

การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยหลักค้นหาตัวแปรของไชนิน และ  
วิธีการทาгуชิ

A STUDY OF EXPERIMENT DESIGN WITH SHAININ'S VARIABLES SEARCH  
AND TAGUCHI'S METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-270-201

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยหลักค้นหาตัวแปรของไชนิน และ  
วิธีการทาгуชิ

A STUDY OF EXPERIMENT DESIGN WITH SHAININ'S VARIABLES SEARCH  
AND TAGUCHI'S METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-270-201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF EXPERIMENT DESIGN WITH SHAININ'S VARIABLES SEARCH  
AND TAGUCHI'S METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-M-270-201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



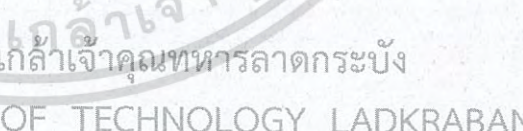
COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยหลักค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการทาากูชิ  
Thesis Title A Study of Experiment Design with Shainin's Variables Search and Taguchi's Method  
นักศึกษา นางสาวนภานต์ วิชิระประเสริฐ  
รหัสประจำตัว 58601273  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-270-201

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วิกรม	จารุพงศา	
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	
รศ.ดร.ฤดี	มาสุจันท์	
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์	สิริเกษมสุข	
รศ.ดร.ทศพล	เกียรติเจริญผล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขอสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยหลักค้นหาตัวแปรของ ไชนิน และวิธีการทาภูเขา
นักศึกษา	นางสาวธนกานต์ วิจิระประเสริฐ
รหัสประจำตัว	58601273
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและแสดงแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการของทาภูเขาและหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน โดยอาศัยกรณีศึกษา และทำการวิเคราะห์ อธิบายผลการทดลองของวิธีการออกแบบการทดลองของทาภูเขา หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองของทาภูเขา จะดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Arrays) และหลักการค้นหาตัวแปรของไชนินจะดำเนินการ 4 ขั้นตอน ส่วนวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล จะมีรูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{kP}$  Fractional Factorial Design และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะมีรูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^k$  Factorial Design จากผลการทดลองพบว่า วิธีการออกแบบการทดลองของทาภูเขา สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้ใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งมีความเชื่อมั่นในทางสถิติ และยังใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าส่วนวิธีการของไชนินใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทาภูเขา วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง การประยุกต์ใช้วิธีการของทาภูเขาและไชนิน มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ในกรณีที่การดำเนินการทดลองไม่สามารถทำการทดลองได้จำนวนมากและมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองแบบคัดกรอง (Screening) แต่อย่างไรก็ตามการวางแผนการทดลองของวิธีการของทาภูเขาและไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่างนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลองมากกว่าแบบแฟคทอเรียล

Thesis	A Study of Experiment Design with Shainin's Variables Search and Taguchi's Method
Student	Ms.Thanakarn Vichiraprasert
Student ID.	58601273
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Tossapol Kiatcharoenpol

## ABSTRACT

The aim of this research is to study and provide the implementation of Taguchi method and Shainin methods by using case studies. Then, analysis of Taguchi, Shainin, Fractional factorial experiment designs and Classical factorial experiment designs was carried out. Taguchi method uses the experiment of Orthogonal Array and Shainin method operates in four processes.  $2^{k-p}$  Fractional Factorial Design is used as a Fractional factorial experiment designs and  $2^k$  Factorial Design is used as a Classical experimental designs. Taguchi method gives the same result as the Fractional factorial experiment and the Classical factorial experiment and provides statistical confidence with fewer number of trials. The number of trials of Shainin method is less than those of Taguchi method, Fractional factorial experiment and Classical factorial experiment. It is valuable to reduce cost and time of experiments. Therefore, applications of Taguchi and Shainin methods are useful for the study when a number of trials cannot be performed on many experiments, especially in case of the screening experiment. However, the approaches of Taguchi and Shainin methods require the understanding of process parameters more than that of Classical factorial design in order to select factors and to set suitable levels of experimental conditions.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ แนะนำแนวทางการดำเนินงานตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิญ ศรีสีบสาย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้งานโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณพี่และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอน้อมบูชาแต่พระคุณบิดามารดาผู้เป็นที่รักและเคารพของข้าพเจ้า ผู้ให้การอบรมสั่งสอน สนับสนุนในทุกๆเรื่อง ดูแลข้าพเจ้าด้วยความรักที่อบอุ่น และเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธนกานต์ วิชิระประเสริฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง .....	X
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ระเบียบการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การออกแบบการทดลอง.....	4
2.1.1 วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบการทดลอง.....	5
2.1.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง .....	5
2.1.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง.....	6
2.1.3.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองโดยทั่วไป .....	6
2.2 การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ .....	8
2.3 การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล $2^{k-p}$ .....	9
2.4 การออกแบบการทดลองของไชนิน.....	10
2.4.1 วัตถุประสงค์ของเครื่องมือทั้ง 13 เครื่องมือ .....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 หลักการค้นหาตัวแปร.....	13
2.4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร .....	14
2.4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย.....	15
2.4.2.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร .....	15
2.4.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร .....	16
2.4.3 งานวิจัยของการประยุกต์ใช้โซลิน.....	16
2.5 การออกแบบการทดลองของทาคุชิ.....	16
2.5.1 ขั้นตอนการศึกษาการทดลองของทาคุชิ.....	17
2.5.2 การควบคุมปัจจัยรบกวน.....	19
2.5.3 ฟังก์ชันความสูญเสียและลักษณะของฟังก์ชันความสูญเสีย .....	20
2.5.4 อัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N).....	21
2.5.5 งานวิจัยของการประยุกต์ใช้ทาคุชิ.....	22
2.6 งานวิจัยของการเปรียบเทียบการออกแบบการทดลอง.....	24
2.7 บทสรุปจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า.....	29
3.1 กรณีศึกษา.....	29
3.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 .....	29
3.1.2 กรณีศึกษาที่ 2.....	29
3.1.3 กรณีศึกษาที่ 3.....	30
3.1.3.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก .....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อการวิจัย .....	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน (กรณีศึกษา : กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม) .....	36
4.1 กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม.....	36
4.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^k$ Full Factorial Design.....	37
4.2.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา V และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	41
4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Shear Force.....	42
4.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design .	43
4.3.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	44
4.3.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	46
4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Shear Force.....	47
4.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไชนิน .....	47
4.4.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park) .....	47
4.4.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors).....	49
4.4.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run).....	50
4.4.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis) .....	51
4.5 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ.....	56
4.5.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	57
4.5.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	58
4.5.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N).....	58
4.6 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล .....	60
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน (กรณีศึกษา : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ).....	63
5.1 กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ .....	63
5.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^k$ Full Factorial Design.....	64
5.2.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	66
5.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	68
5.2.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Times.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design .	70
5.3.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	71
5.3.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	73
5.3.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Times.....	73
5.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไชนิน .....	74
5.4.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park).....	74
5.4.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors).....	75
5.4.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run).....	77
5.4.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis) .....	78
5.5 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทาคุชิ.....	80
5.5.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	81
5.5.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	81
5.5.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N).....	82
5.6 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทาคุชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล.....	83
บทที่ 6 ผลการดำเนินงาน (กรณีศึกษา : กระบวนการฉีดพลาสติก) .....	87
6.1 กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก .....	87
6.1.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก .....	88
6.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design .	91
6.2.1 รูปแบบการทดลองเป็นแบบ $2^{7-1}$ Fractional Factorial Design .....	91
6.2.1.1 การหัตตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	92
6.2.1.2 การบีดงของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	97

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 รูปแบบการทดลองเป็นแบบ $2^{7-3}$ Fractional Factorial Design .....	102
6.2.2.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	103
6.2.2.2 การบดองของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	107
6.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไชนิน .....	110
6.3.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	110
6.3.1.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park) .....	110
6.3.1.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors) .....	111
6.3.1.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run) .....	113
6.3.1.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis) .....	114
6.3.2 การบดองของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	118
6.3.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park) .....	118
6.3.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors) .....	120
6.3.2.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run) .....	121
6.3.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis) .....	122
6.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ .....	127
6.4.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	128
6.4.1.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	129
6.4.1.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	129
6.4.1.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) .....	130
6.4.2 การบดองของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	131
6.4.2.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA .....	132
6.4.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ .....	133
6.4.2.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) .....	133
6.5 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล .....	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	139
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	139
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	141
เอกสารอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก .....	145
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	146
ภาคผนวก ข การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล.....	155
ภาคผนวก ค การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเศษส่วนแฟคทอเรียล.....	160
ภาคผนวก ง การออกแบบการทดลองด้วยวิธีโชนิน.....	168
ภาคผนวก จ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ.....	173
ภาคผนวก ฉ ตารางวิเคราะห์ผลการทดลอง 3 กรณีศึกษา.....	176
ประวัติผู้เขียน.....	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ขั้นตอนและวัตถุประสงค์ของแต่ละขั้นตอนของหลักการค้นหาตัวแปร.....	14
2.2	การเลือกใช้ตารางแนวฉาก.....	18
2.3	ตารางแผนการทดลอง L9 ( $3^4$ ).....	19
4.1	ระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร.....	37
4.2	ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^5$ .....	37
4.3	ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{5-1}$ .....	43
4.4	กำหนดตัวแปร.....	48
4.5	จำแนกแยกแยะปัจจัย.....	50
4.6	ยืนยันตัวแปร.....	51
4.7	ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร.....	52
4.8	แสดงระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร.....	56
4.9	การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^5$ ).....	57
4.10	สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง.....	60
4.11	ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปร ของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน ( $2^k$ Factorial Design).....	61
5.1	ระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร.....	64
5.2	ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^5$ .....	65
5.3	ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{5-1}$ .....	70
5.4	กำหนดตัวแปร.....	75
5.5	จำแนกแยกแยะปัจจัย.....	77
5.6	ยืนยันตัวแปร.....	78
5.7	ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร.....	78
5.8	แสดงระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร.....	80
5.9	การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^5$ ).....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.10 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของ เฮลิคอปเตอร์กระดาศอย่างมีนัยสำคัญ ของกันทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง.....	84
5.11 ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปร ของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน ( $2^k$ Factorial Design).....	84
6.1 ระดับของตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปร.....	91
6.2 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{7-1}$ ของการหดตัวชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	92
6.3 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{7-1}$ ของการบิดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	97
6.4 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{7-3}$ ของการหดตัวชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	103
6.5 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ $2^{7-3}$ ของการบิดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	107
6.6 กำหนดตัวแปร.....	110
6.7 จำแนกแยกแยะปัจจัย.....	112
6.8 ยืนยันตัวแปร.....	113
6.9 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร.....	114
6.10 กำหนดตัวแปร .....	119
6.11 จำแนกแยกแยะปัจจัย.....	121
6.12 ยืนยันตัวแปร .....	122
6.13 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร.....	123
6.14 แสดงระดับของตัวแปรควบคุมทั้ง 7 ตัวแปร .....	127
6.15 แสดงระดับของตัวแปรควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร.....	127
6.16 การทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ในสถานะของตัวแปรควบคุมไม่ได้ที่แตกต่างกัน.....	128
6.17 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^7$ ) ของการหดตัวของ ชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	128
6.18 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^7$ ) ของการบิดงอของ ชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.19	
สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับการเกิดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก อย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง.....	136
6.20	
ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปร ของไซน์นและการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design.....	136



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต..... 4
2.2	ขั้นตอนการลดความแปรปรวนด้วยเทคนิคของไชนิน ..... 11
2.3	ลักษณะความสูญเสียของทากูชิ..... 20
3.1	ตัวแปรควบคุมของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ..... 30
3.2	ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก ..... 31
3.3	พฤติกรรมการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก..... 32
3.4	พฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก ..... 32
3.5	ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (%) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก ..... 33
3.6	ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (mm.) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก..... 33
3.7	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 34
4.1	ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป ..... 39
4.2	ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป..... 40
4.3	กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และ C (ความหนาของงาน)..... 40
4.4	กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC..... 41
4.5	ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) ..... 41
4.6	กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force..... 42
4.7	การออกแบบการทดลองแบบ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design ..... 43
4.8	ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป ..... 44
4.9	ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป..... 45
4.10	กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ..... 45
4.11	กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC ..... 46
4.12	ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)..... 46
4.13	กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force..... 47
4.14	กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ..... 54
4.15	กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ B..... 55
4.16	กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C..... 56
4.17	ข้อมูล ANOVA..... 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	58
4.19 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย .....	59
4.20 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C.....	59
5.1 ตัวแปรควบคุมของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ.....	63
5.2 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป .....	66
5.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก) และตัวแปร D (ความกว้างของลำตัว).....	67
5.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC และตัวแปร CD.....	67
5.5 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) .....	68
5.6 กราฟแสดง Residual Plots for Times.....	69
5.7 การออกแบบการทดลองแบบ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design .....	70
5.8 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป .....	71
5.9 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป.....	72
5.10 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก) .....	72
5.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	73
5.12 กราฟแสดง Residual Plots for Times .....	73
5.13 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก) .....	79
5.14 ข้อมูล ANOVA.....	81
5.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	81
5.16 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย .....	82
5.17 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ C.....	83
6.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก .....	88
6.2 พฤติกรรมการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	89
6.3 พฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก .....	89
6.4 ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (%) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก .....	90
6.5 ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (mm.) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก.....	90
6.6 การออกแบบการทดลองแบบ $2^{7-1}$ Fractional Factorial Design .....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป .....	94
6.8 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป.....	95
6.9 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร A, B, E, F และตัวแปร G .....	96
6.10 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BE, BG และตัวแปร EG.....	96
6.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	96
6.12 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป.....	100
6.13 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป.....	101
6.14 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดยา) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น).....	101
6.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	102
6.16 การออกแบบการทดลองแบบ $2^{7-3}$ Fractional Factorial Design.....	102
6.17 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป.....	104
6.18 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป .....	105
6.19 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B, E และ G .....	105
6.20 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร AC, AF และตัวแปร BD .....	106
6.21 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	106
6.22 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป.....	108
6.23 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป.....	108
6.24 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดยา).....	109
6.25 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	109
6.26 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดยา) .....	116
6.27 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) .....	117
6.28 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G.....	118
6.29 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดยา) .....	125
6.30 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) .....	126
6.31 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.32 ข้อมูล ANOVA.....	129
6.33 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	129
6.34 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย ของการหดตัวขึ้นงานฉีดพลาสติก .....	130
6.35 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G.....	131
6.36 ข้อมูล ANOVA.....	132
6.37 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression).....	133
6.38 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย ของการบิดงอขึ้นงานฉีดพลาสติก.....	134
6.39 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G.....	134

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พันธกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งขององค์กร คือการจัดการด้านคุณภาพและผลผลิตภาพ ซึ่งใน 2 ด้านนี้ คุณภาพเป็นตัวแปรต้นที่ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตภาพ คุณภาพจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันขององค์กรทั้งระยะสั้น ระยะกลางและระยะยาว โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับคุณภาพ คือ ความผันแปร (Variation) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอนแต่อาจสามารถคาดเดาควบคุมได้หรือแม้กระทั่งจำกัดได้ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะดำเนินการด้วยเทคนิคใดก็ตาม จำเป็นต้องมีเครื่องมือทางสถิติที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ และเนื่องจากเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น [1] ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิต โดยการออกแบบการทดลองจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening หรือ Process Characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) โดยส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability) สมรรถนะ (Performance) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ต้นทุน (Cost) และระยะเวลาในการพัฒนา (Development Time) ของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้เราสามารถที่จะพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น โดยทั่วไปจะใช้แบบแฟคทอเรียล (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป :  $2^k$  Full Factorial Design)

สำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลนั้น ( $2^k$  Full Factorial Design) ยังมีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design) ซึ่งใช้เมื่อจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษามีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจมีปัจจัยมากมายที่อยู่ในความสนใจ เพื่อทำการค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นการออกแบบที่มีการใช้งานแพร่หลายอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกเทคนิคที่ถูกเรียกว่า หลักการค้นหาตัวแปร (Variable Search Method) ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในวิธีการออกแบบการทดลองของไชนิน (Shainin DOE) วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย ไคเรียน ไชนิน (Dorian Shainin) ชาวอเมริกา ผู้ซึ่งเป็นที่ปรึกษาของบริษัทชั้นนำต่างๆมากกว่า 800 แห่ง เทคนิคนี้ถือว่าเป็นเทคนิคในการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างง่าย ๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง และทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเข้าถึงปัญหาได้ดี โดยเทคนิคของไชนินถือเป็นกลุ่มวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องพึ่งหลักการทางสถิติที่ซับซ้อนมากนัก และเป็นวิธีการที่มีกระบวนการการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอน รวมทั้งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมต่างๆได้เป็นอย่างดี [2]

นอกจากนี้วิธีการอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในเชิงปฏิบัติ คือ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทาคุชิ โดยดร.เก็นนิชิ ทาคุชิ (วิศวกรชาวญี่ปุ่น) ได้คิดค้นและใช้ในปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเขาให้ความสำคัญในการทำให้ได้กระบวนการผลิตที่ดีที่สุด ที่เกิดขึ้นเมื่อการผลิตและผลการปฏิบัติงานมีความผันแปรน้อยที่สุด และเป็นการลดความสูญเสีย ที่เกิดจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย โดยการตรวจสอบจากผลรวมของความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆผันแปรไปจากคุณภาพของเป้าหมาย และหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตนั้นเป็นอย่างไร รวมไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อม และปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือการควบคุม [3] โดยสำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างกรณีศึกษา และทำการวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการออกแบบการทดลองของไชนิน และวิธีการของทาคุชิ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและแสดงแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการของทาคุชิและไชนิน โดยอาศัยกรณีศึกษา

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองของวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

## 1.3 ระเบียบการวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 อาศัย 3 กรณีศึกษา คือ เฮลิคอปเตอร์กระดาศ กระบวนการย่ำหมุดลูมิเนียม และกระบวนการฉีดพลาสติกโดยใช้โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก ซึ่งทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

1.3.3 วิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองของวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยอาศัย 3 กรณีศึกษา

1.3.4 นำแนวทางในวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ และวิธีการของไชนินไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาถึงทฤษฎีของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการของไชนิน และวิธีการของทาคุชิ ทำการวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองของวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษา

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการนำวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ และวิธีการของไชนินไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

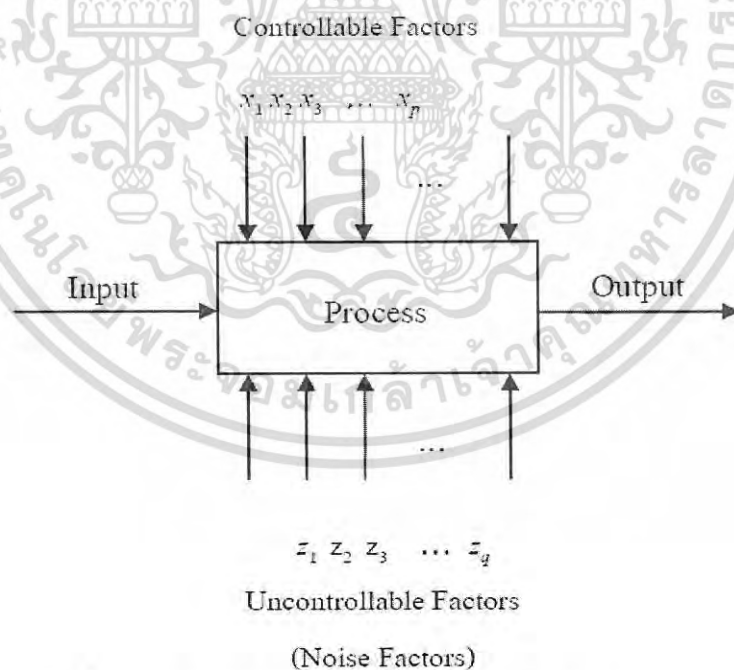
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่อง การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ และวิธีการของไซนิน ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้ารวบรวมแนวคิด ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษา ดังปรากฏในรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.1 การออกแบบการทดลอง

Montgomery [1] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วัตถุประสงค์ของการทดลองคือเพื่อศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต [1]

จากรูปที่ 2.1 กระบวนการ คือการนำทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลอง ได้แก่ วัตถุดิบ เครื่องจักร คนและกรรมวิธีการทำงาน ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตที่เอ็กได้ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมให้ได้ในระดับที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตหรือการบริการหนึ่งๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้เป็นสิ่งที่มียุทธวิธีต่อผลผลิต ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพและผลผลิตของผลิตภัณฑ์และบริการ แต่ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือยากต่อการควบคุมยังมีผลรบกวนต่อระบบการทดลองซึ่งเป็นผลให้ได้ผลผลิตออกมามีความคลาดเคลื่อน โดยมีผู้ให้นิยามและความหมายของการออกแบบการทดลองไว้ ดังนี้

Bhote [4] กล่าวไว้ว่า การออกแบบการทดลองเป็นทางที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาเรื้อรังทางด้านคุณภาพและลดความแปรปรวนซึ่งการออกแบบการทดลองนั้นแบ่งออกเป็น 3 หลักการ คือ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของไชนิน

### 2.1.1 วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบการทดลอง

- 1) หาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติ ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์มากที่สุด
- 2) หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
- 3) หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด
- 4) หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

### 2.1.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบ มี 3 หลักการ คือ

- 1) การสุ่ม ในการทดลองทุกรูปแบบต้องทำการสุ่มลำดับการทดลอง เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าการดำเนินการใด ๆ กับปัจจัยจะต้องอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะส่งผลให้ลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้
- 2) การทำซ้ำ หมายถึง การดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างที่สำคัญ คือ เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการ และเพื่อกำจัดทั้งความคลาดเคลื่อน (Average out) อิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัย เปรียบดังเช่นการหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง เป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง
- 3) การบล็อก เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำของการทดลอง หรือเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

- 1) กำหนดหัวข้อปัญหา จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ เพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลองได้อย่างชัดเจน
- 2) การเลือกตัวแปรตอบสนอง จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ เช่น การนับ โดยจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษานั้นได้ดี
- 3) การเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัย จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ เช่น T-Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัย
- 4) การเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีมากมายหลายรูปแบบล้วนแต่มีรูปแบบเฉพาะ และมีความเหมาะสมกับการทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่าง จำนวนการทดลองซ้ำและการบล็อก
- 5) ดำเนินการทดลอง ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง โดยติดตามการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง
- 6) การวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลรวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่
- 7) สรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ตั้งกระบวนการคราวต่อไป [1]

#### 2.1.3.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองโดยทั่วไป

การทดลองที่ได้รับการออกแบบ โดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน การคัดเลือก (Screening หรือ Process Characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองจะประกอบด้วย การสร้าง (Creating) การวิเคราะห์ (Analyzing) และการพล็อตผลการทดลอง [5]

##### 1) การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทำการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากรอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง เงินทุน และเรื่องกรรมวิธีการผลิต ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบสมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมา

เท่ากับอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆ ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้น ยังสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งใช้ไปนั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้าการเตรียมการทดลอง ขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาที่กำลังเจอ และนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องดำเนินการ ดังนี้

1.1) กำหนดปัญหา ขั้นตอนนี้คือการกำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ

1.2) กำหนดวัตถุประสงค์ ขั้นตอนนี้คือกำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และสาระข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง

1.3) การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆที่มีความเกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต ตัวอย่างเช่น ต้องการหาว่าปัจจัยใดหรือเงื่อนไขของกระบวนการแบบใดที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความแปรปรวนของกระบวนการ หรือทำการหาเงื่อนไขของกระบวนการที่ดีที่สุด

1.4) กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจจะไม่ได้ประโยชน์มากนัก

