunsongsri, “Optimization of food cans corrugation by using response surface methodology,” M.Eng. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2011 (in Thai).