## 2) การคัดเลือก

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง วิธีดังกล่าวต่อไปนี้จะใช้ในการคัดเลือก

2.1) Two-Level Full และ Fractional Factorial ซึ่งวงการอุตสาหกรรมมีการใช้กันแพร่หลาย

2.2) Plackett-Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองเพื่อการคัดเลือกและการทดสอบเรื่อง Robustness ซึ่งใช้กันโดยทั่วไป

2.3) General Full Factorial (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อาจจะมีประโยชน์บ้างในการทำการทดลอง เพื่อการคัดเลือกขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การหาค่าที่ดีที่สุด

หลังจากที่มีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อย (Vital-Few) จะต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไรขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย ตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์ คือ การหาค่า Yield ของกระบวนการที่มีค่ามากที่สุด และมีค่าความแปรปรวนของกระบวนการน้อยที่สุด

3.1) ในหัวข้อภาพรวม Factorial Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ที่ตัวแบบของ Two-level Factorial, Plackett-Burman และ General Full Factorial

3.2) ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ที่ตัวแบบของ Central Composite Design และ Box-Behnken Design

3.3) ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในกรณีที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Responses) Minitab มีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ที่ไว้เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมๆกัน

### 4) การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่จริงจังๆ หรือไม่ ตัวอย่างเช่น คุณทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามค่าที่หามาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยค่าตอบสนอง

## 2.2 การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล $2^k$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลโดยส่วนใหญ่ใช้ในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย กรณีที่มีปัจจัย  $k$  ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  (Full Factorial Designs at Two levels) โดย  $k$  = จำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาและ 2 คือ ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง และระดับของปัจจัยจะกำหนดเป็นระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) ของแต่ละปัจจัย การทดลองรูปแบบนี้เป็นการทดลองที่สามารถศึกษาผลของปัจจัยทุกตัวที่เปลี่ยนแปลงระดับของทุกปัจจัยพร้อมๆกัน ดังนั้นหากสนใจศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลองทั้งสิ้น 4 การทดลอง ( $2^2$ ,  $k=2$ ) เงื่อนไขการทดลอง แสดงได้ดังนี้ [1]

เงื่อนไขการทดลอง	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

โดย - แทน เงื่อนไขของปัจจัยที่ระดับต่ำ  
 + แทน เงื่อนไขของปัจจัยที่ระดับสูง

ถ้าจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาในการทดลองเพิ่มขึ้น จำนวนเงื่อนไขการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ( $2^k$ )

การกำหนดระดับของปัจจัยมีผลมากต่อผลการวิเคราะห์ และผลสรุปการกำหนดระดับของปัจจัย โดยพิจารณาระดับปกติหรือค่ากลางของแต่ละปัจจัย ซึ่งระดับปกติหรือค่ากลางได้มาจากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญ และการวิจัยค้นคว้า หลังจากกำหนดค่ากลางแล้วจะทำการเพิ่มและลดระดับของปัจจัยจากค่ากลาง เพื่อหาช่วงของปัจจัยที่เป็นไปได้หรือสามารถทำการทดลองได้

### 2.3 การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล $2^{k-p}$

การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลใช้เมื่อจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษามีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจมีปัจจัยมากมายที่อยู่ในความสนใจ เพื่อทำการค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{k-p}$  เป็นการออกแบบที่ประกอบด้วย  $2^{k-p}$  การทดลอง ซึ่งเป็นจำนวน  $1/2^p$  เท่าของ  $2^k$  การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ปัจจัย ได้อย่างครบครณ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเป็นการออกแบบที่มีการใช้งานแพร่หลายอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ นอกจากนั้นแล้วยังช่วยในการหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การออกแบบการทดลองของไชนิน

การออกแบบการทดลองของไชนินถูกพัฒนาขึ้นมาโดย โดเรียน ไชนิน (Dorian Shainin) วิศวกรชาวอเมริกา ซึ่งมีเป้าหมายในการพยายามลดความซับซ้อนและจำนวนครั้งของการทดลองโดยอาศัยหลัก “Rule of Thumb” และเป็นที่ได้รับความยอมรับมากพอสมควรในอุตสาหกรรมการผลิต มีการนำไปประยุกต์ใช้ในบริษัทใหญ่มากมาย เช่น Motorola , GM , Ford ฯลฯ อีกทั้งประกอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน 13 เครื่องมือ

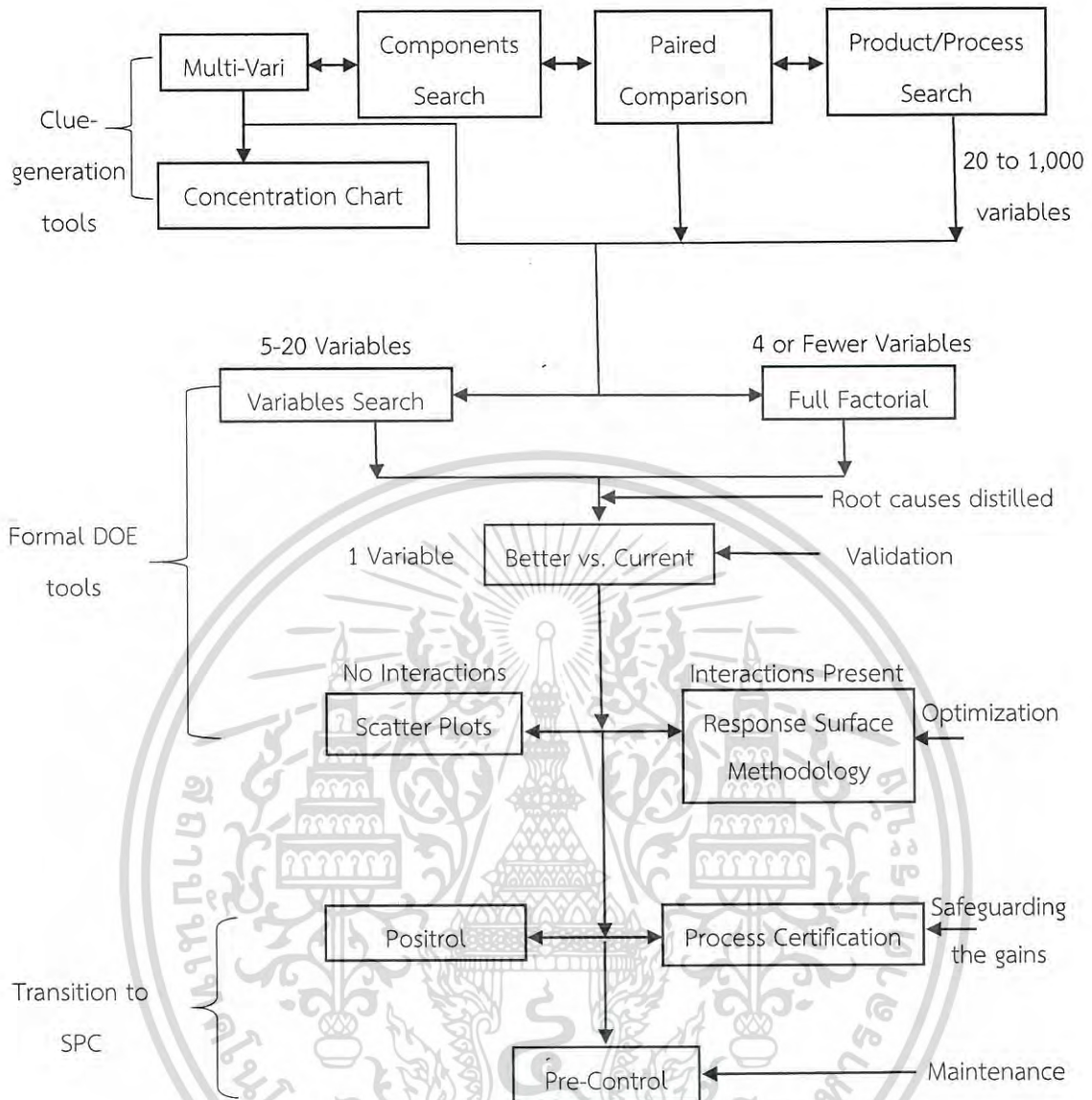
ทั้งนี้หลักการออกแบบการทดลองของไชนิน จะมีคำศัพท์ที่เรียกตัวแปรที่มีผลกระทบทางด้านคุณภาพที่แตกต่างจากคำศัพท์ของการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐานแพคทอเรียลโดยมีผู้ที่ให้นิยามและความหมายของคำศัพท์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของไชนินไว้ดังนี้

Thomas and Antony [6] กล่าวไว้ว่า Red X หมายถึง ตัวแปรหลักอันดับ 1 ที่ส่งผลกระทบกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม Pink X หมายถึง ตัวแปรอันดับ 2 ที่ส่งผลกระทบกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม Pale Pink X หมายถึง ตัวแปรอันดับ 3 ที่ส่งผลกระทบกับความแข็งแรงของรอยเชื่อม

โดเรียน ไชนิน (Dorian Shainin) กล่าวไว้ว่า Red X หมายถึงตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุด Pink X หมายถึงตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับที่ 2 Pale Pink X หมายถึง ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับ 3

จากนิยามข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า Red X หมายถึง ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุด Pink X หมายถึง ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับที่ 2 Pale Pink X หมายถึง ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับ 3 ตามลำดับ

โดยวิธีการของไชนิน ประกอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน 13 เครื่องมือ ในการช่วยลดความแปรปรวนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการลดความแปรปรวนด้วยเทคนิคของไซนิน [5]

#### 2.4.1 วัตถุประสงค์ของเครื่องมือทั้ง 13 เครื่องมือ

##### 1) เครื่องมือการวิเคราะห์หลายปัจจัย (Multi-Vari)

วัตถุประสงค์ เพื่อลดจำนวนตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่รู้ค่า โดยแบ่งกลุ่มตัวแปรหรือปัจจัยเป็นกลุ่มย่อย และกำหนดให้กลุ่มตัวแปรหรือตัวแปรที่สำคัญที่สุดเป็น Red X เทคนิคนี้อาศัยการเขียนกราฟเพื่อจำแนกหาสาเหตุหลักที่มีผลต่อลักษณะคุณภาพ (Green Y) ที่ต้องการควบคุม

##### 2) เครื่องมือการค้นหาชิ้นส่วน (Components Search)

วัตถุประสงค์ เพื่อค้นหาว่าชิ้นส่วนใดมีผลต่อคุณภาพของสินค้าโดยการเอาชิ้นส่วนมาแบ่งแล้วประกอบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) เครื่องมือการเปรียบเทียบเป็นคู่ (Paired Comparisons)

วัตถุประสงค์ เพื่อใช้เปรียบเทียบสินค้าที่ติดกับเลวหรือดีกับเสีย เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสินค้านั้น โดยใช้ในกรณีที่สินค้าไม่สามารถถอดประกอบหรือแยกเป็นชิ้นส่วนได้

### 4) เครื่องมือของการคัดแยกตัวแปร (Product/Process Search)

วัตถุประสงค์ เพื่อแยก Process parameters สำคัญออกจาก Process parameters ที่ไม่สำคัญ

### 5) เครื่องมือแผนภาพความสนใจ (Concentration Chart)

วัตถุประสงค์ เพื่อให้เห็นภาพรวมว่าปัญหาที่เกิดขึ้นซ้ำๆ นั้นแท้จริงแล้วเกิดขึ้นจากสาเหตุใด และควรแก้ไขที่จุดใด

### 6) เครื่องมือหลักการค้นหาตัวแปร (Variables Search)

วัตถุประสงค์ของหลักการค้นหาตัวแปร 7 ข้อ ดังนี้

- 6.1) เพื่อลดจำนวนสาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพสินค้า
- 6.2) เพื่อแยกปัจจัยที่สำคัญออกจากที่ไม่สำคัญ
- 6.3) เพื่อขยายค่าความเผื่อ (Tolerance) ของปัจจัยที่ไม่สำคัญ
- 6.4) เพื่อกำหนดขนาดหรือมิติและทิศทางของปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อคุณภาพ

สินค้า

- 6.5) เพื่อการป้องกันปัญหาการผลิตด้วยการออกแบบที่ดี
- 6.6) เพื่อการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ แม้ในกรณีที่ไม่สามารถรู้สมการทาง

คณิตศาสตร์

6.7) เพื่อลดค่าใช้จ่ายโดยการผ่อนคลายค่าความเผื่อและความเข้มงวดของปัจจัยที่ไม่สำคัญ ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เครื่องมือนี้เป็นเครื่องมือหลักในการดำเนินงาน

### 7) เครื่องมือการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล (Full Factorial Design)

วัตถุประสงค์ เพื่อหาความสำคัญของปัจจัยที่เลือกมา 2-4 ปัจจัยจากปัจจัยทั้งหมดว่าปัจจัยใดที่มีนัยสำคัญต่อคุณภาพสินค้าและปัจจัยใดที่ไม่มีนัยสำคัญ

### 8) เครื่องมือการเปรียบเทียบสิ่งที่ติดกว่ากับปัจจุบัน (B vs C)

วัตถุประสงค์ของการเปรียบเทียบสิ่งที่ติดกว่ากับปัจจุบัน

8.1) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการทวนสอบหรือยืนยันผลของปัจจัย (Verification Tools) มากกว่าที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาเบื้องต้น

8.2) เพื่อเป็นการตัดสินใจว่าผลิตภัณฑ์ชิ้นใด หรือกระบวนการใด ดีกว่ากันในด้านคุณภาพ โดยมีการกำหนดในเรื่องของคุณภาพและความเชื่อมั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9) เครื่องมือแผนผังการกระจาย (Scatter Plots)

วัตถุประสงค์ของแผนผังการกระจาย

9.1) เพื่อกำหนดข้อกำหนดเฉพาะและค่าเผื่อที่เป็นไปได้จริง (Realistic Specification and Realistic Tolerance)

9.2) เพื่อเข้มงวดกับค่าเผื่อสำหรับปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้ได้ค่า  $C_{pk}$  (Process Capability Index) ที่สูง

9.3) เพื่อผ่อนคลายกับค่าเผื่อสำหรับตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สำคัญ เพื่อลดต้นทุน

### 10) เครื่องมือเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

วัตถุประสงค์ เพื่อกำหนดระดับของตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อ GreenY เพื่อให้ได้ค่า GreenY สูงสุดหรือต่ำสุดหรือค่าที่ดีที่สุดนั่นเอง

11) เครื่องมือการรับรองกระบวนการให้คงที่ (Positrol Process Certification) และ เครื่องมือการรับรองผู้ปฏิบัติงาน (Operator Certification)

วัตถุประสงค์ เพื่อใช้สำหรับการควบคุมในเชิงบวกหรือเชิงระวังป้องกันของตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของความแปรปรวนในกระบวนการ โดยระบุถึง 5W1H ลงในเอกสารควบคุมอย่างชัดเจน

### 12) เครื่องมือการควบคุมกระบวนการ (Pre-Control Techniques)

วัตถุประสงค์ เพื่อหาสาเหตุของปัญหา เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำก่อนการผลิตจริง [5]

## 2.4.2 หลักการค้นหาตัวแปร

หลักการค้นหาตัวแปร (Variables Search Method) เป็น 1 ใน 13 ขั้นตอนของการลดความแปรปรวนด้วยวิธีการของไชนิน ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้จำนวนการทดลองที่น้อยครั้ง (สูงที่สุดประมาณ 26 ครั้งในกรณีที่มีตัวแปร 10 ตัวแปร) โดยวัตถุประสงค์ของหลักการค้นหาตัวแปร มีดังนี้ [2]

- 1) เพื่อลดจำนวนสาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพสินค้า
- 2) เพื่อแยกปัจจัยที่สำคัญออกจากที่ไม่สำคัญ
- 3) เพื่อขยายค่าความเผื่อ (Tolerance) ของปัจจัยที่ไม่สำคัญ
- 4) เพื่อกำหนดขนาดหรือมิติและทิศทางของปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อคุณภาพสินค้า
- 5) เพื่อการป้องกันปัญหาการผลิตด้วยการออกแบบที่ดี
- 6) เพื่อการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆแม้ในกรณีที่ไม่สามารถรู้สมการทางคณิตศาสตร์
- 7) เพื่อลดค่าใช้จ่ายโดยการผ่อนคลายค่าความเผื่อ และความเข้มงวดของปัจจัยที่ไม่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนและวัตถุประสงค์ของแต่ละขั้นตอนของหลักการค้นหาตัวแปร [5]

ขั้นตอน	วัตถุประสงค์
1. กำหนดตัวแปร (Ball Park)	กำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลอง
2. จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors)	- แยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญ - กำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไปรวมทั้ง interaction ที่เกิดจากตัวแปรนั้นออกไปด้วย
3. ยืนยันตัวแปร (Capping Run (Verification))	ยืนยันตัวแปรที่สำคัญและยืนยันความสำคัญของตัวแปรนั้น
4. การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis)	วิเคราะห์หาค่าของปัจจัยสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหา Main และ Interaction Effect

#### 2.4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร

- 1) กำหนดเลือก Green Y (ตัวแปรตอบสนอง) ที่ใช้ในการวัดคุณภาพ
- 2) วิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลคุณภาพสินค้า
- 3) กำหนดค่าให้ตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละปัจจัยเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) และค่าที่แย่มากที่สุด (Marginal Level; M)
- 4) กำหนดขนาดตัวอย่าง โดยทั่วไปกำหนดเพียง 2 ชั้น คือ เงื่อนไขของปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบที่ดีที่สุด (Best of Best; BOB) และเงื่อนไขของปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบที่แย่มากที่สุด (Worst of Worst; WOW) อย่างละชั้น
  - 5) ประเมินหาแนวโน้มอย่างคร่าวๆ โดยการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกที่ค่าที่ดีที่สุด ครั้งที่สองที่ค่าที่แย่มากที่สุดของทุกปัจจัย โดย
    - 5.1) ถ้ามีความแตกต่างของค่า Green Y อย่างมากระหว่างค่าที่ดีที่สุดและค่าที่แย่มากที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอย่างแท้จริง
    - 5.2) ถ้าค่าที่ดีที่สุดทุกค่าดีกว่าค่าที่แย่มากที่สุด แต่แตกต่างกันไม่มาก แสดงว่ายังมีปัจจัยที่ไม่ถูกเลือก ซึ่งมีผลต่อคุณภาพหรือค่า Green Y
    - 5.3) ถ้าค่าที่ดีที่สุดไม่ได้แสดงอย่างชัดเจนว่าดีกว่าค่าที่แย่มากที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ไม่มีผลต่อคุณภาพ
  - 6) ทำซ้ำแบบเดียวกับขั้นที่ 5 อีก 2 ครั้ง
  - 7) ทดสอบนัยสำคัญเพื่อพิสูจน์ว่า Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัว ดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่มากที่สุดทั้ง 3 ตัว การทดสอบนัยสำคัญทั้ง 2 จะต้อง
    - 7.1) Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัว ต้องดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่มากที่สุดทั้ง 3 ตัว
    - 7.2) อัตราส่วน  $D : d$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ถ้าการทดสอบนัยสำคัญตามขั้นที่ 7 ผ่าน ก็ถือว่าขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้น แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ถูกต้อง
- 9) ถ้าการทดสอบนัยสำคัญตามขั้นที่ 7 ไม่ผ่าน แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพยังไม่ถูกเลือก ให้กลับไปทำขั้นที่ 2 ใหม่

#### 2.4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย

- 1) ทำการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ แล้วคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจโดยใช้สูตร

$$\text{Median} \pm 2.776 \cdot \frac{\bar{d}}{1.81} \quad (2.1)$$

- 2) ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้
- 2.1) ถ้า  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ
- 2.2) ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ให้ผลตรงข้ามกันคือ  $A_M R_B$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ  $A_B R_M$  ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆตัดออกได้ทั้งหมด
- 2.3) ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าตกออกนอก Decision limits คือ  $A_M R_B$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_B R_M$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย
- 3) ถ้าผลลัพธ์ในขั้นที่ 2 เป็น (a) หรือ (c) ให้ทดลองต่อสำหรับปัจจัยที่เหลือคือ B, C, D,... และปัจจัยอื่นต่อไป
- 4) ถ้าผลลัพธ์ในขั้นที่ 2 เป็น (b) ให้หยุดการทดลอง แสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

#### 2.4.2.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร

- 1) ทดสอบยืนยันผลของตัวแปรและอันตรกิริยา โดยสลับค่าของปัจจัย เช่น  $A_B B R_M$  และ  $A_M B M R_B$  (ถ้ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปัจจัย)
- 2) ทดสอบยืนยันผลอันตรกิริยา 3 ตัวแปร (ถ้ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปัจจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร

ในกรณีที่ค่าอันตรกิริยาของปัจจัยหรือตัวแปรคู่ใดมีนัยสำคัญให้เขียนกราฟอิทธิพลร่วม เพื่อหาว่าอันตรกิริยาของปัจจัยคู่นั้นมีมากหรือไม่ เพื่อนำไปสู่การกำหนดค่าของปัจจัยที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุดต่อไป

#### 2.4.3 งานวิจัยของการประยุกต์ใช้โซนิน

Antony and Alfred Ho Yuen Cheng [7] งานวิจัยนี้กล่าวถึงวิธีการประยุกต์ใช้หลักการค้นหาตัวแปรของโซนินแต่ละขั้นตอนโดยมีตัวอย่างประกอบ ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปถึงหลักการค้นหาตัวแปรของโซนินว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพสินค้าจากจำนวนตัวแปรจำนวนมากในการทดลอง แต่หลักการค้นหาตัวแปรของโซนิน ยังมีข้อเสียในเรื่องของการวิเคราะห์ความผันแปรของกระบวนการ

Thomas and Antony [6] งานวิจัยนี้ยกตัวอย่างถึงวิธีการค้นหาตัวแปรของโซนิน ซึ่งใช้ในการบ่งชี้ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมความแข็งแรงของรอยเชื่อมของรวงผึ้งภายในบริษัทเครื่องบิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงถึงจุดเด่นของการใช้เทคนิควิธีการค้นหาตัวแปรของโซนินในการปรับปรุงความแข็งแรงของรอยเชื่อมของรวงผึ้งภายในบริษัทเครื่องบิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่มีความซับซ้อนที่สามารถบ่งชี้ตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของรวงผึ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Antony [8] งานวิจัยนี้เป็นการหาปัจจัยที่สำคัญโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปรของโซนิน โดยอาศัยกรณีศึกษาเฮลิคอปเตอร์กระดาศ จากการศึกษาทดลองจะมีตัวแปรทั้งหมด 6 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวของปีก ชนิดกระดาศ จำนวนคลิพหนีบกระดาศ รูปร่างของลำตัว ความยาวลำตัว และความกว้างลำตัว ซึ่งพบว่าความยาวของปีกเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุด จำนวนคลิพหนีบกระดาศเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับที่ 2 และรูปร่างของลำตัวเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดอันดับที่ 3 โดยสามารถสรุปได้ว่าวิธีการของโซนินใช้สำหรับหาปัจจัยที่สำคัญจากจำนวนหลายปัจจัย

### 2.5 การออกแบบการทดลองของทาคุชิ

ดร. เก็นนิชิ ทาคุชิ (วิศวกรชาวญี่ปุ่น) ได้คิดค้นและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเขาให้ความสำคัญในการทำให้ได้กระบวนการผลิตที่ดีที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อการผลิตและผลการปฏิบัติงานมีความผันแปรน้อยที่สุด โดยแนวความคิดในการปรับปรุงคุณภาพ มีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อ คือ

1) กระบวนการผลิต และชิ้นงานจะต้องถูกออกแบบไม่ให้อ่อนไหวต่อความผันแปรของสิ่งแวดล้อมภายนอก

2) วิธีการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่ช่วยให้ได้ตามวัตถุประสงค์

3) การที่ชิ้นงานได้ค่าตามเป้าหมายเป็นสิ่งสำคัญมากกว่าจะสนใจว่าจะอยู่ในสเปค

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทากูชิ [9] เป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวน (Noise Factors) ของกระบวนการ ซึ่งวิธีทากูชินั้น ถือเป็นฟังก์ชันความสูญเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง คือ การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทากูชิได้สรุปว่าการเบี่ยงเบนใดๆของกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ออกห่างจากค่าเป้าหมายจะก่อให้เกิดค่าความสูญเสียซึ่งวิธีการทากูชิเป็นการลดจำนวนการทดลอง โดยใช้ปัจจัยเป็นตัวกำหนดจำนวนการทดลองและทำการทดลองแต่ละปัจจัยเพียง 2 ระดับ เรียกว่า "การจัดเรียงลำดับการทดลองตามผลคูณของระดับที่ดีที่สุดของปัจจัย (Orthogonal Arrays)" องค์การและนักวิชาการส่วนใหญ่ยอมรับว่า วิธีการของทากูชิมีประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิต

### 2.5.1 ขั้นตอนการศึกษาการทดลองของทากูชิ

ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน [10] ดังนี้

- 1) การวางแผนการทดลอง (Planning Experiment) เป็นขั้นตอนกำหนดจุดประสงค์ที่ต้องการ รวมทั้งพิจารณาตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบ
- 2) การออกแบบการทดลอง (Designing Experiment) เป็นขั้นตอนของการกำหนดหรือเลือกตารางแนวฉาก (OA) ที่เหมาะสมกับระบบ รวมทั้งกำหนดตัวแปรและระดับของตัวแปร
- 3) การทดลอง (Conducting Experiment) เป็นขั้นตอนของการทำการทดลองตามสถานะของตัวแปรและระดับของตัวแปรที่กำหนดในตารางแนวฉาก (Orthogonal Array)
- 4) การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Analyzing Experiment) เป็นขั้นตอนของการพิจารณาผลของตัวแปรและระดับของตัวแปรว่าตัวแปรใดมีผลความสำคัญกับระบบ รวมทั้งหาสถานะที่เหมาะสมของระบบที่ทำให้ได้ผลสูงที่สุด
- 5) การทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming or Predicted) เป็นขั้นตอนของการพิสูจน์ว่าสถานะที่เหมาะสมต่อระบบที่หาได้นั้น มีความเหมาะสม และได้ผลตามที่ต้องการจริงหรือไม่ รวมทั้งใช้สถานะนั้นศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อระบบ

เริ่มที่การออกแบบแผนการทดลองแบบเมตริกซ์ (Design the Matrix Experiment) ซึ่งทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆปัจจัยพร้อมๆกัน คือ การกำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางแนวฉาก (Orthogonal Arrays) และกราฟเส้นตรง (Linear graph) เป็นเทคนิคที่มีความสำคัญในการออกแบบที่มีความทนทาน (Robust Design; RD)

ในการจัดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ออกแบบไว้ให้กับตารางแนวฉาก จะต้องจัดให้อยู่ในคอลัมน์ของตาราง (Array) เมื่อผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม (Control Factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (Control Factor Level) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกตารางแนวฉากที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ก่อนเริ่มการนำข้อมูลเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเลือกใช้ตารางแนวฉาก [11]

แผนการทดลอง	จำนวนแถว	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนคอลัมน์สูงสุดที่ระดับต่างๆ			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	1	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

เช่น สมมติว่าต้องการศึกษาเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ ผู้ออกแบบการทดลองได้เลือกระดับของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยไว้ 3 ระดับเท่ากันทุกปัจจัย ตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างนี้คือตารางแนวฉาก L9 ( $3^4$ ) จะมีการทดลองทั้งหมด 9 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตารางแผนการทดลอง L9 (3<sup>4</sup>) [12]

ลำดับการทดลอง	คอลัมน์			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ส่วนกราฟเส้นตรงใช้ในการกำหนดปัจจัยและปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยลงในคอลัมน์ของตารางแนวฉากโดยใช้กราฟ ตัวเลขที่อยู่ในกราฟจะเป็นปัจจัยหลักที่สนใจ ส่วนเส้นตรงที่ต่อจากจุดเชื่อมจะหมายถึง ปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัย

### 2.5.2 การควบคุมปัจจัยรบกวน

ในการทดลองใดๆ จะมีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเล็กน้อยต่อลักษณะทางคุณภาพ โดยปกติจะไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากขีดจำกัดทางกายภาพและความเข้าใจทางเทคโนโลยี [13]

ซึ่งปัจจัยรบกวนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1) สิ่งรบกวนภายนอก เกิดจากความผันแปรในสภาพแวดล้อมในการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน

2) สิ่งรบกวนภายใน เกิดจากความเสื่อมสภาพ เนื่องจากชิ้นงานถูกใช้งานเป็นเวลานาน

3) สิ่งรบกวนอยู่ภายในชิ้นงานแต่ละชิ้น เป็นความไม่สมบูรณ์ในระบบการผลิต

กระบวนการผลิตและชิ้นงานสามารถได้รับอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยรบกวน ซึ่งการออกแบบการทดลองใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและชิ้นงานที่ผลิตได้ โดยกำหนดค่าปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ไม่ให้ไวจากปัจจัยรบกวนทั้งหมด

### 2.5.3 ฟังก์ชันความสูญเสียและลักษณะของฟังก์ชันความสูญเสีย

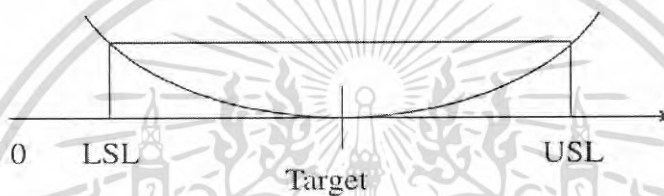
การออกแบบที่มีความทนทาน (Robust Design; RD) [3] คือ การประเมินความสูญเสียและผลกระทบต่างๆ เหล่านั้นและหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตรงตามเป้าหมาย รวมไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือการควบคุม

1) ความสูญเสียได้จำกัดไว้ 2 ประเภท คือ

1.1) ความสูญเสียเกิดจากค่าเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมาย

1.2) ความสูญเสียยังมีค่าน้อยลง ความต้องการในตัวผลิตภัณฑ์ก็จะมากขึ้น

Q (c)



รูปที่ 2.3 ลักษณะความสูญเสียของทาคุชิ [14]

2) ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความสูญเสียในรูปของสมการควอดราติกของทาคุชิ ได้แสดงดังนี้ โดยพิจารณาความสูญเสียเชิงปริมาณ ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง [15]

2.1) ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better) : กรณีลักษณะคุณภาพของฟังก์ชันความสูญเสียนี้ ยิ่งความสูญเสียมากผลลัพธ์ยิ่งดี เช่น ความแข็งแรงของรอยเชื่อม

$$L(y) = k \left( \frac{1}{y^2} \right) \quad (2.2)$$

2.2) ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) : กรณีลักษณะคุณภาพของฟังก์ชันความสูญเสียนี้ ยิ่งความสูญเสียน้อยผลลัพธ์ยิ่งดี เช่น การรั่วไหลในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มลพิษจากไอเสียรถยนต์

$$L(y) = ky^2 \quad (2.3)$$

2.3) ค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal is Best) : กรณีลักษณะคุณภาพของฟังก์ชันความสูญเสียนี้ ยิ่งเข้าใกล้ค่าเป้าหมายยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (2.4)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนด	$y$	คือ ค่าคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ได้จากการวัดอย่างต่อเนื่อง
	$m$	คือ ค่าคุณลักษณะตามเป้าหมาย
	$k$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความสูญเสีย
	$L(y)$	คือ ความสูญเสีย

#### 2.5.4 อัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

สำหรับการวิเคราะห์ ANOVA ผลการทดลองจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimize) โดยจะเลือกใช้รูปแบบใดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง [13]

1) ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better) : โดยค่า S/N มากที่สุดจะเท่ากับ ค่าความสูญเสียที่น้อยที่สุด

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{\sum \left( \frac{1}{y_i^2} \right)}{n} \quad (2.5)$$

2) ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) : โดยค่า S/N มากที่สุดจะเท่ากับ ค่าความสูญเสียที่น้อยที่สุด

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{\sum y_i^2}{n} \quad (2.6)$$

3) ค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal is Best) :

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{\bar{Y}^2}{s^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} y_i \quad (2.8)$$

$$s^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{i=1}^{N_i} (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2.9)$$

$\frac{S}{N}$  = อัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

$i$  = การทดลองที่ 1,2,...,i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 จำนวนการทดลอง  
 ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N_i$  = จำนวนการทดลองในแต่ละ Trial

$y_i$  = ผลของข้อมูลใน Trial

### 2.5.5 งานวิจัยของการประยุกต์ใช้ทาคุชิ

Khanna and Davim [16] ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยควบคุม เช่น ความเร็วในการตัด, อัตราการป้อน และโลหะผสมไทเทเนียมบนตัวแปรตอบสนอง เช่น แรงตัด แรงในการป้อน และอุณหภูมิของมีดกลึง โดยผู้วิจัยได้นำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทาคุชิมาประยุกต์ใช้ ซึ่งจำนวนการทดลองดำเนินการโดยใช้ตารางแนวฉาก L18 ในเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์จะถูกกำหนดค่าให้ทำหน้าที่เป็นเครื่องกลึงโลหะด้วยเครื่องมือที่มุ่งเน้นการผลิตการตัดเชิงตั้งฉาก ในเทคนิคมีการรวมการใช้ตารางแนวฉากและการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการตรวจสอบและผลกระทบของความเร็วในการตัด, อัตราการป้อน และเกรดที่แตกต่างกันของโลหะผสมไทเทเนียมของเครื่องป็น (Ti6Al4V, Ti54M และ Ti10.2.3) บนแรงทั้งสองและอุณหภูมิของมีดกลึง จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการป้อนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดที่ส่งผลต่อแรงตัดและแรงในการป้อน ขณะที่ความเร็วในการตัดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดในอุณหภูมิของมีดกลึง และหลังจากนั้นจะได้ปัจจัยควบคุมที่สภาวะเหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรตอบสนองขั้นต่ำสุด

Venkatesan et al. [17] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยใช้วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์กับฟังก์ชันเป้าหมาย ได้แก่ แรงเสียดทาน ( $f$ ) และค่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค ( $\eta$ ) ของใบพัดโค้ง ที่ใช้ในระบบการกลั่นน้ำทะเล โดยผู้วิจัยได้นำวิธีการของทาคุชิมาวิเคราะห์ควบคู่กับ CFD ตั้งแต่แรก เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับใบพัดโค้งเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งมีปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย และดำเนินการทดลองด้วยทาคุชิโดยใช้ตารางแนวฉาก L25 ค่าตอบสนองของฟังก์ชันเป้าหมายจะสามารถหาค่าทางสถิติได้โดยการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ช่วยในการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ  $f$  และ  $\eta$  ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงเส้นจะดำเนินการจากอัตราส่วน S/N โดย “ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี” จะใช้สำหรับแนวทาง  $f$  และ “ค่ายิ่งมากยิ่งดี” จะใช้สำหรับแนวทาง  $\eta$  จากการทดลองพบว่า ค่า R-square สำหรับความสัมพันธ์ของ  $f$  และ  $\eta$  จะได้ที่ 98% และ 87.9 ตามลำดับ และพบว่า “ระดับความโค้ง” และ “ความสูงของตะขอที่อยู่เหนือส่วนโค้ง” เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ

กิตติกร ฤทธิ์สิงห์ และเลอศักดิ์ สุมาลย์ [18] งานวิจัยนี้นำวิธีการของทาคุชิมาประยุกต์ในการปรับปรุงคุณภาพงานหล่อขึ้นรูปอลูมิเนียม บรอนซ์ ซึ่งในบริษัทโรงหล่อ ก.เจริญ จำกัด จะพบปัญหาจากผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งและเปราะที่ทำให้ยากต่อการแปรรูป เช่น งานกลึง งานหล่อ จึงมีการนำแนวคิดวิธีการของทาคุชิ (Taguchi's method) ที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพยายามทำให้กระบวนการสามารถดำเนินการได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการให้เกิดความแน่นอนมากขึ้น ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่ต้องมีการควบคุมตามเงื่อนไขและสภาวะต่างๆ ในการทดลองกำหนดปัจจัย 4 ตัว คือ อุณหภูมิเท เปอร์เซ็นต์นิกเกิล

เปอร์เซ็นต์อลูมิเนียม และเปอร์เซ็นต์สังกะสี โดยแบ่งปัจจัยเป็น 3 ระดับ ทำให้ได้แผนการทดลองแบบ  $L_9$  ( $3^4$ ) และทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ ค่า S/N-Ratios และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย โดยผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพมากที่สุด คือ อุณหภูมิเต รองลงมา คือ %อลูมิเนียม ซึ่งปัจจัยและเงื่อนไขที่ดีที่สุด คือ อุณหภูมิที่ 1350 °C นิเกิล 14 % อลูมิเนียม 12 % และสังกะสี 8 % ผลการทดสอบคุณสมบัติของนิเกิล-อลูมิเนียม บรอนซ์ดีขึ้นและลดจำนวนของเสียให้น้อยลงได้

อัษฎาวุธ หนูเกื้อ [19] งานวิจัยนี้เสนอถึงการปรับปรุงคุณภาพงานฉีดพลาสติกโดยวิธีการของ ทากูชิ ซึ่งมีจุดประสงค์ คือการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในของชิ้นส่วน Hub-C2 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักของเทปบันทึกข้อมูลแบบดิจิตอล (DDS: Digital Data Storage) ในกระบวนการการฉีดพลาสติกแบบหลายคาวิตี จำนวน 16 คาวิตี โดยใช้วิธีการ ออกแบบการทดลองแบบ ทากูชิ (Taguchi) และค้นหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตโดยใช้การ ออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken และใช้ทฤษฎีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการหาค่าที่ดีที่สุด การพิจารณาผลการทดลองจะประเมินจากดัชนีความสามารถ ของกระบวนการ (Process Capability Index) จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยเหล่านี้ คือ เวลาใน การหล่อเย็น แรงดันอัดย้า และเวลาในการอัดย้า ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน Hub-C2 เกือบทุกคาวิตี จากการนำสภาวะการทดลองที่เหมาะสมไปใช้พบว่าความสามารถของกระบวนการ ผลิตโดยเฉลี่ยทั้ง 16 คาวิตี เพิ่มขึ้นจาก 0.8 เป็น 1.85

อรอุมา หล้าแหล่ง [20] งานวิจัยนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไซโคลเด็กซ์ทริน โดยนำวิธีทากูชิมาใช้ในการออกแบบการทดลอง เริ่มจากการศึกษาส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ ใช้ในการผลิตเอนไซม์ไซโคลเด็กซ์ทรินไกลโคซิลทรานสเฟอเรส (Cyclodextrin glycosyltransferase, CGTase) โดยมีการแปรผัน 8 ปัจจัย แบบ  $L_{18}$  ( $2^4 \times 3^4$ ) Orthogonal Array เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตเอนไซม์ ได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 20 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเปปโติน 15 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้น  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  10 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้น  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  3 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 300 รอบ ต่อนาที ค่าความเป็นกรด-ด่าง 9.5 และเวลาในการเก็บเกี่ยวเอนไซม์ที่ 10 ชั่วโมง พบว่ามีอัตราการ ผลิตไซโคลเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0.97 หน่วยต่อมิลลิเมตรชั่วโมง และเอนไซม์ที่ผลิตได้มีค่า dextrinizing activity เท่ากับ 9.75 หน่วยต่อมิลลิตร และพบว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่า dextrinizing activity และอัตราการผลิตไซโคลเด็กซ์ทรินไกลโคซิลทรานสเฟอเรสอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นทำการออกแบบ การทดลองโดยวิธีทากูชิอีกครั้ง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไซโคลเด็กซ์ทริน ซึ่งมีการแปรผัน 4 ปัจจัย แบบ  $L_9$  Orthogonal Array เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไซโคลเด็กซ์ทริน ได้สภาวะที่ เหมาะสมดังนี้ ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเอนไซม์ 50 หน่วยต่อกรัม สับสเตรต เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 9 ชั่วโมง และอัตราการเขย่าที่ 300 รอบต่อนาที จากการทดลอง พบว่า มีค่าความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน 15.627 กรัมต่อลิตร ค่าผลได้ของไซโคลเด็กซ์ทริน 0.537 กรัมต่อกรัม และอัตราการผลิตไซโคลเด็กซ์ทริน 1.736 กรัมต่อลิตรชั่วโมง ซึ่งพบว่าถ้าใช้เวลานำไปใช้ ไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำปฏิกิริยาที่เวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ค่าอัตราการผลิตไซโคลเด็กซ์ทริน มีค่าสูงขึ้นเป็น 3.395 กรัมต่อชั่วโมง และพบว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นและอัตราการผลิตไซโคลเด็กซ์ทรินไกลโคซิลทรานสเฟอเรสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## 2.6 งานวิจัยของการเปรียบเทียบการออกแบบการทดลอง

De Mast [21] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากถึงกลยุทธ์ 3 อย่างในการปรับปรุงคุณภาพ คือวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน และซิกส์ซิกมา โดยการนำมาเปรียบเทียบถึงจุดอ่อนและจุดแข็งของทั้ง 3 กลยุทธ์ เพื่อทราบถึงประสิทธิผลและรายละเอียดในความแตกต่าง ผลจากการศึกษาและทำการวิเคราะห์พบว่า วิธีการของไชนินมุ่งเน้นไปที่หลักของการบ่งชี้ถึงรากเหง้าของปัญหา ส่วนวิธีการของทากูชิ และซิกส์ซิกมา นั้นจะนำเทคนิคของตัวแบบทางสถิติมาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยสามารถสรุปได้ว่า วิธีการของซิกส์ซิกมา นั้นเป็นกลยุทธ์ที่สมบูรณ์แบบที่สุดในทั้ง 3 กลยุทธ์

Verma et al. [22] เป็นการนำ 3 กรณีศึกษาจากแผนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ (Taguchi method) มาทำการกรองคัดแยกตัวแปร (Screening) ด้วยหลักการค้นหาตัวแปร (Variable Search) ของไชนิน โดยจากผลการคำนวณพบว่า 2 กรณีศึกษา : ตัวแปรที่นำมาทดลองไม่มีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง (Y) ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการทดลองต่อ และอีก 1 กรณีศึกษา : ผลจากการคำนวณพบว่าตัวแปรที่นำมาทดลองมีตัวแปรตัวหนึ่งที่มีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง (Y) ซึ่งผู้วิจัยสรุปผลได้ว่า หลักการค้นหาตัวแปรของไชนินสามารถช่วยในการกรองคัดแยกตัวแปรก่อนจะทำการทดลองจริง ซึ่งเป็นจุดเด่นที่เหนือกว่าการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม (Classical) และการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ที่ต้องทำการทดลองเต็มรูปแบบตั้งแต่เริ่มต้น ทำให้ต้องใช้จำนวนครั้งของการทดลองจำนวนมาก

Thomas and Antony [23] งานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองของทากูชิ และหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่ทำให้รอยเชื่อมของรวงผึ้งภายในบริษัทเครื่องบินมีความแข็งแรงมากที่สุด โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการของไชนินและทากูชิในมุมมองต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าวิธีการของไชนินสามารถดำเนินการทดลองได้ง่ายและมีความรวดเร็วกว่าวิธีการทากูชิในการหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของรวงผึ้งได้ และเมื่อพิจารณาความเที่ยงตรงในการหาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่าวิธีการของไชนินมีความเที่ยงตรงมากกว่าทากูชิ แต่ความเที่ยงตรงในการหาอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) พบว่าวิธีการของทากูชิมีความเที่ยงตรงมากกว่าวิธีการของไชนิน และมีต้นทุนในการทดลองน้อยกว่าวิธีการของไชนิน อีกทั้งวิธีการของไชนินจะมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าทากูชิ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าทากูชิ

Martin et al. [24] งานวิจัยนี้สรุปถึงหลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีมาตรฐาน วิธีทากูชิ และวิธีของไชนิน โดยผู้วิจัยแนะนำให้ใช้วิธีการของไชนินเพื่อเน้นความสำคัญของแผนการทดลองเชิงไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถิติ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถเรียนรู้ได้ง่ายและนำมาใช้ได้ ในระหว่างกระบวนการผลิต แม้ว่าจุดอ่อนของโซนินจะอยู่ที่ความง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ OFAT ที่ง่ายกว่า แต่คงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับวิธีการทำงานซึ่งต้องใช้หลักการทางสถิติขั้นสูง วิธีการแบบมาตรฐานและทากูชิจึงยังคงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือ มีความถูกต้องทางสถิติ และมีความเสถียรมากกว่าวิธีการของโซนิน สำหรับวิธีการทากูชิสิ่งที่สำคัญ คือ หลักการด้านคุณภาพและวิธีการทางวิศวกรรม ซึ่งรวมถึงความสูญเสียจากการทำงาน (Loss Function) และเป้าหมายเบื้องต้นในการออกแบบที่ทนทาน (Robust Design) โดยวิธีการทากูชิเป็นวิธีการเบื้องต้นที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของอุตสาหกรรม แต่ยังเป็นวิธีที่ไม่สมบูรณ์ในการรับประกันคุณภาพในทุกขั้นตอน โดยทั่วไปแล้วไม่แนะนำให้ใช้วิธีการทากูชิ ในกรณีที่ไม่ต้องเผชิญกับปัญหา 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ความคงทนและความอดทนต่อความแปรผันจากปัจจัยต่างๆในตัวสินค้าและกระบวนการ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ การนำวิธีการแบบมาตรฐานมาใช้อาจจะเหมาะสมกว่า ส่วนวิธีการใหม่ของโซนินและทากูชิมีเทคนิคที่ซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละอุตสาหกรรม แต่ทั้งสองวิธีก็ได้นำเสนอเทคนิคการทดลองที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันวิธีการแบบดั้งเดิมก็มีการพัฒนาด้านเทคนิค และแนวคิดวิศวกรรมแบบใหม่ เห็นได้จากการพัฒนาซอฟต์แวร์และเครื่องมือด้านกราฟฟิคที่สามารถใช้งานได้ง่ายกว่าโปรแกรมแบบเก่าในทศวรรษที่ 80 และได้เสนอการนำวิธีการต่างๆมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ในขั้นตอนเริ่มต้นจะใช้วิธีการของโซนิน เพื่อวิเคราะห์หาปัญหาที่อันตรายที่สุดก่อนตัดสินใจทำการทดลอง ต่อจากนั้นใช้วิธีการทากูชิเพื่อหาตัวแปรในการทดลองด้วยการบูรณาการหาความสูญเสียหน้าที่ด้านคุณภาพ (Quality Loss Function) และการให้ความสำคัญต่อการตรวจสอบกระบวนการควบคุมคุณภาพให้สามารถดำเนินการต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการใดๆอีก

Anand et al. [25] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การลดข้อบกพร่องของผู้ประกอบการรายย่อย (SMEs) ที่มีต่อซิกส์ซิกมา ที่ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง มีต้นทุนสูง และมีระบบการทำงานที่ค่อนข้างจะซับซ้อน โดยจะอธิบายทีละขั้นตอน เพื่อช่วยลดอุปสรรคในการทำงานด้านสถิติ รวมทั้งวิธีการทำงานที่ไม่คุ้นเคยของแต่ละบุคคล ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจใช้วิธีการของโซนินเป็นพิเศษ ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของโซนินมีจุดเด่นในเรื่อง เวลาที่ใช้ในการทดลองน้อย ต้นทุนต่ำ การฝึกสอนง่าย โดยง่ายกับการนำไปประยุกต์ใช้และวิธีการเก็บข้อมูลสามารถทำได้แบบออนไลน์ โดยไม่รบกวนต่อกระบวนการผลิตปกติ เนื่องจากได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในมุมมองต่างๆกับเทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีการของทากูชิแล้ว ดังนั้นการใช้วิธีการของโซนินจึงช่วยให้การทำงานของซิกส์ซิกมานั้นง่ายขึ้น และเหมาะกับธุรกิจ SMEs ในการควบคุมคุณภาพตามเป้าหมายของ ISO เช่น ระบบควบคุมคุณภาพและความต่อเนื่องในการปรับปรุงคุณภาพของสินค้าหรือบริการ การป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในทุกกระบวนการการผลิตตั้งแต่การออกแบบจนถึงการให้บริการ เป็นต้น

Zhang et al. [26] การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบแฟคทอเรียลได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาการพังทลายของดิน แต่ด้วยระยะเวลา ต้นทุนและแรงงานที่สูง และในบางครั้งต้องมีการไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความเป็นไปได้ในการดำเนินการเนื่องจากการเพิ่มจำนวนของปัจจัยและระดับของปัจจัย โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัด และเป็นเครื่องมือทางสถิติที่มีประสิทธิภาพซึ่งใช้เพียงบางส่วนของเงื่อนไขแฟคทอเรียลที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้ได้ผลการศึกษาศึกษาการพังทลายของดินด้วยการออกแบบการทดลองของทากูชิเป็นไปได้ยากและไม่มีมีการเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบแฟคทอเรียล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ชุดของปริมาณน้ำฝนด้วยการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบแฟคทอเรียล ได้แก่ 5 ระดับของความชื้นลาดยาว (0.4 , 0.8, 1.2, 1.5 และ 2 เมตร ) , 5 ระดับของการไล่เนินความชัน (18% , 27% , 36% , 48% และ 58%) และ 5 ระดับของปริมาณน้ำฝน (48, 62.4, 102, 149, 170 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) โดยการตรวจสอบความถูกต้องของการประยุกต์ใช้วิธีการทากูชิในการออกแบบการพังทลาย จะดำเนินการโดยการตั้งข้อมูลจากชุดข้อมูลเต็มรูปแบบตามทฤษฎีของทากูชิ ซึ่งจะทำการทดลองแบบตารางแนวฉาก L25 โดยผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับค่าเฉลี่ยการพังทลายและอัตราการไหลที่กึ่งกลางของแต่ละการทดลอง สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมของการพังทลายและอัตราการไหลสูงสุด และอิทธิพลหลักและเปอร์เซ็นต์ผลได้ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบและทากูชิที่นำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าทั้ง 2 วิธีการออกแบบให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งการใช้ข้อมูลจากการทดลองด้วยทากูชิ มีการทำนายการพังทลายและอัตราการไหลที่เป็นไปได้ อย่างถูกต้อง ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้ง 2 วิธี พบว่าวิธีการทากูชิสามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาศึกษาการพังทลายและสามารถใช้แทนที่การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบซึ่งช่วยในการประหยัดเวลา ต้นทุน และแรงงาน เนื่องจากการลดจำนวนของการทดลอง

อัณฐิมา เสน่หา [27] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงการออกแบบและวางแผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล โดยสามารถให้ตัวแบบที่เหมาะสมแทนตัวแบบการออกแบบและวางแผนการทดลองแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียล เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เวลา และทรัพยากร แต่ยังคงมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะทำการจำลองข้อมูลแบบสุ่มด้วยโปรแกรม T โดยทำการพิจารณาตัวแบบที่ตรงตามสมมติฐานเบื้องต้น ค่าเฉลี่ยของประชากรเท่ากับ 5 และมีความแปรปรวนเท่ากับ 10 จำนวนปัจจัยที่จะศึกษาเท่ากับ 3 4 และ 5 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และ 0.05 ระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ และระดับสูง แตกต่างกันเท่ากับ 5 ซึ่งทำการทดลอง 18 กรณี มีการทำซ้ำกรณีละ 20 ครั้ง ทำการทดลองการวางแผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการวางแผนการทดลองแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียลควบคู่กันทั้งหมด 720 สถานการณ์ โดยนำผลจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน พบว่าการวางแผนการทดลองแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียลให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยกว่าทุกสถานการณ์ เมื่อจำนวนปัจจัยและจำนวนซ้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละช่วงประสิทธิภาพวางแผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลมีช่วงแคบลงและมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสูงขึ้น ไม่แตกต่างจากการวางแผนการทดลองแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียลที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยศวัจน์ ศิริกมลชัย [5] งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการของไชนินและทำการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูป (Full Factorial) แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ โดยอาศัย 3 กรณีศึกษา ซึ่งพบว่าวิธีการของไชนินมีข้อดีที่เห็นได้ชัด คือ ใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลมาก ซึ่งสำหรับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแล้วยังมีจำนวนตัวแปรมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองยังมีความแตกต่างกับวิธีการของไชนินมากขึ้นด้วย และทำให้ต้นทุนจากการทำการทดลองสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนวิธีการของไชนิน มีความยุ่งยากซับซ้อนทางการคำนวณสถิติน้อยเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินยังมีข้อเสียคือ ไม่สามารถคำนวณหาสมการถดถอยได้

## 2.7 บทสรุปจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง จะเห็นได้ว่าเทคนิคการออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหรือระบบนั้น ซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้สามารถพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล  $2^k$  และเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{k-p}$

หลักการค้นหาตัวแปร ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของไชนิน เป็นเทคนิคในการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างง่าย แต่ให้ประสิทธิภาพสูง และทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเข้าถึงปัญหาได้ดี โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งหลักการทางสถิติที่ซับซ้อนมากนัก และเป็นวิธีการที่มีกระบวนการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอน ซึ่งจากการสำรวจวรรณกรรมพบว่านำมาใช้สำหรับการทดลองที่มีจำนวนตัวแปรจำนวนมาก มีระยะเวลาในการทดลองที่น้อย และมีงบประมาณในการทดลองที่ต่ำ

สำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ เป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวนของกระบวนการ ซึ่งวิธีทากูชิเป็นฟังก์ชันความสูญเสีย เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม คือ การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด โดยจากการสำรวจวรรณกรรมพบว่านำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความคงทน และความอดทนต่อความแปรผันจากปัจจัยต่างๆในกระบวนการโดยอาศัยวิธีการทางสถิติ

หากนำแต่ละวิธีการมาวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลอง จะพบว่าวิธีการของไชนินมีข้อดีที่เห็นได้ชัด คือ ใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าการออกแบบการแบบแฟคทอเรียล ต้นทุนต่ำ สามารถดำเนินการปฏิบัติได้ง่าย มีความซับซ้อนที่น้อยกว่าวิธีทากูชิ การออกแบบการทดลองแบบ

เศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าทฤษฎี แต่อาจไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากเกินไป และมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากไม่มีวิธีการทางสถิติมาเกี่ยวข้อง ส่วนวิธีการทฤษฎีเป็นวิธีการเบื้องต้นที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของอุตสาหกรรม เพื่อลดความแปรปรวน ลดความสูญเสียของคุณภาพในกระบวนการ แต่ยังเป็นวิธีที่ไม่สมบูรณ์แบบในการรับประกันคุณภาพในทุกขั้นตอน

ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการศึกษาทั้ง 4 วิธีการ โดยอาศัยกรณีศึกษาและทำการวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการของไซนิน และวิธีการทฤษฎี เพื่อเป็นแนวทางในการนำวิธีการออกแบบการทดลองของทฤษฎี และวิธีการของไซนินไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า

ในการวิจัยเรื่อง การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทาภูชิ และวิธีการของ ไชนิน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีการของทาภูชิและวิธีการของไชนิน โดยอาศัย 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม เฮลิคอปเตอร์กระดาศ และกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 กรณีศึกษา

##### 3.1.1 กรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ใช้เป็นฐานข้อมูลที่พัฒนาจากงานวิจัยของสมชาย ม้วนโคกสูง [28] คือ กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม โดยวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม

1) ตัวแปรควบคุม 5 ตัวแปร คือ

A คือ ขนาดแรงกด (Compression Force)

B คือ ขนาดรูเจาะ (Hole Size)

C คือ ความหนาของงาน (Thickness of work)

D คือ ความยาวหมุดย้า (Length of Aluminum Riveting)

E คือ เวลาในการกดแช่ (Hold Time)

2) ตัวแปรตอบสนอง คือ แรงเฉือนของหมุดย้าอลูมิเนียม

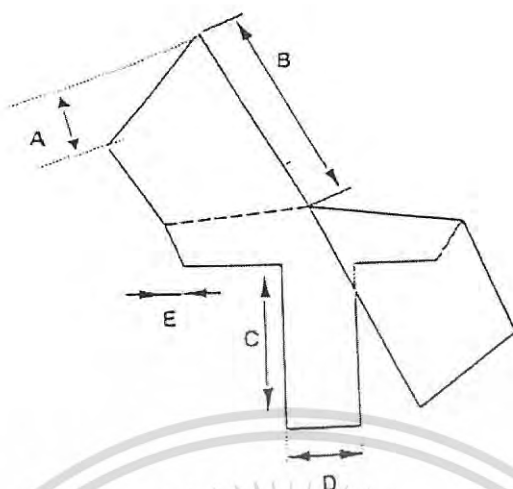
##### 3.1.2 กรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาที่ใช้ คือ เฮลิคอปเตอร์กระดาศ

เป็นกรณีศึกษาพื้นฐาน ที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โดยทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยผู้วิจัยเอง ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศ

1) ตัวแปรควบคุม 5 ตัวแปร แสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวแปรควบคุมของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ

A คือ ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)

B คือ ความยาวของปีก (Wing Length)

C คือ ความยาวของลำตัว (Body Length)

D คือ ความกว้างของลำตัว (Body Width)

E คือ ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)

2) ตัวแปรตอบสนอง คือ ระยะเวลาในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ ที่ระยะทาง 2 เมตร ในแนวดิ่ง

### 3.1.3 กรณีศึกษาที่ 3

กรณีศึกษาที่ใช้ คือ กระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก ซึ่งกรณีศึกษานี้ เป็นปัญหาที่สามารถพบได้ในอุตสาหกรรม และทดลองกับจำนวนตัวแปรที่มากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุด

1) ตัวแปรที่ควบคุมได้ 7 ตัวแปร และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร คือ

1.1) ตัวแปรที่ควบคุมได้ 7 ตัวแปร

A คือ เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)

B คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)

C คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

D คือ แรงอัดฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure profile value)

E คือ เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)

F คือ แรงอัดฉีดย้ำสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G คือ เวลาในการเย็นตัวของแม่พิมพ์ (Cooling time)

1.2) ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร

H คือ อุณหภูมิห้อง (Air temperature)

I คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Eject temperature)

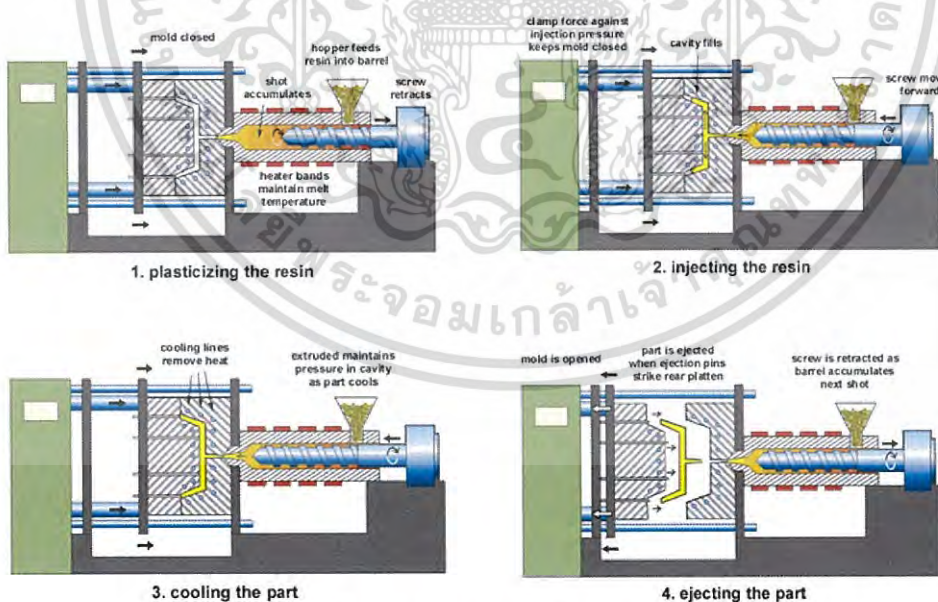
2) ตัวแปรตอบสนอง คือ

2.1) การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage)

2.2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement)

### 3.1.3.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก

โดยทั่วไปแม่พิมพ์ฉีดจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องฉีด โดย 2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ ถูกทำการขึ้นรูปโพรงแบบตามชิ้นงานที่ทำการฉีด [29] ในการฉีดจะประกอบด้วยเครื่องมือและเครื่องจักรที่สำคัญ คือ แม่พิมพ์และเครื่องฉีดพลาสติก เม็ดพลาสติกจะถูกป้อนเข้าไปในกรวย สกรูส่งหรือก้านส่งจะพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกส่งไปยังแม่พิมพ์ โดยผ่านตัวทำความร้อน ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดและพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกส่งไปยังแม่พิมพ์โดยผ่านตัวทำความร้อน ที่ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นและปลดออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก [29]

จากรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติกได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เป็นช่วงกระบวนการหลอมเหลวพลาสติกโดยสกรูจะหมุนและถอยหลัง เพื่อให้ได้ปริมาตรในการฉีดขึ้นงานตามที่กำหนดไว้

2) เป็นช่วงกระบวนการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ และทำการฉีดย้ำเพื่อรักษาความดัน โดยการรักษาความดันนี้เพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติก

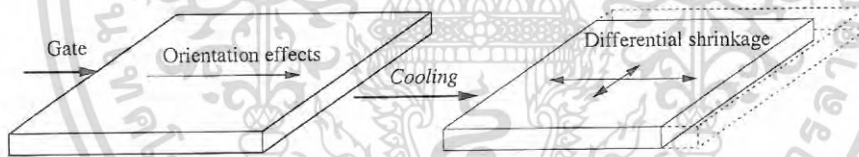
3) เป็นช่วงกระบวนการหล่อเย็นขึ้นงานฉีดจนกระทั่งขึ้นงานฉีดมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิลดขึ้นงาน

4) เป็นช่วงกระบวนการปลดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์

โดยภายหลังจากที่พลาสติกถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พร้อมกับการอัดตัวของความดันในโพรงแบบ นั่นคือผลกระทบหลักของการหดตัวและบิดงอของพลาสติก

พฤติกรรมหดตัวของขึ้นงานฉีดพลาสติกพิจารณาจากรูปที่ 3.3 และสามารถหาการหดตัวได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) ดังนั้นจึงหาร้อยละการหดตัวของขึ้นงานฉีดพลาสติกได้จาก

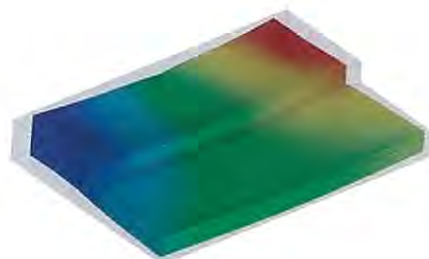
$$\text{ร้อยละการหดตัวของขึ้นงานฉีดพลาสติก (\%)} = \frac{\text{ขนาดของโพรงแบบ} - \text{ขนาดของขึ้นงานฉีด}}{\text{ขนาดของโพรงแบบ}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 พฤติกรรมหดตัวของขึ้นงานฉีดพลาสติก [30]

พฤติกรรมบิดงอของขึ้นงานฉีดพลาสติกพิจารณาจากรูปที่ 3.4 และสามารถหาการบิดงอได้ในหน่วยมิลลิเมตร (mm.) ดังนั้นจึงหาค่าการบิดงอของขึ้นงานฉีดพลาสติกได้จาก

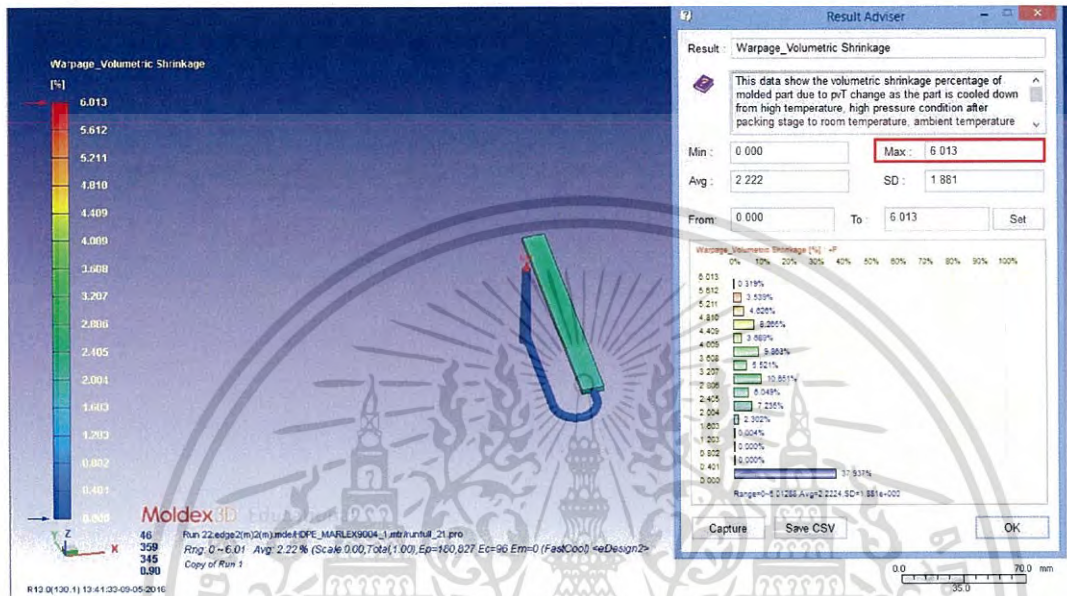
$$\text{ค่าการบิดงอของขึ้นงานฉีดพลาสติก (mm.)} = \text{ขนาดของโพรงแบบ} - \text{ขนาดของขึ้นงานฉีด} \quad (3.2)$$



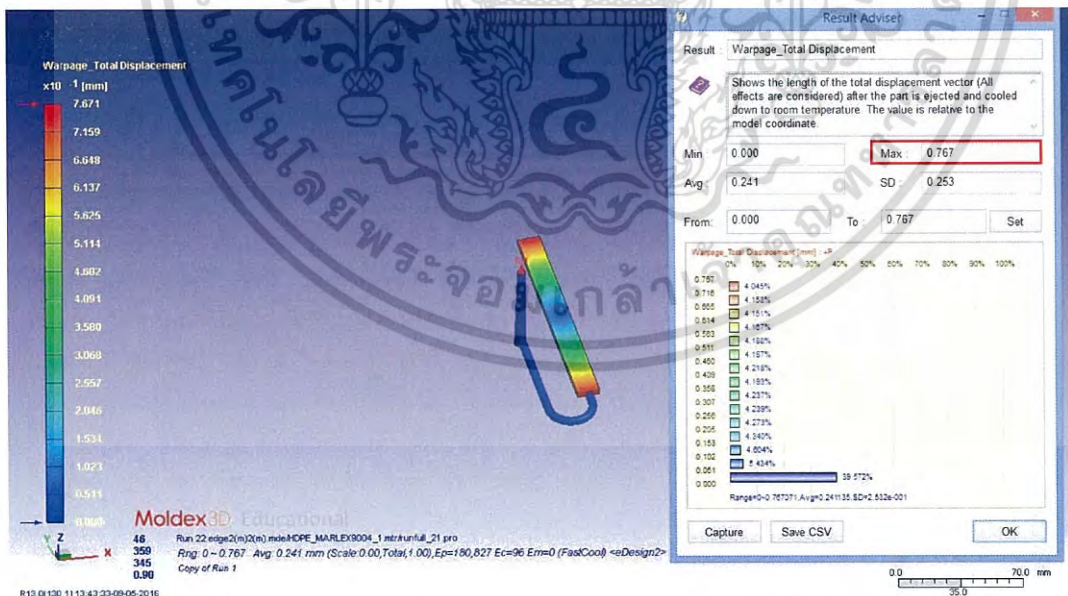
รูปที่ 3.4 พฤติกรรมบิดงอของขึ้นงานฉีดพลาสติก [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในการหาค่าที่ดีที่สุดในการออกแบบชิ้นงาน และค่าที่ดีที่สุดในการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (%) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก

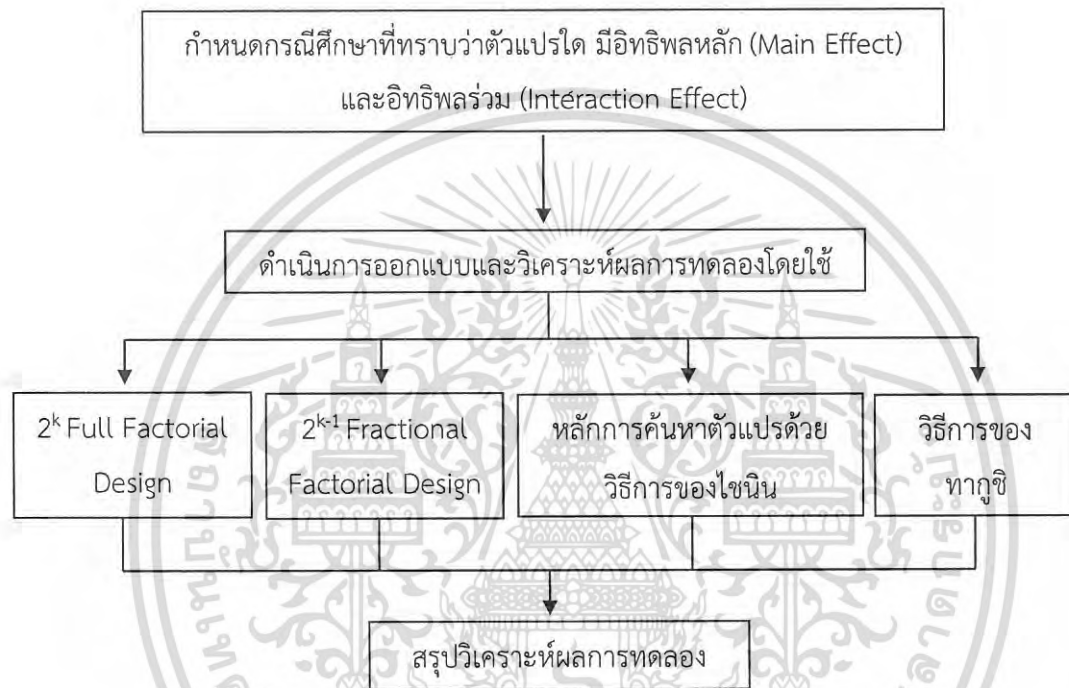


รูปที่ 3.6 ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (mm.) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการกำหนดกรณีศึกษา การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วยการทดลองแบบแฟคทอเรียลและเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการของไชนินและวิธีการของทาคุชิ โดยมีวิธีการในการดำเนินงานดังนี้

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อการวิจัย



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

โดยสามารถสรุปขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอนและอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

1) กำหนดกรณีศึกษาที่ทราบว่ามีตัวแปรใด มีอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect)

2) การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้

2.1)  $2^k$  Full Factorial Design

กรณีศึกษาที่ 1 : ดำเนินการทดลองแบบ  $2^5$  Full Factorial Design

กรณีศึกษาที่ 2 : ดำเนินการทดลองแบบ  $2^5$  Full Factorial Design

2.2)  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design

กรณีศึกษาที่ 1 : ดำเนินการทดลองแบบ  $2^{5-1}$  Fractional Factorial Design

กรณีศึกษาที่ 2 : ดำเนินการทดลองแบบ  $2^{5-1}$  Fractional Factorial Design

กรณีศึกษาที่ 3 : ดำเนินการทดลองแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial Design

ดำเนินการทดลองแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3) หลักการค้นหาตัวแปรด้วยวิธีการของไซนิน 4 ขั้นตอน

2.4) การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

กรณีศึกษาที่ 1 : ดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก L16 ( $2^5$ ) เลือกใช้ค่า  
ตอบสนองที่มีค่ามาก (Larger – the – better)

กรณีศึกษาที่ 2 : ดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก L16 ( $2^5$ ) เลือกใช้ค่า  
ตอบสนองที่ตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal – the – best)

กรณีศึกษาที่ 3 : ดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก L8 ( $2^7$ ) เลือกใช้ค่า  
ตอบสนองที่มีค่าน้อย (Smaller – the – better)

3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองแล้วนำผลที่ได้จากการทดลอง มาทำการวิเคราะห์ โดยแบ่งตาม  
กรณีศึกษา ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้อมดอกลูมิเนียม วิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบการ  
ทดลองของวิธีการของทากูชิ วิธีการของไซนิน การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเศษส่วนเชิง  
แฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล  
( $2^k$  Full Factorial Design)

กรณีศึกษาที่ 2 : เกล็ดคอปเตอร์กระดาษ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองของ  
วิธีการของทากูชิ วิธีการของไซนิน การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$   
Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล ( $2^k$  Full Factorial  
Design)

กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก  
วิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองของวิธีการของทากูชิ วิธีการของไซนิน และการ  
ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### (กรณีศึกษา : กระบวนการย้ำหมุดอลูมิเนียม)

ผลการดำเนินงานเรื่องการศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  : Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป ( $2^k$  : Full Factorial Design)

#### 4.1 กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้ำหมุดอลูมิเนียม

กรณีศึกษาที่ใช้เป็นฐานข้อมูลที่พัฒนาจากงานวิจัยของสมชาย ม้วนโคกสูง [28] คือ กระบวนการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม

ตัวแปรควบคุม 5 ตัวแปร คือ

- A คือ ขนาดแรงกด (Compression Force)
- B คือ ขนาดรูเจาะ (Hole Size)
- C คือ ความหนาของงาน (Thickness of work)
- D คือ ความยาวหมุดย้ำ (Length of Aluminum Riveting)
- E คือ เวลาในการกดแช่ (Hold Time)

ตัวแปรตอบสนอง คือ แรงเฉือนของหมุดย้ำอลูมิเนียม ( $N/mm^2$ )

หลังจากได้ทำการสร้างกรณีศึกษาการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการของไชนิน และวิธีการของทากูชิแล้ว ในกรณีศึกษานี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนการวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

- 1) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^k$  Full Factorial Design
- 2) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design
- 3) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของไชนิน
- 4) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล

#### 4.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^k$ Full Factorial Design

ตารางที่ 4.1 ระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. A ขนาดแรงกด (Compression Force)	ต่ำ	สูง	N
2. B ขนาดรูเจาะ (Hole Size)	เล็ก	ใหญ่	mm.
3. C ความหนาของงาน (Thickness of work)	บาง	หนา	mm.
4. D ความยาวหมุดย้ำ (Length of Aluminum Riveting)	สั้น	ยาว	mm.
5. E เวลาในการกดแช่ (Hold Time)	น้อย	มาก	sec.

การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^5$  Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง (Run) เท่ากับ 32 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง (Replicate) ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 160 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 4.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^5$

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5
1	-1	-1	-1	-1	-1	1160	1110	1210	1200	1120
2	1	-1	-1	-1	-1	1120	1220	1120	1210	1130
3	-1	1	-1	-1	-1	1400	1390	1360	1420	1440
4	1	1	-1	-1	-1	1370	1410	1430	1390	1460
5	-1	-1	1	-1	-1	1250	1170	1230	1180	1290
6	1	-1	1	-1	-1	1270	1200	1240	1190	1230
7	-1	1	1	-1	-1	1410	1320	1380	1310	1360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^5$ 

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5
8	1	1	1	-1	-1	1390	1380	1320	1300	1390
9	-1	-1	-1	1	-1	1200	1170	1130	1200	1190
10	1	-1	-1	1	-1	1130	1150	1210	1140	1120
11	-1	1	-1	1	-1	1400	1420	1370	1350	1380
12	1	1	-1	1	-1	1390	1360	1410	1450	1380
13	-1	-1	1	1	-1	1210	1220	1210	1190	1180
14	1	-1	1	1	-1	1230	1220	1190	1220	1160
15	-1	1	1	1	-1	1390	1400	1370	1340	1360
16	1	1	1	1	-1	1360	1340	1370	1390	1450
17	-1	-1	-1	-1	1	1200	1140	1120	1190	1150
18	1	-1	-1	-1	1	1190	1190	1130	1160	1100
19	-1	1	-1	-1	1	1380	1380	1420	1410	1350
20	1	1	-1	-1	1	1380	1430	1350	1330	1390
21	-1	-1	1	-1	1	1240	1210	1200	1170	1190
22	1	-1	1	-1	1	1210	1220	1220	1190	1180
23	-1	1	1	-1	1	1410	1370	1390	1370	1340
24	1	1	1	-1	1	1390	1330	1330	1430	1380
25	-1	-1	-1	1	1	1160	1190	1180	1160	1230
26	1	-1	-1	1	1	1190	1210	1130	1130	1170
27	-1	1	-1	1	1	1390	1420	1410	1330	1380
28	1	1	-1	1	1	1360	1430	1390	1410	1340
29	-1	-1	1	1	1	1240	1190	1150	1210	1200
30	1	-1	1	1	1	1160	1210	1190	1240	1200
31	-1	1	1	1	1	1390	1360	1370	1420	1360
32	1	1	1	1	1	1410	1360	1420	1330	1390

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.1

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	1599710	51604	43.10	<0.001
Linear	5	1543002	308600	257.77	<0.001
Force	1	90	90	0.08	0.784
Size	1	1536640	1536640	1283.54	<0.001
Thick	1	5760	5760	4.81	0.030
Length	1	90	90	0.08	0.784
Time	1	423	423	0.35	0.554
2-Way Interactions	10	42590	4259	3.56	<0.001
Force*Size	1	640	640	0.53	0.466
Force*Thick	1	490	490	0.41	0.523
Force*Length	1	10	10	0.01	0.927
Force*Time	1	303	303	0.25	0.616
Size*Thick	1	39690	39690	33.15	<0.001
Size*Length	1	250	250	0.21	0.648
Size*Time	1	63	63	0.05	0.820
Thick*Length	1	40	40	0.03	0.855
Thick*Time	1	203	203	0.17	0.682
Length*Time	1	903	903	0.75	0.387
3-Way Interactions	10	12695	1269	1.06	0.398
Force*Size*Thick	1	640	640	0.53	0.466
Force*Size*Length	1	810	810	0.68	0.412
Force*Size*Time	1	423	423	0.35	0.554
Force*Thick*Length	1	250	250	0.21	0.648
Force*Thick*Time	1	63	63	0.05	0.820
Force*Length*Time	1	63	63	0.05	0.820
Size*Thick*Length	1	4840	4840	4.04	0.046
Size*Thick*Time	1	4622	4622	3.86	0.052
Size*Length*Time	1	422	422	0.35	0.554
Thick*Length*Time	1	562	562	0.47	0.494
4-Way Interactions	5	1420	284	0.24	0.945
Force*Size*Thick*Length	1	250	250	0.21	0.648
Force*Size*Thick*Time	1	123	123	0.10	0.750
Force*Size*Length*Time	1	23	23	0.02	0.891
Force*Thick*Length*Time	1	123	123	0.10	0.750
Size*Thick*Length*Time	1	903	903	0.75	0.387
5-Way Interactions	1	3	3	0.00	0.964
Force*Size*Thick*Length*Time	1	3	3	0.00	0.964
Error	128	153240	1197		
Total	159	1752950			

รูปที่ 4.1 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ

เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 4.2 พบว่าตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ตัวแปร C (ความหนาของงาน) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B และตัวแปร C และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B ตัวแปร C และตัวแปร D (ความยาวหมุดย้า) มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

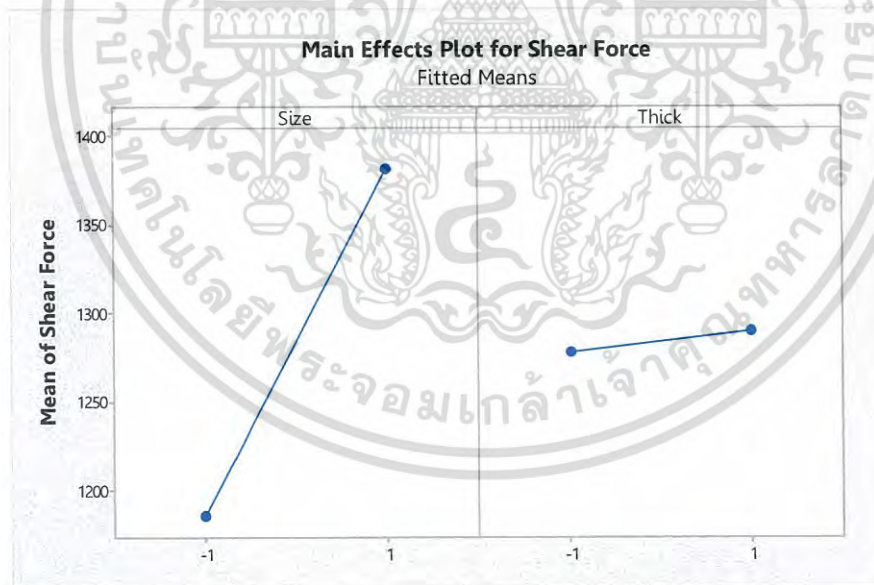
และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.990 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่สูงที่ 90.55%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	7	1587310	226759	208.09	<0.001	
Linear	3	1542490	514163	471.82	<0.001	
Size	1	1536640	1536640	1410.10	<0.001	
Thick	1	5760	5760	5.29	0.023	
Length	1	90	90	0.08	0.774	
2-Way Interactions	3	39980	13327	12.23	<0.001	
Size*Thick	1	39690	39690	36.42	<0.001	
Size*Length	1	250	250	0.23	0.633	
Thick*Length	1	40	40	0.04	0.848	
3-Way Interactions	1	4840	4840	4.44	0.037	
Size*Thick*Length	1	4840	4840	4.44	0.037	
Error	152	165640	1090			
Lack-of-Fit	24	12400	517	0.43	0.990	
Pure Error	128	153240	1197			
Total	159	1752950				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)			
33.0112	90.55%	90.12%	89.53%			

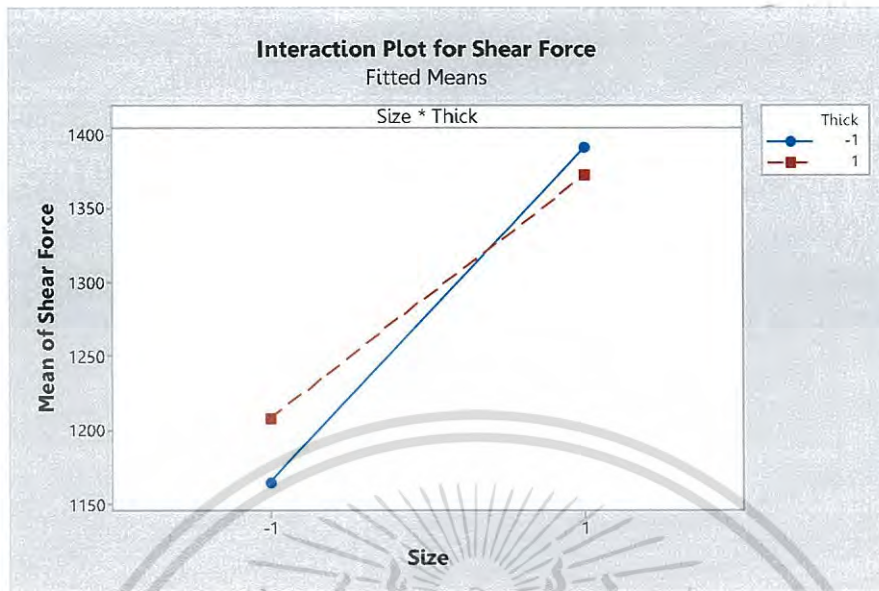
รูปที่ 4.2 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

และสามารถแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และ C (ความหนาของงาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC

#### 4.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		1283.75	2.61	491.90	<0.001		
Size	196.00	98.00	2.61	37.55	<0.001	1.00	
Thick	12.00	6.00	2.61	2.30	0.023	1.00	
Length	1.50	0.75	2.61	0.29	0.774	1.00	
Size*Thick	-31.50	-15.75	2.61	-6.04	<0.001	1.00	
Size*Length	-2.50	-1.25	2.61	0.48	0.633	1.00	
Thick*Length	-1.00	-0.50	2.61	-0.19	0.848	1.00	
Size*Thick*Length	11.00	5.50	2.61	2.11	0.037	1.00	

รูปที่ 4.5 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.5 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

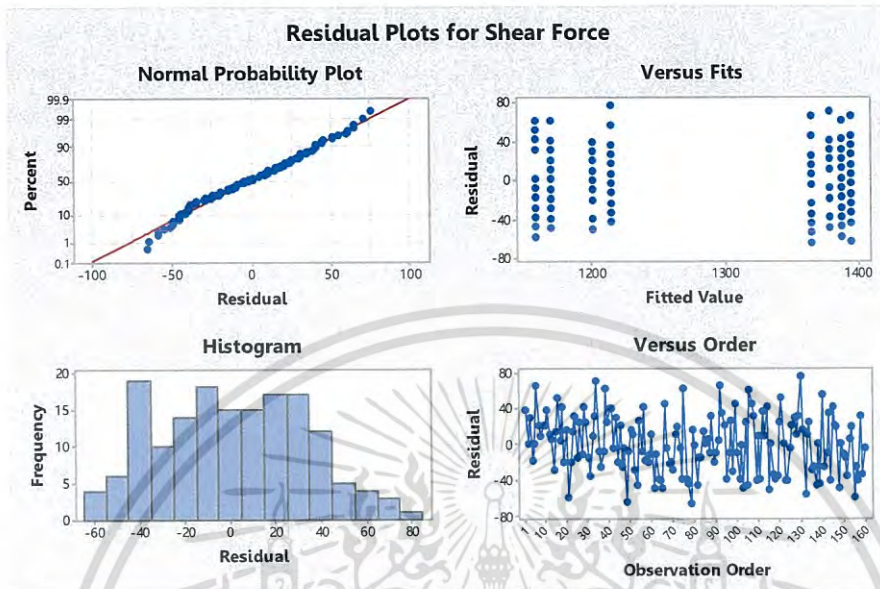
$$Y = 1283.75 + 98.00 B + 6.00 C + 0.75 D - 15.75 B*C + 1.25 B*D - 0.50 C*D + 5.50 B*C*D \quad (4.1)$$

- เมื่อ
- Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)
  - B = ขนาดรูเจาะ (Hole Size)
  - C = ความหนาของงาน (Thickness of work)

D = ความยาวหมุดย้ำ (Length of Aluminum Riveting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ที่ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Shear Force



รูปที่ 4.6 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force

จากกราฟ Normal Probability Plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟ Histogram มีรูปทรงระฆังคว่ำ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟ Residuals กับ Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ และจากกราฟ Residuals กับ Fitted value ความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ แสดงว่าสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้

### 4.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design

Fractional Factorial Design					
Factors:	5	Base Design:	5, 16	Resolution:	V
Runs:	80	Replicates:	5	Fraction:	1/2
Blocks:	1	Center pts (total):	0		
Design Generators: E = ABCD					

รูปที่ 4.7 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design

จากรูปที่ 4.7 การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{5-1}$  Fractional Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 80 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังตารางที่ 4.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{5-1}$

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5
1	-1	-1	-1	-1	1	1200	1140	1120	1190	1150
2	1	-1	-1	-1	-1	1120	1220	1120	1210	1130
3	-1	1	-1	-1	-1	1400	1390	1360	1420	1440
4	1	1	-1	-1	1	1380	1430	1350	1330	1390
5	-1	-1	1	-1	-1	1250	1170	1230	1180	1290
6	1	-1	1	-1	1	1210	1220	1220	1190	1180
7	-1	1	1	-1	1	1340	1410	1370	1390	1370
8	1	1	1	-1	-1	1390	1380	1320	1300	1390
9	-1	-1	-1	1	-1	1200	1170	1130	1200	1190
10	1	-1	-1	1	1	1190	1210	1130	1130	1170
11	-1	1	-1	1	1	1390	1420	1410	1330	1380
12	1	1	-1	1	-1	1390	1360	1410	1450	1380
13	-1	-1	1	1	1	1240	1190	1150	1210	1200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{5-1}$ 

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5
14	1	-1	1	1	-1	1230	1220	1190	1220	1160
15	-1	1	1	1	-1	1390	1400	1370	1340	1360
16	1	1	1	1	1	1410	1360	1420	1330	1390

#### 4.3.1 การวิเคราะห์หวิธีทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป สามารถแสดงดังรูปที่ 4.8

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	15	782459	52164	42.13	<0.001	
Linear	5	758846	151769	122.58	<0.001	
A	1	781	781	0.63	0.430	
B	1	754661	754661	609.52	<0.001	
C	1	2531	2531	2.04	0.158	
D	1	211	211	0.17	0.681	
E	1	661	661	0.53	0.468	
2-Way Interactions	10	23612	2361	1.91	0.060	
A*B	1	1	1	0.00	0.975	
A*C	1	1	1	0.00	0.975	
A*D	1	2101	2101	1.70	0.197	
A*E	1	1361	1361	1.10	0.298	
B*C	1	18301	18301	14.78	<0.001	
B*D	1	281	281	0.23	0.635	
B*E	1	281	281	0.23	0.635	
C*D	1	361	361	0.29	0.591	
C*E	1	911	911	0.74	0.394	
D*E	1	11	11	0.01	0.924	
Error	64	79240	1238			
Total	79	861699				

รูปที่ 4.8 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป

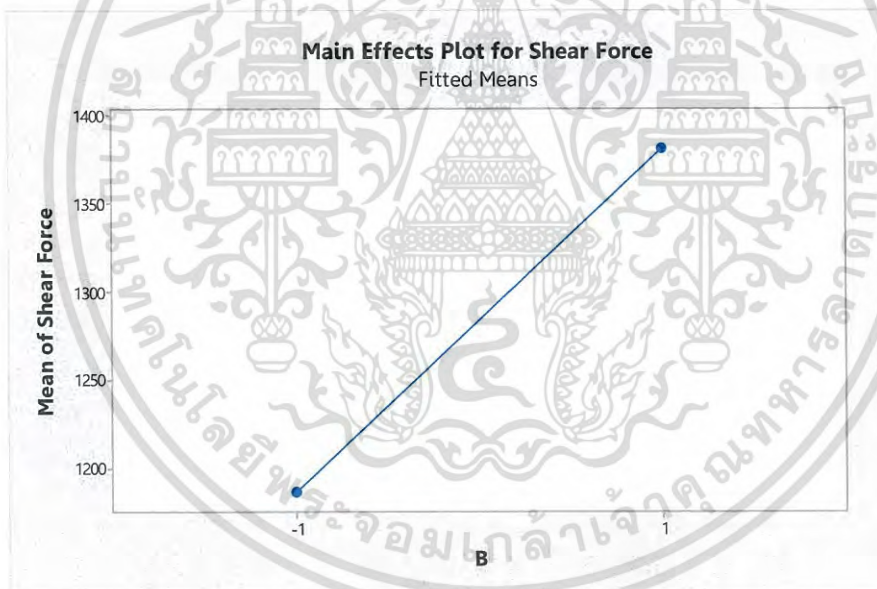
เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 4.9 พบว่าตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B และตัวแปร C มีอิทธิพลต่อแรงเหวี่ยงสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.926 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่สูง ที่ 90.00%

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	775494	258498	227.90	<0.001
Linear	2	757193	378596	333.78	<0.001
B	1	754661	754661	665.32	<0.001
C	1	2531	2531	2.23	0.139
2-Way Interactions	1	18301	18301	16.13	<0.001
B*C	1	18301	18301	16.13	<0.001
Error	76	86205	1134		
Lack-of-Fit	12	6965	580	0.47	0.926
Pure Error	64	79240	1238		
Total	79	861699			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	33.6790	90.00%	89.60%	88.92%	

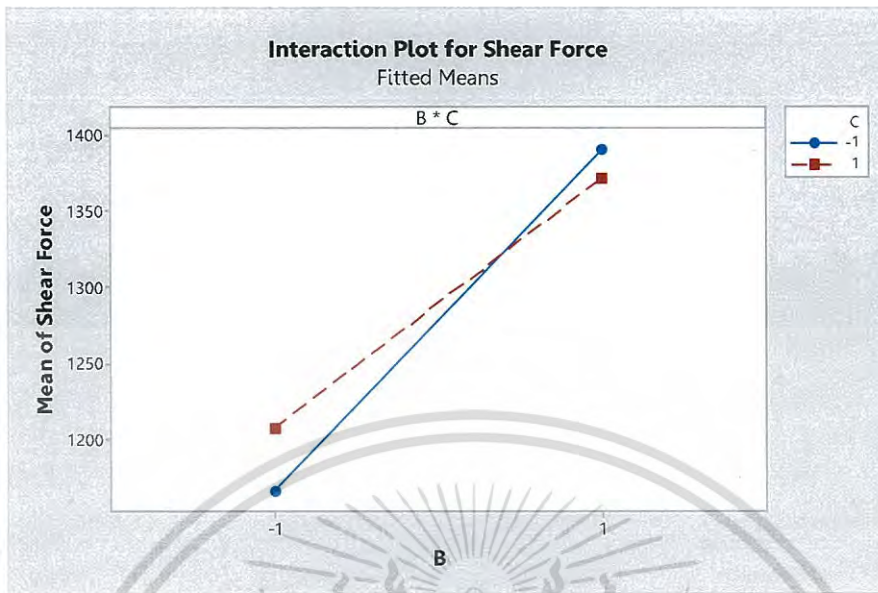
รูปที่ 4.9 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

และสามารถแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC

#### 4.3.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		1283.88	3.77	340.96	<0.001		
B	194.25	97.12	3.77	25.79	<0.001	1.00	
C	11.25	5.62	3.77	1.49	0.139	1.00	
B*C	-30.25	-15.13	3.77	-4.02	<0.001	1.00	

รูปที่ 4.12 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

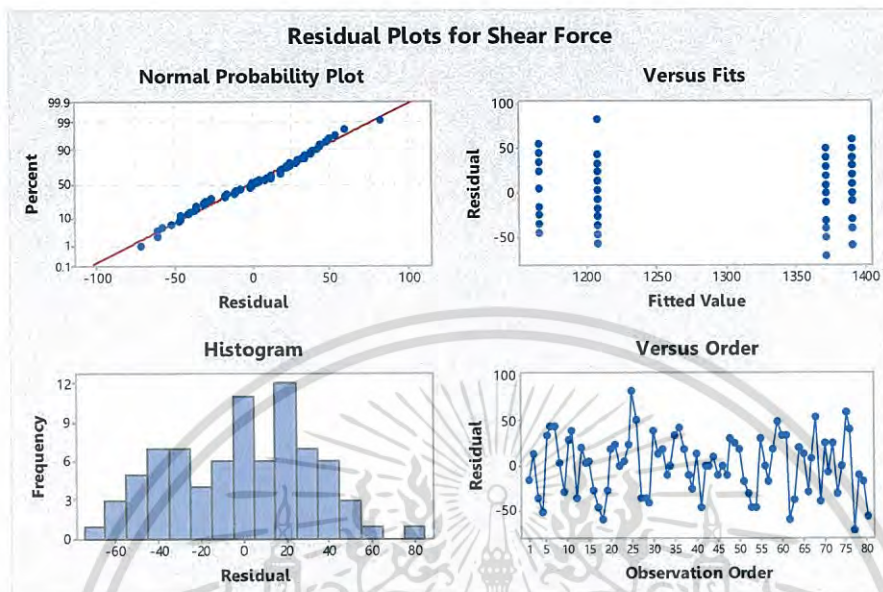
จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.12 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y = 1283.88 + 97.12 B + 5.62 C - 15.13 B*C \quad (4.2)$$

- เมื่อ
- Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)
  - B = ขนาดรูเจาะ (Hole Size)
  - C = ความหนาของงาน (Thickness of work)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Shear Force



รูปที่ 4.13 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force

จากกราฟ Normal Probability Plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟ Histogram มีรูปทรงระฆังคว่ำ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟ Residuals กับ Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ และจากกราฟ Residuals กับ Fitted value ความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ แสดงว่าสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้

## 4.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไชนิน

### 4.4.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park)

มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร ที่นำมาทดลองมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลอง โดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y (กรณีนี้ Green Y หมายถึง ค่าตอบสนอง (Y) คือ แรงเฉือนของหมุดย้อยูมิเนียม) และทำการวิเคราะห์ กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อ Green Y

หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าให้ตัวแปรเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) ซึ่งในกรณีศึกษานี้หมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้แรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้อยูมิเนียม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อลูมิเนียม และค่าที่แย่มากที่สุด (Marginal Level; M) ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะหมายถึงค่าของชุดตัวแปร หรือพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้แรงเฉือนต่ำที่สุดของหมุดย้าอลูมิเนียม โดยทำการทดลองที่ค่าที่ดีที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) และค่าที่แย่มากที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) จากการทดลอง 3 ครั้ง สำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้ง สำหรับค่าที่แย่มากที่สุด ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 กำหนดตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-) Marginal Level	High (+) Best Level	
1. A ขนาดแรงกด (Compression Force)	ต่ำ	สูง	N
2. B ขนาดรูเจาะ (Hole Size)	เล็ก	ใหญ่	mm.
3. C ความหนาของงาน (Thickness of work)	หนา	บาง	mm.
4. D ความยาวหมุดย้า (Length of Aluminum Riveting)	สั้น	ยาว	mm.
5. E เวลาในการกดแช่ (Hold Time)	น้อย	มาก	sec.
ผลการทดลองครั้งที่ 1	1170	1390	N/mm <sup>2</sup>
ผลการทดลองครั้งที่ 2	1250	1360	N/mm <sup>2</sup>
ผลการทดลองครั้งที่ 3	1230	1410	N/mm <sup>2</sup>

จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่า All Best ทุกครั้งดีกว่า (แรงเฉือนมากกว่า) All Marginal และค่ามัธยฐาน (Median) ของ All Best คือ 1390 ส่วนค่ามัธยฐานของ All Marginal คือ 1230 หลังจากนั้นต้องนำค่าที่ได้จากการทดลองไปหาอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ซึ่งถูกกำหนดไว้ว่าอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25:1 ซึ่งถ้าการทดสอบนี้สำคัญผ่าน ก็ถือว่าขั้นตอนกำหนดตัวแปร (Ball Park) เสร็จสิ้น แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ถูกต้องแล้ว ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่า D และ  $\bar{d}$  ได้ดังนี้

$$D = \text{ผลต่างของค่ามัธยฐานของ All Best กับค่ามัธยฐานของ All Marginal} \\ = 1390 - 1230 = 160$$

$$\bar{d} = (\text{ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Best กับค่าน้อยที่สุดของ All Best} + \text{ผลต่างของ} \\ \text{ค่าที่มากที่สุดของ All Marginal กับค่าน้อยที่สุดของ All Marginal}) / 2 \\ = ((1410 - 1360) + (1250 - 1170)) / 2 = 65$$

ดังนั้นอัตราส่วน  $D : \bar{d} = 160 : 65$  หรือเท่ากับ 2.46 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ (A ถึง E) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors)

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญ และกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไป โดยเริ่มจากการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดตัวแปร A โดยตัวแปร A จะถูกกำหนดให้เป็นค่า Marginal (A คือ ขนาดแรงกด) ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ทั้งหมด

หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 4.3 ดังนี้

$$\text{Decision Limits} = \text{Median} \pm 2.776 \frac{\bar{d}}{1.81} \quad (4.3)$$

จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 1230 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 1130.31 \text{ ถึง } 1329.69 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 1390 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 1290.31 \text{ ถึง } 1489.69 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลอง (Results) จากครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ( $A_M R_B$ ) และผลจากการทดลองจากครั้งที่ 2 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Marginal ( $A_B R_M$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่จะเป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ

กรณีที่ 2 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ให้ผลตรงข้ามกันคือ  $A_M R_B$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ  $A_B R_M$  ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆตัดออกได้ทั้งหมด

กรณีที่ 3 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าตกออกนอก Decision Limits คือ  $A_M R_B$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_B R_M$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อสำหรับปัจจัยที่เหลือ คือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไป แต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลอง แสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

ดังนั้นจากผลการทดลองสำหรับตัวแปร A จะพบว่าเป็นไปตามกรณีที่ 1 คือค่าของ  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการทดลองต่อ โดยกรณีศึกษานี้ได้ทำการสรุปผลการทดลองของแต่ละสภาวะของตัวแปรแต่ละตัว (A-E) แล้วแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$A_M R_B$	1420	1390	1290.31 to 1489.69	A not significant
2	$A_B R_M$	1200	1230	1130.31 to 1329.69	
3	$B_M R_B$	1170	1390	1290.31 to 1489.69	B significant
4	$B_B R_M$	1380	1230	1130.31 to 1329.69	
5	$C_M R_B$	1390	1390	1290.31 to 1489.69	C not significant
6	$C_B R_M$	1160	1230	1130.31 to 1329.69	
7	$D_M R_B$	1330	1390	1290.31 to 1489.69	D not significant
8	$D_B R_M$	1220	1230	1130.31 to 1329.69	
9	$E_M R_B$	1410	1390	1290.31 to 1489.69	E not significant
10	$E_B R_M$	1240	1230	1130.31 to 1329.69	

สรุปผลจากผลการทดลอง พบว่าตัวแปร A C D และ E มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้น ตัวแปร A C D และ E จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปร B มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits จึงสรุปได้ว่าตัวแปร B เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ

#### 4.4.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run)

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญจริง และยืนยันตัวแปรที่ไม่สำคัญเป็นตัวแปรที่ไม่สำคัญจริง ซึ่งจากกรณีศึกษาพบว่ามีตัวแปรที่มีนัยสำคัญมีแค่ 1 ตัวแปรเท่านั้น คือ ตัวแปร B ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดลองอีกครั้ง โดยกำหนดให้ครั้งที่ 1 ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal หลังจากนั้นทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best

จากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 4.3 จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 1230 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 1130.31 \text{ ถึง } 1329.69 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 1390 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 1290.31 \text{ ถึง } 1489.69 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal ( $A_B B_B R_M$ ) และผลจากการทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร A และตัวแปร B เป็น ค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best ( $A_M B_M R_B$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$A_B B_B R_M$	1300	1390	1290.31 to 1489.69	AB significant
2	$A_M B_M R_B$	1180	1230	1130.31 to 1329.69	
3	$B_B C_B R_M$	1440	1390	1290.31 to 1489.69	BC significant
4	$B_M C_M R_B$	1210	1230	1130.31 to 1329.69	
5	$B_B D_B R_M$	1280	1390	1290.31 to 1489.69	BD not significant
6	$B_M D_M R_B$	1100	1230	1130.31 to 1329.69	
7	$B_B E_B R_M$	1280	1390	1290.31 to 1489.69	BE not significant
8	$B_M E_M R_B$	1120	1230	1130.31 to 1329.69	

จากการดำเนินการขั้นตอนที่ 3 คือ การยืนยันตัวแปร พบว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร A กับ B และ B กับ C ดังนั้นจึงอาจมีตัวแปร B และอันตรกิริยา AB และ BC ที่มีนัยสำคัญ

#### 4.4.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis)

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ซึ่งจะเรียกว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 3 ว่า Pale Pink X โดยสำหรับกรณีนี้ได้ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้ว พบว่าอาจมีตัวแปร B และอันตรกิริยา AB และ BC ที่มีนัยสำคัญ แสดงว่าจะมีเพียง 3 ตัวแปรหลัก คือ ตัวแปร A, B และ C โดยการนำค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำการทดลองมากรอกลงในตารางเมตริกซ์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมเป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งตารางเมตริกซ์ของตัวแปร A, B และ C จะได้ดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร

	A Best	A Marginal	C Best	C Marginal
B Best	1390 1390	1420 1280	1420 1390	1380 1280
	1330 1360	1380	1330 1360	1390
	1410 1410	1440	1410 1410	1300
	1300	1280	1440	1280
5480	Median=1390	Median=1380	Median=1410	Median=1300
B Marginal	1200 1120	1160 1170	1160 1120	1200 1170
	1170	1220 1250	1170	1220 1250
	1210	1240 1230	1180	1240 1230
	1100	1180	1100	1210
4770	Median=1170	Median=1220	Median=1160	Median=1220

A best	= 1390+1170=2560	C best	= 1410+1160=2570
A marginal	= 1380+1220=2600	C marginal	= 1300+1220=2520
A <sub>B</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>M</sub> B <sub>M</sub>	= 1390+1220=2610	B <sub>B</sub> C <sub>B</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>M</sub>	= 1410+1220=2630
A <sub>M</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>B</sub> B <sub>M</sub>	= 1380+1170=2550	B <sub>B</sub> C <sub>M</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>B</sub>	= 1300+1160=2460

เมื่อได้ตารางเมตริกซ์ที่สมบูรณ์พร้อมทั้งคำนวณหาค่ามัธยฐาน แล้วให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร A, B และ C และอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร A และ B กับตัวแปร B และ C ได้ ดังนี้

Main Effect A = ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานของ A Best กับค่ามัธยฐานของ A Marginal

หาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\begin{aligned} \text{Main Effect A} &= \frac{|[\text{Median}(A_B B_B) + \text{Median}(A_B B_M)] - [\text{Median}(A_M B_B) + \text{Median}(A_M B_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[2560 - 2600]|}{2} \\ &= 20 \end{aligned}$$

โดยสามารถคำนวณค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร B ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Main Effect B} &= \frac{|[\text{Median}(A_B B_B) + \text{Median}(A_M B_B) + \text{Median}(B_B C_B) + \text{Median}(B_B C_M)] - \\ & \quad |[\text{Median}(A_B B_M) + \text{Median}(A_M B_M) + \text{Median}(B_M C_B) + \text{Median}(B_M C_M)]|}{4} \\ &= \frac{|[(1390 + 1380 + 1410 + 1300) - (1170 + 1220 + 1160 + 1220)]|}{4} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{|[5480-4770]|}{4}$$

$$= 177.50$$

และค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร C ได้ ดังนี้

$$\text{Main Effect C} = \frac{|[\text{Median}(B_B C_B) + \text{Median}(B_M C_B)] - [\text{Median}(B_B C_M) + \text{Median}(B_M C_M)]|}{2}$$

$$= \frac{|[2570 - 2520]|}{2}$$

$$= 25$$

เมื่อได้ทำการคำนวณค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร A, B และ C แล้ว หลังจากนั้นให้ทำการคำนวณค่าอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร A และ B กับ ตัวแปร B และ C ได้ ดังนี้

AB Interaction = ผลต่างระหว่างผลรวมของค่ามัธยฐานของ A Best B Best กับ A Marginal B Marginal กับ ผลรวมของค่ามัธยฐานของ A Marginal B Best กับ A Best B Marginalหาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\text{AB Interaction} = \frac{|[\text{Median}(A_B B_B) + \text{Median}(A_M B_M)] - [\text{Median}(A_M B_B) + \text{Median}(A_B B_M)]|}{2}$$

$$= \frac{|[2610 - 2550]|}{2}$$

$$= 30$$

โดยสามารถคำนวณค่าอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร B และ C ได้ ดังนี้

$$\text{BC Interaction} = \frac{|[\text{Median}(B_B C_B) + \text{Median}(B_M C_M)] - [\text{Median}(B_B C_M) + \text{Median}(B_M C_B)]|}{2}$$

$$= \frac{|[2630 - 2460]|}{2}$$

$$= 85$$

สามารถสรุปผลจากการวิเคราะห์ตัวแปรได้ว่าตัวแปร B มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X ซึ่งมีค่าคือเท่ากับ 177.50 และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับ 2 คือ การเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร B และ C โดยมีค่าเท่ากับ 85 หรือเรียกว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอันดับสุดท้าย คือ การเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร A และ B โดยมีค่าเท่ากับ 30 หรือเรียกว่า Pale Pink X ตามนิยามของไชนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำตัวแปร B, AB และ BC ไปจัดทำกราฟของอิทธิพลหลัก และจัดทำกราฟอิทธิพลร่วม ดังนี้

1) กราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปร B

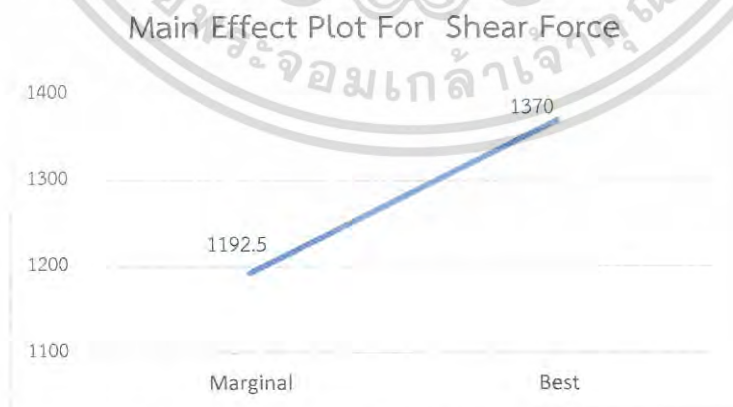
จากตารางที่ 4.7 นำค่ามัธยฐานของ A Best และ B Marginal ซึ่งเท่ากับ 1170 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ A Marginal และ B Marginal ซึ่งเท่ากับ 1220 บวกกับค่ามัธยฐานของ B Marginal และ C Best ซึ่งเท่ากับ 1160 และบวกกับค่ามัธยฐานของ B Marginal และ C Marginal ซึ่งเท่ากับ 1220 แล้วหารด้วย 4 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Median}(A_B B_M) + \text{Median}(A_M B_M) + \text{Median}(B_M C_B) + \text{Median}(B_M C_M)}{4} \\
 &= \frac{1170 + 1220 + 1160 + 1220}{4} \\
 &= 1192.5
 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่ามัธยฐานของ A Best และ B Best ซึ่งเท่ากับ 1390 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ A Marginal และ B Best ซึ่งเท่ากับ 1380 บวกกับค่ามัธยฐานของ B Best และ C Best ซึ่งเท่ากับ 1410 และบวกกับค่ามัธยฐานของ B Best และ C Marginal ซึ่งเท่ากับ 1300 แล้วหารด้วย 4 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Median}(A_B B_B) + \text{Median}(A_M B_B) + \text{Median}(B_B C_B) + \text{Median}(B_B C_M)}{4} \\
 &= \frac{1390 + 1380 + 1410 + 1300}{4} \\
 &= 1370
 \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 4.14



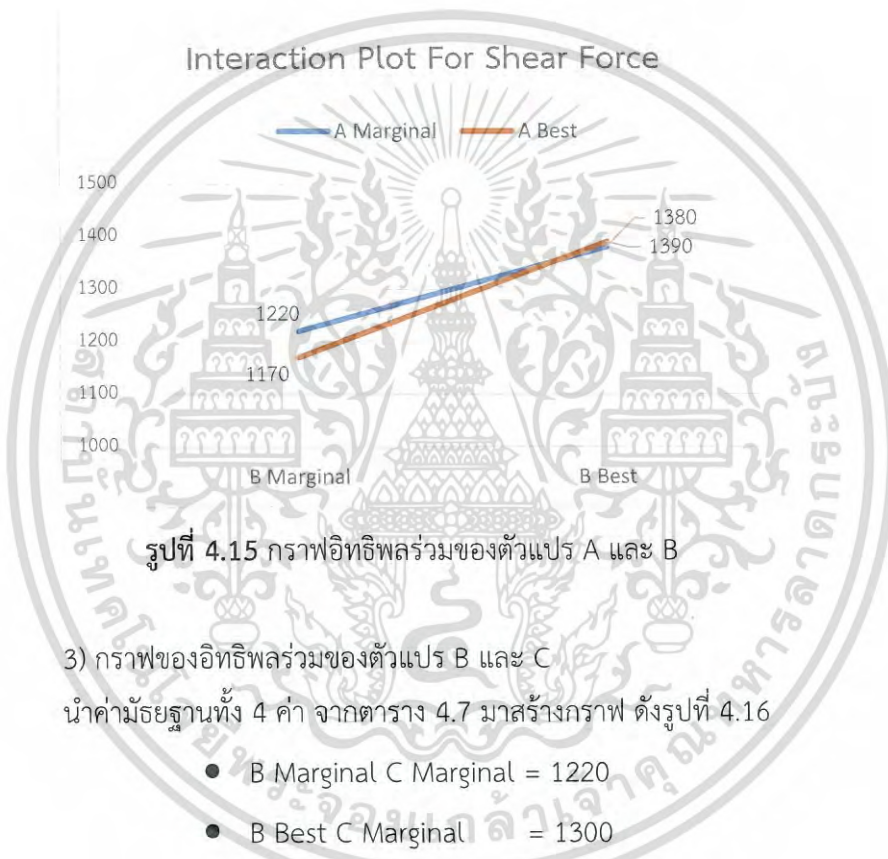
รูปที่ 4.14 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กราฟของอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ B

นำค่ามัธยฐานทั้ง 4 ค่า จากตาราง 4.14 มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.15

- A Marginal B Marginal = 1220
- A Best B Marginal = 1170
- A Marginal B Best = 1380
- A Best B Best = 1390



3) กราฟของอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C

นำค่ามัธยฐานทั้ง 4 ค่า จากตาราง 4.7 มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.16

- B Marginal C Marginal = 1220
- B Best C Marginal = 1300
- B Marginal C Best = 1160
- B Best C Best = 1410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C

จากกราฟข้างต้นแสดงอย่างชัดเจนว่า ตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) อันตรกิริยาของตัวแปร A กับ B และอันตรกิริยาของตัวแปร B กับ C มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม

#### 4.5 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

ตารางที่ 4.8 แสดงระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. A ขนาดแรงกด (Compression Force)	ต่ำ	สูง	N
2. B ขนาดรูเจาะ (Hole Size)	เล็ก	ใหญ่	mm.
3. C ความหนาของงาน (Thickness of work)	บาง	หนา	mm.
4. D ความยาวหมุดย้ำ (Length of Aluminum Riveting)	สั้น	ยาว	mm.
5. E เวลาในการกดแช่ (Hold Time)	น้อย	มาก	sec.

การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Arrays) เป็น L16 ( $2^5$ ) เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 80 ครั้ง โดยสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก (Larger – the better) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-better) ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 4.8 และแสดงแผนการทดลองและผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 (2<sup>5</sup>)

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5
1	-1	-1	-1	-1	-1	1110	1200	1120	1160	1210
2	-1	-1	-1	1	1	1180	1160	1160	1230	1190
3	-1	-1	1	-1	1	1210	1240	1170	1190	1200
4	-1	-1	1	1	-1	1180	1210	1190	1220	1210
5	-1	1	-1	-1	1	1420	1380	1410	1380	1350
6	-1	1	-1	1	-1	1380	1350	1370	1420	1400
7	-1	1	1	-1	-1	1410	1310	1360	1320	1380
8	-1	1	1	1	1	1420	1360	1370	1390	1360
9	1	-1	-1	-1	1	1190	1190	1130	1100	1160
10	1	-1	-1	1	-1	1120	1140	1210	1130	1150
11	1	-1	1	-1	-1	1200	1270	1230	1190	1240
12	1	-1	1	1	1	1240	1200	1160	1210	1190
13	1	1	-1	-1	-1	1390	1460	1370	1410	1430
14	1	1	-1	1	1	1390	1340	1410	1360	1430
15	1	1	1	-1	1	1330	1330	1430	1380	1390
16	1	1	1	1	-1	1360	1390	1340	1370	1450

#### 4.5.1 การวิเคราะห์หวิวิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

Analysis of Variance for Means							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value	
Force	1	42	42	42	0.14	0.720	
Size	1	156420	156420	156420	523.87	<0.001	
Thick	1	650	650	650	2.18	0.190	
Length	1	0	0	0	0.00	0.978	
Time	1	2	2	2	0.01	0.934	
Force*Size	1	240	240	240	0.80	0.404	
Size*Thick	1	4290	4290	4290	14.37	0.009	
Size*Length	1	6	6	6	0.02	0.890	
Size*Time	1	6	6	6	0.02	0.890	
Residual Error	6	1792	1792	299			
Total	15	163450					

รูปที่ 4.17 ข้อมูล ANOVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาทำการประมวลและวิเคราะห์ผล พบว่าตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม เนื่องจาก P-value < 0.05 ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม

#### 4.5.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Estimated Model Coefficients for Means					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	1283.63	3.299	389.152	<0.001	
Size -1	-98.87	3.299	-29.976	<0.001	
Thick -1	-6.38	3.299	-1.933	0.077	
Size*Thick -1 -1	-16.37	3.299	-4.964	<0.001	
S = 13.19 R-Sq = 98.7% R-Sq(adj) = 98.4%					

รูปที่ 4.18 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.18 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 4.5 และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่สูง ที่ 98.7%

$$Y = 1283.63 - 98.87 B - 6.38 C - 16.37 B * C \quad (4.4)$$

เมื่อ Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)  
B = ขนาดรูเจาะ (Hole Size)  
C = ความหนาของงาน (Thickness of work)

#### 4.5.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก Larger - the -better คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratios สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.5

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \sum \frac{1}{y^2} \right) / n \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 ข้อมูล Signal-to-Noise Ratios พบว่าตัวแปร A (ขนาดแรงกด), ตัวแปร E (เวลาในการกดแช่) และตัวแปร D (ความยาวหมุดย้า) เป็น Robustness คือ ตัวแปรเหล่านี้มีสภาวะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

โดยพบว่าตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 62.81) และตัวแปร C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 62.19) ให้ค่า S/N ratios ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของแรงเหวี่ยงสูงสุดด้วย ที่ตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 1383) และตัวแปร C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 1290) ที่มีค่าสูงเช่นกัน

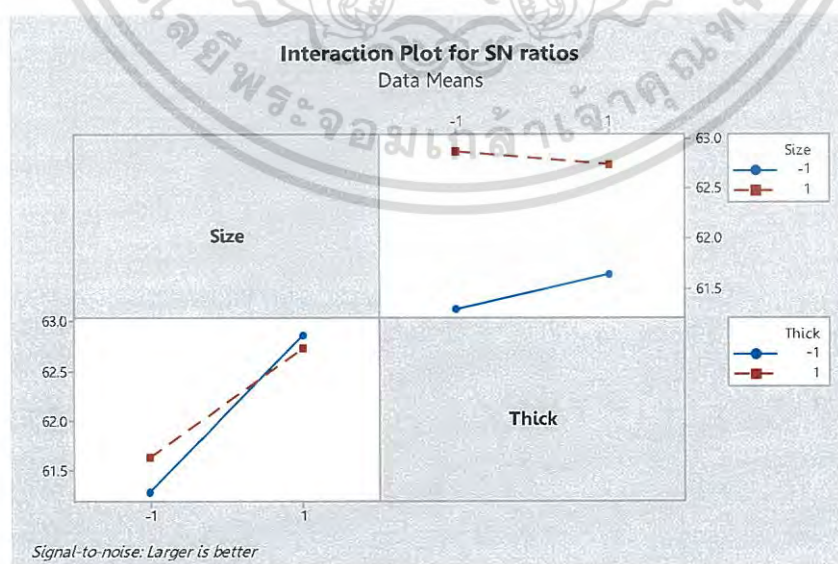
Response Table for Signal to Noise Ratios Larger is better					
Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	62.13	61.46	62.08	62.13	62.14
2	62.14	62.81	62.19	62.14	62.13
Delta	0.01	1.34	0.11	0.00	0.00
Rank	3	1	2	5	4

Response Table for Means					
Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	1282	1185	1277	1284	1284
2	1285	1383	1290	1284	1283
Delta	3	198	13	0	1
Rank	3	1	2	5	4

รูปที่ 4.19 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย

เมื่อพิจารณาที่ตัวแปร B และ C พบว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B และ C แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม จะได้ตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาของตัวแปร B กับ C เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ย และจะได้ตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) ตัวแปร C และอันตรกิริยาของตัวแปร B กับ C เมื่อวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

#### 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล

จากกรณีศึกษาแรงเฉือนของหมุดย้าอลูมิเนียม พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปร B และอันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปร B, C อันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร B และ C และอันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร B, C และ D มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนวิธีการของไชนินจะได้ ตัวแปร B อันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร A และ B และอันตรกิริยาระหว่างของตัวแปร B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบจุดเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญ					Signal-to-noise ratios	Linear Model
	B	C	AB	BC	BCD		
$2^k$ Factorial Design	✓	✓		✓	✓		✓
$2^{k-1}$ Fractional Factorial Design	✓			✓			✓
หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน	✓		✓	✓			
วิธีการทากูชิ	✓			✓		✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน ( $2^k$  Factorial Design)

หัวข้อที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการของทากูชิ	หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล	การออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
เปอร์เซ็นต์จำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลงได้	80 ครั้ง (ลดลง 50%)	24 ครั้ง (ลดลง 85%)	80 ครั้ง (ลดลง 50%)	160 ครั้ง
ต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	ต่ำ	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	สูง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)
หลักการของการวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratios	ค่ามัธยฐาน (Median)	ANOVA	ANOVA
สมการถดถอย	มี	ไม่มี	มี	มี
ความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางสถิติ	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ ตาราง ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ ANOVA)	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ ANOVA)
ความเชื่อมั่นในทางสถิติ	สูง (ใช้ตาราง ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ตาราง ANOVA)	สูง (ใช้ตาราง ANOVA)
จำนวนตัวแปรที่เหมาะสมกับการทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัวแปรจำนวนมาก การทดลองก็ยิ่งน้อยอยู่ดี)	ปานกลาง	น้อย (เพราะ ยังมีจำนวนตัวแปร มาก การทดลองก็ยิ่งมาก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ วิธีการของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษาของกระบวนการย่ำหมุดอลูมิเนียม พบว่าการออกแบบการทดลองของทาคุชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งมีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทาคุชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทาคุชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา พบว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแฟคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่สูงขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อต้องการผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติเทียบเท่ากับการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล) และยังใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าสามารถนำวิธีการของทาคุชิมาประยุกต์ใช้ช่วยในการออกแบบการทดลอง ให้ง่าย สะดวกและมีประสิทธิภาพ

และสำหรับวิธีการของไชนิน ผู้ที่ทำการออกแบบการทดลองต้องเป็นผู้ที่คลุกคลีอยู่ในงานนั้นๆพอสมควร ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งสำหรับผู้ที่ไม่ม่ประสบการณ์ในงานประเภทนั้นๆ เนื่องจากยากในการกำหนดระดับของปัจจัยเป็นค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด

## บทที่ 5

### ผลการดำเนินงาน

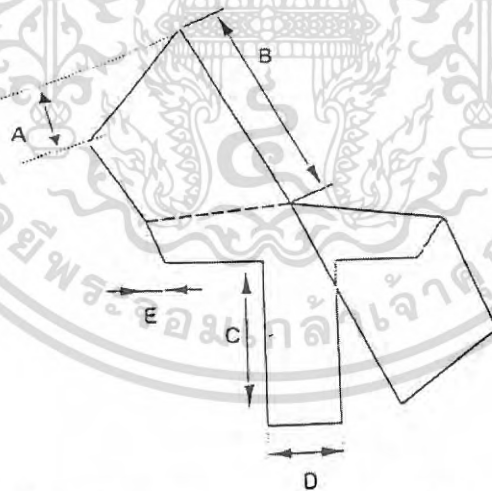
#### (กรณีศึกษา : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ)

ผลการดำเนินงานเรื่องการศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  : Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ( $2^k$  : Full Factorial Design)

#### 5.1 กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ

เป็นกรณีศึกษาพื้นฐาน ที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โดยทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยผู้วิจัยเอง ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ

ตัวแปรควบคุม 5 ตัวแปร แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวแปรควบคุมของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ

A คือ ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)

B คือ ความยาวของปีก (Wing Length)

C คือ ความยาวของลำตัว (Body Length)

D คือ ความกว้างของลำตัว (Body Width)

E คือ ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรตอบสนอง คือ ระยะเวลาในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ ที่ระยะทาง 2 เมตร ในแนวตั้ง

หลังจากได้ทำการสร้างกรณีศึกษาการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล วิธีการของไชนิน และวิธีการของทาภูชิแล้ว ในกรณีศึกษานี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนการวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

- 1) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^k$  Full Factorial Design
- 2) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design
- 3) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของไชนิน
- 4) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทาภูชิ
- 5) สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาภูชิ วิธีการของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล

## 5.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^k$ Full Factorial Design

ตารางที่ 5.1 ระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. A ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)	1	2	cm.
2. B ความยาวของปีก (Wing Length)	11	13	cm.
3. C ความยาวของลำตัว (Body Length)	8	9	cm.
4. D ความกว้างของลำตัว (Body Width)	2	3	cm.
5. E ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)	0	1	cm.

การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้ มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^5$  Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง 32 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมด

จำนวน 96 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 5.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^5$

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	1	11	8	2	0	2.18	2.46	2.45
2	2	11	8	2	0	2.43	2.46	2.29
3	1	13	8	2	0	2.84	2.49	2.11
4	2	13	8	2	0	2.73	2.58	2.53
5	1	11	9	2	0	2.43	2.15	2.31
6	2	11	9	2	0	2.20	2.15	2.51
7	1	13	9	2	0	2.88	2.98	2.93
8	2	13	9	2	0	2.61	2.93	2.43
9	1	11	8	3	0	2.49	2.30	2.33
10	2	11	8	3	0	2.49	2.33	2.23
11	1	13	8	3	0	2.85	2.71	2.40
12	2	13	8	3	0	2.54	2.51	2.78
13	1	11	9	3	0	2.35	2.28	2.19
14	2	11	9	3	0	2.24	2.23	2.31
15	1	13	9	3	0	2.60	2.39	2.23
16	2	13	9	3	0	2.76	2.43	2.83
17	1	11	8	2	1	2.35	2.38	2.33
18	2	11	8	2	1	2.51	2.31	2.50
19	1	13	8	2	1	2.80	2.76	2.50
20	2	13	8	2	1	2.92	2.71	2.35
21	1	11	9	2	1	2.55	2.34	2.39
22	2	11	9	2	1	2.26	2.20	2.59
23	1	13	9	2	1	2.49	2.63	2.83
24	2	13	9	2	1	2.70	2.73	2.68
25	1	11	8	3	1	2.48	2.63	2.61
26	2	11	8	3	1	2.50	2.21	2.58
27	1	13	8	3	1	2.53	2.48	2.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ 2<sup>5</sup>

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
28	2	13	8	3	1	2.84	2.36	2.63
29	1	11	9	3	1	2.34	2.30	2.30
30	2	11	9	3	1	1.83	1.94	1.88
31	1	13	9	3	1	2.86	2.51	2.58
32	2	13	9	3	1	2.48	2.38	2.14

## 5.2.1 การวิเคราะห์ห่วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

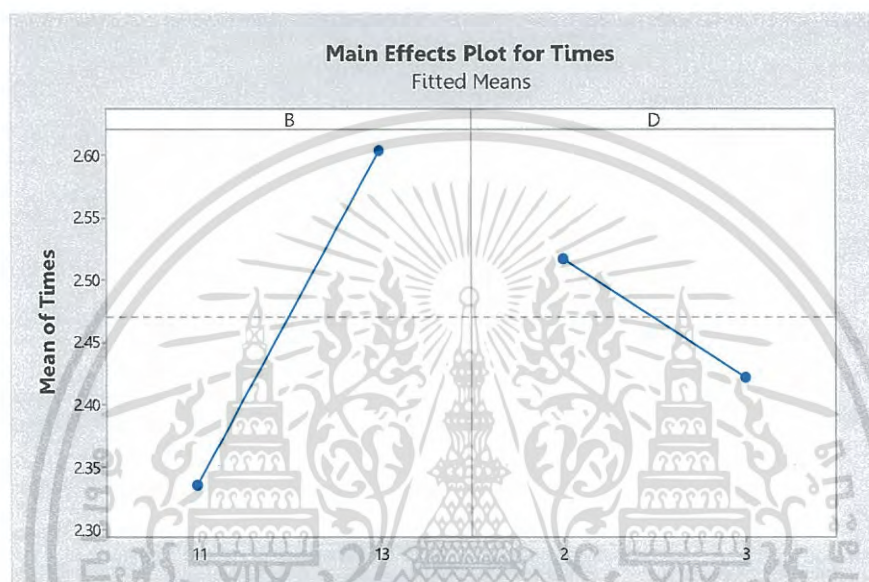
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	31	3.65487	0.11790	4.02	<0.001	
Linear	5	2.05984	0.41197	14.03	<0.001	
A	1	0.02667	0.02667	0.91	0.344	
B	1	1.73882	1.73882	59.23	<0.001	
C	1	0.06827	0.06827	2.33	0.132	
D	1	0.22234	0.22234	7.57	0.008	
E	1	0.00375	0.00375	0.13	0.722	
2-Way Interactions	10	0.78168	0.07817	2.66	0.009	
A*B	1	0.03682	0.03682	1.25	0.267	
A*C	1	0.10667	0.10667	3.63	0.061	
A*D	1	0.01260	0.01260	0.43	0.515	
A*E	1	0.04167	0.04167	1.42	0.238	
B*C	1	0.21660	0.21660	7.38	0.008	
B*D	1	0.03760	0.03760	1.28	0.262	
B*E	1	0.02802	0.02802	0.95	0.332	
C*D	1	0.20350	0.20350	6.93	0.011	
C*E	1	0.05227	0.05227	1.78	0.187	
D*E	1	0.04594	0.04594	1.56	0.216	
3-Way Interactions	10	0.25526	0.02553	0.87	0.566	
A*B*C	1	0.00107	0.00107	0.04	0.849	
A*B*D	1	0.07820	0.07820	2.66	0.108	
A*B*E	1	0.01707	0.01707	0.58	0.449	
A*C*D	1	0.00000	0.00000	0.00	0.991	
A*C*E	1	0.06202	0.06202	2.11	0.151	
A*D*E	1	0.09004	0.09004	3.07	0.085	
B*C*D	1	0.00184	0.00184	0.06	0.803	
B*C*E	1	0.00282	0.00282	0.10	0.758	
B*D*E	1	0.00150	0.00150	0.05	0.822	
C*D*E	1	0.00070	0.00070	0.02	0.877	
4-Way Interactions	5	0.42458	0.08492	2.89	0.020	
A*B*C*D	1	0.00184	0.00184	0.06	0.803	
A*B*C*E	1	0.00007	0.00007	0.00	0.962	
A*B*D*E	1	0.00050	0.00050	0.02	0.896	
A*C*D*E	1	0.22234	0.22234	7.57	0.008	
B*C*D*E	1	0.19984	0.19984	6.81	0.011	
5-Way Interactions	1	0.13350	0.13350	4.55	0.037	
A*B*C*D*E	1	0.13350	0.13350	4.55	0.037	
Error	64	1.87873	0.02936			
Total	95	5.53360				

รูปที่ 5.2 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป

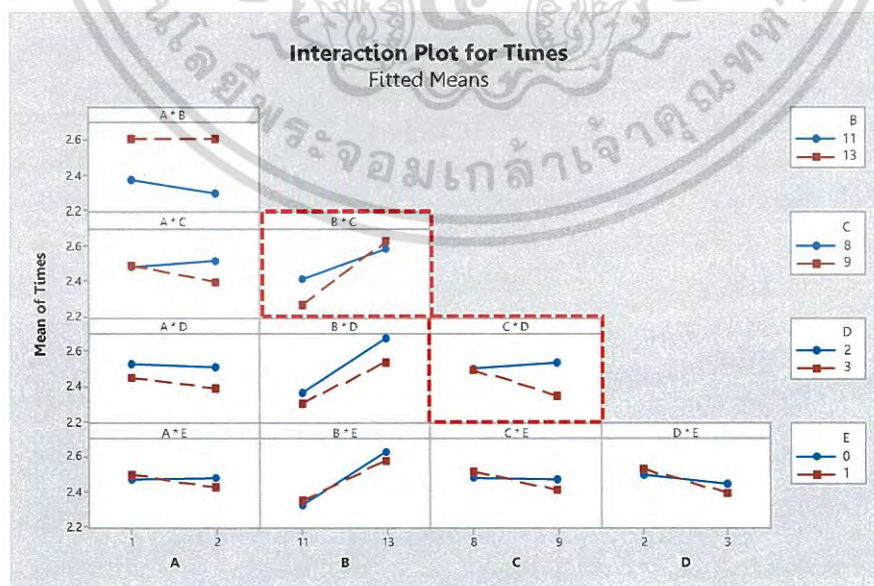
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป พบว่าตัวแปร B (ความยาวของปีก) มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ ส่วนตัวแปรอื่นๆ คือ ตัวแปร ACDE, D, BC, CD, BCDE, ABCDE มีอิทธิพลตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

และสามารถแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก) และตัวแปร D (ความกว้างของลำตัว)



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC และตัวแปร CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.171334	66.05%	49.60%	23.61%			
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		2.4700	0.0175	141.25	<0.001	
A	-0.0333	-0.0167	0.0175	-0.95	0.344	1.00
B	0.2692	0.1346	0.0175	7.70	<0.001	1.00
C	-0.0533	-0.0267	0.0175	-1.52	0.132	1.00
D	-0.0962	-0.0481	0.0175	-2.75	0.008	1.00
E	-0.0125	-0.0063	0.0175	-0.36	0.722	1.00
A*B	0.0392	0.0196	0.0175	1.12	0.267	1.00
A*C	-0.0667	-0.0333	0.0175	-1.91	0.061	1.00
A*D	-0.0229	-0.0115	0.0175	-0.66	0.515	1.00
A*E	-0.0417	-0.0208	0.0175	-1.19	0.238	1.00
B*C	0.0950	0.0475	0.0175	2.72	0.008	1.00
B*D	-0.0396	-0.0198	0.0175	-1.13	0.262	1.00
B*E	-0.0342	-0.0171	0.0175	-0.98	0.332	1.00
C*D	-0.0921	-0.0460	0.0175	-2.63	0.011	1.00
C*E	-0.0467	-0.0233	0.0175	-1.33	0.187	1.00
D*E	-0.0437	-0.0219	0.0175	-1.25	0.216	1.00
A*B*C	-0.0067	-0.0033	0.0175	-0.19	0.849	1.00
A*B*D	0.0571	0.0285	0.0175	1.63	0.108	1.00
A*B*E	0.0267	0.0133	0.0175	0.76	0.449	1.00
A*C*D	-0.0004	-0.0002	0.0175	-0.01	0.991	1.00
A*C*E	-0.0508	-0.0254	0.0175	-1.45	0.151	1.00
A*D*E	-0.0613	-0.0306	0.0175	-1.75	0.085	1.00
B*C*D	0.0087	0.0044	0.0175	0.25	0.803	1.00
B*C*E	0.0108	0.0054	0.0175	0.31	0.758	1.00
B*D*E	-0.0079	-0.0040	0.0175	-0.23	0.822	1.00
C*D*E	-0.0054	-0.0027	0.0175	-0.15	0.877	1.00
A*B*C*D	0.0088	0.0044	0.0175	0.25	0.803	1.00
A*B*C*E	0.0017	0.0008	0.0175	0.05	0.962	1.00
A*B*D*E	0.0046	0.0023	0.0175	0.13	0.896	1.00
A*C*D*E	-0.0963	-0.0481	0.0175	-2.75	0.008	1.00
B*C*D*E	0.0912	0.0456	0.0175	2.61	0.011	1.00
A*B*C*D*E	-0.0746	-0.0373	0.0175	-2.13	0.037	1.00

รูปที่ 5.5 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

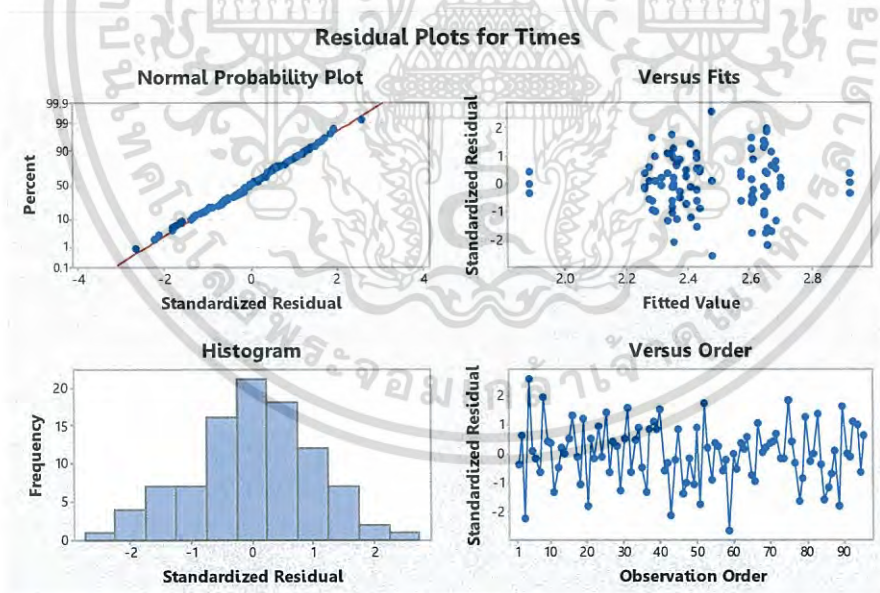
จากการวิเคราะห์รูปที่ 5.5 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 5.1 และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับปานกลาง ที่ 66.05%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 Y = & 2.4700 - 0.0167 A + 0.1346 B - 0.0267 C - 0.0481 D - 0.0063 E + 0.0196 A*B \\
 & - 0.0333 A*C - 0.0115 A*D - 0.0208 A*E + 0.0475 B*C - 0.0198 B*D - 0.0171 B*E \\
 & - 0.0460 C*D - 0.0233 C*E - 0.0219 D*E - 0.0033 A*B*C + 0.0285 A*B*D \\
 & + 0.0133 A*B*E - 0.0002 A*C*D - 0.0254 A*C*E - 0.0306 A*D*E + 0.0044 B*C*D \\
 & + 0.0054 B*C*E - 0.0040 B*D*E - 0.0027 C*D*E + 0.0044 A*B*C*D + 0.0008 A*B*C*E \\
 & + 0.0023 A*B*D*E - 0.0481 A*C*D*E + 0.0456 B*C*D*E - 0.0373 A*B*C*D*E \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $Y$  = ระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ (Time)  
 $A$  = ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)  
 $B$  = ความยาวของปีก (Wing Length)  
 $C$  = ความยาวของลำตัว (Body Length)  
 $D$  = ความกว้างของลำตัว (Body Width)  
 $E$  = ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)

### 5.2.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Times



รูปที่ 5.6 กราฟแสดง Residual Plots for Times

จากกราฟ Normal Probability Plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟ Histogram มีรูปทรงระฆังคว่ำ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ Residuals กับ Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบและจากกราฟ Residuals กับ Fitted value ความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 5.6 กราฟแสดง Residual Plots for Times สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ แสดงว่าสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้

### 5.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design

Fractional Factorial Design			
Factors:	5	Base Design:	5, 16
Runs:	48	Replicates:	3
Blocks:	1	Center pts (total):	0
Design Generators:		E = ABCD	
Resolution:	V		
Fraction:	1/2		

รูปที่ 5.7 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design

จากรูปที่ 5.7 การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้ มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{5-1}$  Fractional Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 48 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 5.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{5-1}$

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	1	11	8	2	1	2.38	2.33	2.35
2	2	11	8	2	0	2.29	2.43	2.46
3	1	13	8	2	0	2.84	2.49	2.11
4	2	13	8	2	1	2.71	2.92	2.35
5	1	11	9	2	0	2.15	2.43	2.31
6	2	11	9	2	1	2.26	2.2	2.59
7	1	13	9	2	1	2.83	2.63	2.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{5-1}$ 

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
8	2	13	9	2	0	2.61	2.43	2.93
9	1	11	8	3	0	2.3	2.33	2.49
10	2	11	8	3	1	2.58	2.5	2.21
11	1	13	8	3	1	2.48	2.53	2.06
12	2	13	8	3	0	2.54	2.51	2.78
13	1	11	9	3	1	2.30	2.34	2.3
14	2	11	9	3	0	2.23	2.24	2.31
15	1	13	9	3	0	2.60	2.23	2.39
16	2	13	9	3	1	2.14	2.38	2.48

### 5.3.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 5.8

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	15	0.83955	0.055970	1.53	0.154	
Linear	5	0.53509	0.107019	2.92	0.028	
A	1	0.04025	0.040252	1.10	0.303	
B	1	0.35880	0.358802	9.78	0.004	
C	1	0.02852	0.028519	0.78	0.384	
D	1	0.10735	0.107352	2.93	0.097	
E	1	0.00017	0.000169	0.00	0.946	
2-Way Interactions	10	0.30445	0.030445	0.83	0.603	
A*B	1	0.01367	0.013669	0.37	0.546	
A*C	1	0.06675	0.066752	1.82	0.187	
A*D	1	0.00175	0.001752	0.05	0.828	
A*E	1	0.01300	0.013002	0.35	0.556	
B*C	1	0.01367	0.013669	0.37	0.546	
B*D	1	0.09810	0.098102	2.68	0.112	
B*E	1	0.01435	0.014352	0.39	0.536	
C*D	1	0.05135	0.051352	1.40	0.245	
C*E	1	0.00130	0.001302	0.04	0.852	
D*E	1	0.03050	0.030502	0.83	0.369	
Error	32	1.17340	0.036669			
Total	47	2.01295				

รูปที่ 5.8 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ

เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 5.9 พบว่าตัวแปร B (ความยาวของปีก) มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

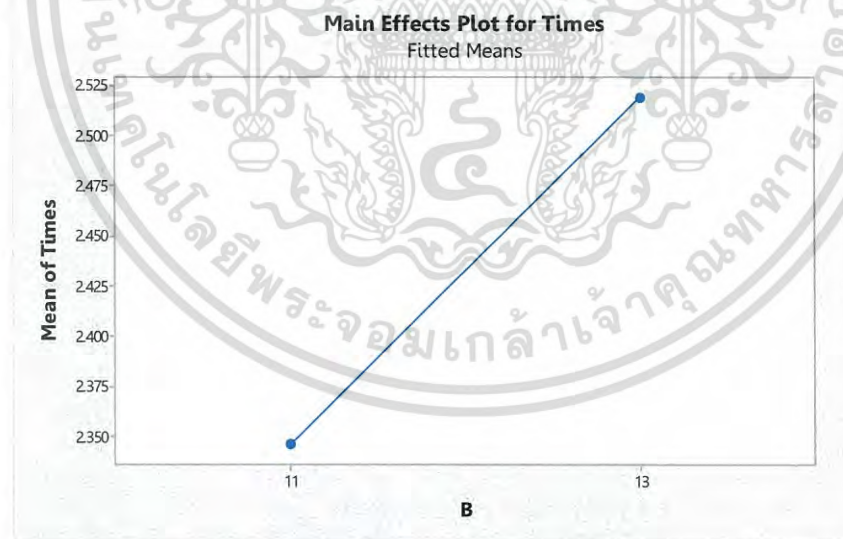
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.805 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ ที่ 28.03%

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	0.56426	0.18809	5.71	0.002	
Linear	2	0.46615	0.23308	7.08	0.002	
B	1	0.35880	0.35880	10.90	0.002	
D	1	0.10735	0.10735	3.26	0.078	
2-Way Interactions	1	0.09810	0.09810	2.98	0.091	
B*D	1	0.09810	0.09810	2.98	0.091	
Error	44	1.44869	0.03292			
Lack-of-Fit	12	0.27529	0.02294	0.63	0.805	
Pure Error	32	1.17340	0.03667			
Total	47	2.01295				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.181452	28.03%	23.12%	14.35%			

รูปที่ 5.9 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

และสามารถแสดงอิทธิพลหลักของ B ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		2.4327	0.0274	88.88	<0.001		
B		0.1729	0.0865	3.16	0.003	1.00	

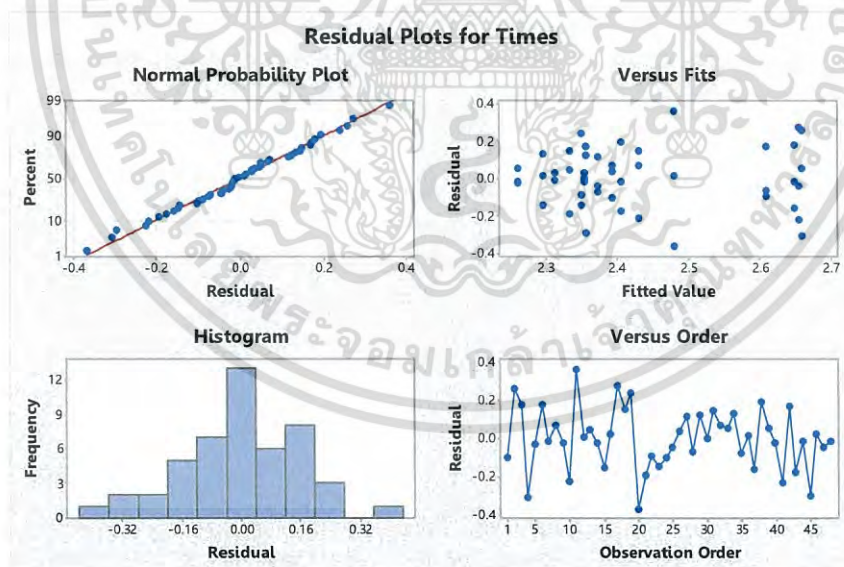
รูปที่ 5.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 5.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y = 2.4327 + 0.0865 B \quad (5.2)$$

เมื่อ Y = ระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ (Time)  
B = ความยาวของปีก (Wing Length)

### 5.3.3 การวิเคราะห์ด้วยกราฟแสดง Residual Plots for Times



รูปที่ 5.12 กราฟแสดง Residual Plots for Times

จากกราฟ Normal Probability Plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟ Histogram มีรูปร่างระฆังคว่ำ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ Residuals กับ Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ และจากกราฟ Residuals กับ Fitted value ความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 5.12 กราฟแสดง Residual Plots for Times สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ แสดงว่าสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้

## 5.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไชนิน

### 5.4.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park)

มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร ที่นำมาทดลองมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลอง โดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y (กรณีนี้ Green Y หมายถึง ค่าตอบสนอง (Y) คือ ระยะเวลาในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศ) และทำการวิเคราะห์ กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อ Green Y

หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าให้ตัวแปรเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) ซึ่งในกรณีศึกษาี้ หมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้ใช้ระยะเวลา最多ในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศ และค่าที่แย่ที่สุด (Marginal Level; M) ซึ่งในกรณีศึกษาี้จะหมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศ โดยทำการทดลองที่ค่าที่ดีที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) และค่าที่แย่ที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) จากการทดลอง 3 ครั้ง สำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้ง สำหรับค่าที่แย่ที่สุด ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 กำหนดตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-) Marginal Level	High (+) Best Level	
1. A ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)	1	2	cm.
2. B ความยาวของปีก (Wing Length)	11	13	cm.
3. C ความยาวของลำตัว (Body Length)	9	8	cm.
4. D ความกว้างของลำตัว (Body Width)	2	3	cm.
5. E ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)	0	1	cm.
ผลการทดลองครั้งที่ 1	2.56	2.83	sec.
ผลการทดลองครั้งที่ 2	2.53	2.93	sec.
ผลการทดลองครั้งที่ 3	2.45	2.81	sec.

จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่า All Best ทุกครั้งดีกว่า (ระยะเวลามากกว่า) All Marginal และค่ามัธยฐานของ All Best คือ 2.83 ส่วนค่ามัธยฐานของ All Marginal คือ 2.53 หลังจากนั้นต้องนำค่าที่ได้จากการทดลองไปหาอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ซึ่งถูกกำหนดไว้ว่าอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25:1 ซึ่งถ้าการทดสอบนัยสำคัญผ่าน ก็ถือว่าขั้นตอนกำหนดตัวแปร (Ball Park) เสร็จสิ้น แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ถูกต้องแล้ว ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่า D และ  $\bar{d}$  ได้ดังนี้

$$D = \text{ผลต่างของค่ามัธยฐานของ All Best กับค่ามัธยฐานของ All Marginal} = 2.83 - 2.53 = 0.3$$

$$\bar{d} = (\text{ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Best กับค่าที่น้อยที่สุดของ All Best} + \text{ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Marginal กับค่าที่น้อยที่สุดของ All Marginal}) / 2$$

$$= ((2.93 - 2.81) + (2.56 - 2.45)) / 2 = 0.115$$

ดังนั้นอัตราส่วน  $D : \bar{d} = 0.3 : 0.115$  หรือเท่ากับ 2.61 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ (A ถึง E) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

#### 5.4.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of Important and Unimportant Factors)

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญ และกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไป โดยเริ่มจากการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดตัวแปร A โดยตัวแปร A จะถูกกำหนดให้เป็นค่า Marginal (A คือ ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth) = 1 cm.) ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 5.3 ดังนี้

$$\text{Decision Limits} = \text{Median} \pm 2.776 \frac{\bar{d}}{1.81} \quad (5.3)$$

จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 2.53 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 2.35 \text{ ถึง } 2.71 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 2.83 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 2.65 \text{ ถึง } 3.01 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองจากครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ( $A_M R_B$ ) และผลจากการทดลองจากครั้งที่ 2 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Marginal ( $A_B R_M$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่จะเป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ

กรณีที่ 2 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ให้ผลตรงข้ามกันคือ  $A_M R_B$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ  $A_B R_M$  ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆตัดออกได้ทั้งหมด

กรณีที่ 3 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าตกออกนอก Decision Limits คือ  $A_M R_B$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_B R_M$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อสำหรับปัจจัยที่เหลือ คือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไป แต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลอง แสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

ดังนั้นจากผลการทดลองสำหรับตัวแปร A จะพบว่าเป็นไปตามกรณีที่ 1 คือค่าของ  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการทดลองต่อ โดยกรณีศึกษานี้ได้ทำการสรุปผลการทดลองของแต่ละสภาวะของตัวแปรแต่ละตัว (A-E) แล้วแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 5.5 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	2.68	2.83	2.65 to 3.01	A not significant
2	A <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	2.46	2.53	2.35 to 2.71	
3	B <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	2.53	2.83	2.65 to 3.01	B significant
4	B <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	2.75	2.53	2.35 to 2.71	
5	C <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	2.99	2.83	2.65 to 3.01	C not significant
6	C <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	2.50	2.53	2.35 to 2.71	
7	D <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	2.95	2.83	2.65 to 3.01	D not significant
8	D <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	2.51	2.53	2.35 to 2.71	
9	E <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	2.98	2.83	2.65 to 3.01	E not significant
10	E <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	2.41	2.53	2.35 to 2.71	

สรุปผลจากการทดลอง พบว่าตัวแปร A, C, D และ E มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นตัวแปร A, C, D และ E จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปร B มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits จึงสรุปได้ว่าตัวแปร B เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ

#### 5.4.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run)

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญจริง และยืนยันตัวแปรที่ไม่สำคัญเป็นตัวแปรที่ไม่สำคัญจริง ซึ่งจากกรณีศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญ มีแค่ 1 ตัวแปรเท่านั้น คือ ตัวแปร B ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดลองอีกครั้ง โดยกำหนดให้ครั้งที่ 1 ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal หลังจากนั้นทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best

จากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 5.3 จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 2.53 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 2.35 \text{ ถึง } 2.71 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 2.83 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 2.65 \text{ ถึง } 3.01 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A และตัวแปร B เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal (A<sub>B</sub>B<sub>B</sub>R<sub>M</sub>) และผลจากการทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร A และตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B เป็น ค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best ( $A_M B_M R_B$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.6 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$A_B B_B R_M$	2.61	2.83	2.65 to 3.01	AB not significant
2	$A_M B_M R_B$	2.76	2.53	2.35 to 2.71	
3	$B_B C_B R_M$	2.49	2.83	2.65 to 3.01	BC not significant
4	$B_M C_M R_B$	2.26	2.53	2.35 to 2.71	
5	$B_B D_B R_M$	2.53	2.83	2.65 to 3.01	BD not significant
6	$B_M D_M R_B$	2.28	2.53	2.35 to 2.71	
7	$B_B E_B R_M$	2.62	2.83	2.65 to 3.01	BE not significant
8	$B_M E_M R_B$	2.29	2.53	2.35 to 2.71	

จากการดำเนินการขั้นตอนที่ 3 คือ การยืนยันตัวแปร พบว่าไม่มีตัวแปรใดที่มีอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญ แสดงว่ามีเพียงตัวแปร B ที่มีนัยสำคัญ

#### 5.4.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis)

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วม ซึ่งจะเรียกว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 3 ว่า Pale Pink X โดยสำหรับกรณีนี้ได้ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้ว และเหลือตัวแปรที่สำคัญมากที่สุดเพียง 1 ตัวแปร คือ ตัวแปร B หรือเรียกว่า Red X จากนั้นให้นำค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำการทดลองมารอกลงในตารางเมตริกซ์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลักให้เป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งตารางเมตริกซ์ของตัวแปร B จะได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร

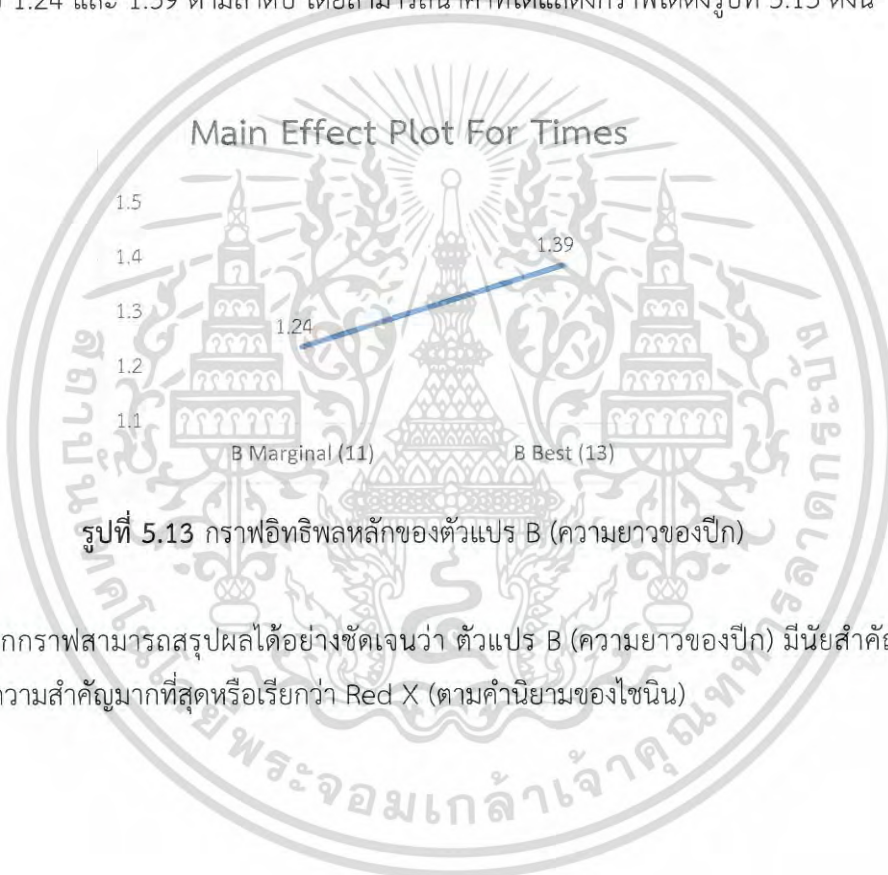
B Best			B Marginal		
2.68	2.95	2.61	2.46	2.51	2.76
2.99	2.83	2.49	2.50	2.56	2.26
2.98	2.93	2.53	2.41	2.53	2.28
2.75	2.81	2.62	2.53	2.45	2.29
Median = 2.78			Median = 2.48		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ตารางเมตริกซ์ที่สมบูรณ์พร้อมกับคำนวณหาค่ามัธยฐานแล้วให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร B ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Main Effect B} &= \text{ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานของ B Best กับค่ามัธยฐานของ B Marginal} \\ &\text{หาร 2} \\ &= (2.78 - 2.48) / 2 = 0.15 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำตัวแปร B ไปจัดทำกราฟของอิทธิพลหลักจากตารางที่ 5.7 นำค่ามัธยฐานของ B Marginal ซึ่งเท่ากับ 2.48 หารด้วย 2 และค่ามัธยฐานของ B Best ซึ่งเท่ากับ 2.78 หารด้วย 2 จะได้ค่าเท่ากับ 1.24 และ 1.39 ตามลำดับ โดยสามารถนำค่าที่ได้แสดงกราฟได้ดังรูปที่ 5.13 ดังนี้



รูปที่ 5.13 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก)

จากกราฟสามารถสรุปผลได้อย่างชัดเจนว่า ตัวแปร B (ความยาวของปีก) มีนัยสำคัญทางสถิติและมีความสำคัญมากที่สุดหรือเรียกว่า Red X (ตามคำนิยามของไชนิน)

## 5.5 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

ตารางที่ 5.8 แสดงระดับของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. A ความลึกของการตัดปีกเข้า (Cutting wing Depth)	1	2	cm.
2. B ความยาวของปีก (Wing Length)	11	13	cm.
3. C ความยาวของลำตัว (Body Length)	8	9	cm.
4. D ความกว้างของลำตัว (Body Width)	2	3	cm.
5. E ความลึกของการตัดลำตัวเข้า (Cutting body Depth)	0	1	cm.

การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้ มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 5 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Arrays) เป็น L16 ( $2^5$ ) เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 48 ครั้ง โดยสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าตอบสนองที่ตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal – the – best) ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 5.8 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^5$ )

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	1	11	8	2	0	2.46	2.38	2.38
2	1	11	8	3	1	2.58	2.61	2.73
3	1	11	9	2	1	2.68	2.45	2.63
4	1	11	9	3	0	2.26	2.45	2.63
5	1	13	8	2	1	2.75	2.65	2.65
6	1	13	8	3	0	2.76	3.11	2.91
7	1	13	9	2	0	2.63	2.88	2.88
8	1	13	9	3	1	2.86	3.26	3.5
9	2	11	8	2	1	2.58	2.70	2.65
10	2	11	8	3	0	2.46	2.35	2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^5$ )

Runs	A	B	C	D	E	Rep 1	Rep 2	Rep 3
11	2	11	9	2	0	2.40	2.58	2.55
12	2	11	9	3	1	2.43	2.30	2.36
13	2	13	8	2	0	2.51	2.45	2.61
14	2	13	8	3	1	3.05	3.08	3.00
15	2	13	9	2	1	2.70	2.90	2.85
16	2	13	9	3	0	2.51	2.66	2.63

### 5.5.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

Analysis of Variance for Means						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
A	1	0.039667	0.039667	0.039667	1.47	0.253
B	1	0.423584	0.423584	0.423584	15.71	0.003
C	1	0.000251	0.000251	0.000251	0.01	0.925
D	1	0.026951	0.026951	0.026951	1.00	0.341
E	1	0.118451	0.118451	0.118451	4.39	0.062
Residual Error	10	0.269585	0.269585	0.026958		
Total	15	0.878488				

รูปที่ 5.14 ข้อมูล ANOVA

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาทำการประมวลและวิเคราะห์ผล พบว่าตัวแปร B (ความยาวของปีก) มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ เนื่องจาก  $P\text{-value} < 0.05$  ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่มากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ

### 5.5.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Estimated Model Coefficients for Means				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.6619	0.04506	59.068	<0.001
B -1	-0.1627	0.04506	-3.611	0.003
S = 0.1803    R-Sq = 48.2%    R-Sq(adj) = 44.5%				

รูปที่ 5.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์รูปที่ 5.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 5.4 และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับปานกลาง ที่ 48.2%

$$Y = 2.6619 - 0.1627 B \quad (5.4)$$

เมื่อ  $Y$  = ระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ (Time)  
 $B$  = ความยาวของปีก (Wing Length)

### 5.5.3 การวิเคราะห์วิธีวิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

ค่าตอบสนองที่ตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal – the – best) คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratios สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 5.5

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (5.5)$$

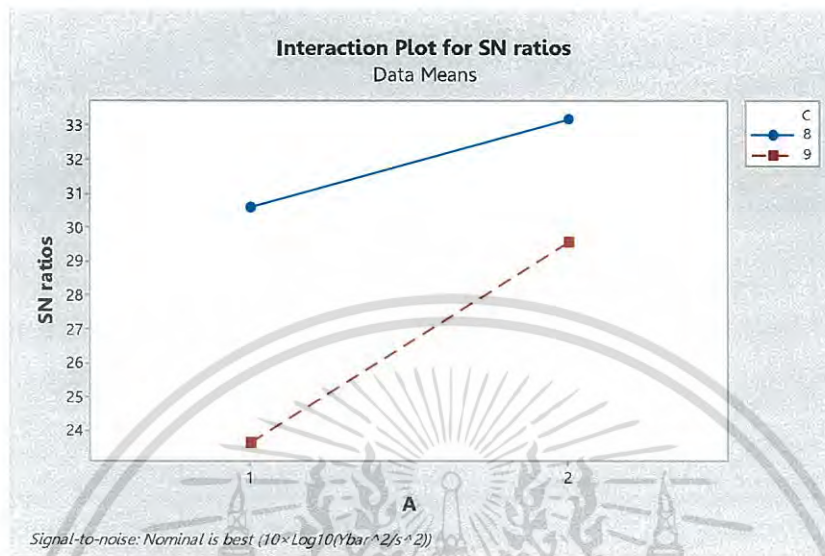
จากรูปที่ 5.16 ข้อมูล Signal-to-Noise Ratios พบว่าตัวแปร C (ความยาวของลำตัว) และตัวแปร A (ความลึกของการตัดปีกเข้า) มี Sensitivity สูงตามลำดับ ซึ่งตัวแปร B (ความยาวของปีก), ตัวแปร D (ความกว้างของลำตัว) และตัวแปร E (ความลึกของการตัดลำตัวเข้า) เป็น Robustness คือตัวแปรเหล่านี้มีสถานะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Nominal is best ( $10 \log_{10}(\bar{y}^2/s^2)$ )					
Level	A	B	C	D	E
1	27.16	29.83	31.91	29.96	28.49
2	31.40	28.73	26.65	28.60	30.07
Delta	4.25	1.10	5.27	1.37	1.57
Rank	2	5	1	4	3
Response Table for Means					
Level	A	B	C	D	E
1	2.712	2.499	2.658	2.621	2.576
2	2.612	2.825	2.666	2.703	2.748
Delta	0.100	0.325	0.008	0.082	0.172
Rank	3	1	5	4	2

รูปที่ 5.16 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่ตัวแปร A และ C พบว่าไม่เกิดอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร A และ C แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ C

จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศ จะได้ตัวแปร B (ความยาวของปีก) เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ย และจะได้ตัวแปร A (ความลึกของการตัดปีกเข้า) และตัวแปร C (ความยาวของลำตัว) เมื่อวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

5.6 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน วิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล

จากกรณีศึกษาเฮลิคอปเตอร์กระดาศ พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปร B (ความยาวของปีก) ที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปร B, D, BC, CD, ACDE, BCDE และ ABCDE ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 5.10

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบจุดเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 5.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาดอย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาดอย่างมีนัยสำคัญ							Signal-to-noise ratios	Linear Model
	B	D	BC	CD	ACDE	BCDE	ABCDE		
2 <sup>k</sup> Factorial Design	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
2 <sup>k-1</sup> Fractional Factorial Design	✓								✓
หลักการค้นหาตัวแปรของไซนิน	✓								
วิธีการทากูชิ	✓							✓	✓

วิธีการทากูชิ แสดงให้เห็นว่าตัวแปร B เป็น Robustness คือ ตัวแปรนี้มีสภาวะที่ทนต่อสภาพแวดล้อม และตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

ตารางที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไซนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (2<sup>k-1</sup> Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (2<sup>k</sup> Factorial Design)

หัวข้อที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการของทากูชิ	หลักการค้นหาตัวแปรของไซนิน	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล	การออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
เปอร์เซ็นต์จำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลงได้	48 ครั้ง (ลดลง 50%)	24 ครั้ง (ลดลง 75%)	48 ครั้ง (ลดลง 50%)	96 ครั้ง
ต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	ต่ำ	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	สูง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน ( $2^k$  Factorial Design)

หัวข้อที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการของทากูชิ	หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล	การออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
หลักการของการวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratios	ค่ามัธยฐาน (Median)	ANOVA	ANOVA
สมการถดถอย	มี	ไม่มี	มี	มี
ความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางสถิติ	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ตาราง ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ ANOVA)	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติโดยใช้ ANOVA)
ความเชื่อมั่นในทางสถิติ	สูง (ใช้ตาราง ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ตาราง ANOVA)	สูง (ใช้ตาราง ANOVA)
จำนวนตัวแปรที่เหมาะสมกับการทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัวแปรจำนวนมาก การทดลองก็ยิ่งน้อยอยู่ดี)	ปานกลาง	น้อย (เพราะ ยังมีจำนวนตัวแปรมาก การทดลองก็ยิ่งมาก)

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองวิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ วิธีการของไชนิน การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษาของเฮลิคอปเตอร์กระดาษ พบว่าการออกแบบการทดลองของทากูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้ใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล และได้ผลที่เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งมีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทากูชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพคทอเรียล ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทาคุชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแพคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบเชิงแพคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่าและไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา พบว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแพคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่มากขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อต้องการผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติเทียบเท่ากับการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แพคทอเรียล) และยังใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าสามารถนำวิธีการของทาคุชิมาประยุกต์ใช้ช่วยในการออกแบบการทดลอง ให้ง่าย สะดวกและมีประสิทธิภาพ

และสำหรับวิธีการของไชนิน ผู้ที่ทำการออกแบบการทดลองต้องเป็นผู้ที่คลุกคลีอยู่ในงานนั้นๆพอสมควร ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งสำหรับผู้ที่ไม่ได้ประสบการณ์ในงานประเภทนั้นๆ เนื่องจากยากในการกำหนดระดับของปัจจัยเป็นค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด



## บทที่ 6

### ผลการดำเนินงาน

#### (กรณีศึกษา : กระบวนการฉีดพลาสติก)

ผลการดำเนินงานเรื่องการศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ วิธีการของ ไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ( $2^{k-1}$  : Fractional Factorial Design)

#### 6.1 กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก

กรณีศึกษาที่ใช้ คือ กระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก ซึ่งกรณีศึกษานี้ เป็นปัญหาที่สามารถพบได้ในอุตสาหกรรม และทดลองกับจำนวนตัวแปรที่มากขึ้น  
วัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุด

1) ตัวแปรที่ควบคุมได้ 7 ตัวแปร และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร คือ

1.1) ตัวแปรที่ควบคุมได้ 7 ตัวแปร

A คือ เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)

B คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)

C คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

D คือ แรงอัดฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure profile value)

E คือ เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)

F คือ แรงอัดฉีดย้ำสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)

G คือ เวลาในการเย็นตัวของแม่พิมพ์ (Cooling time)

1.2) ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร

H คือ อุณหภูมิห้อง (Air temperature)

I คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Eject temperature)

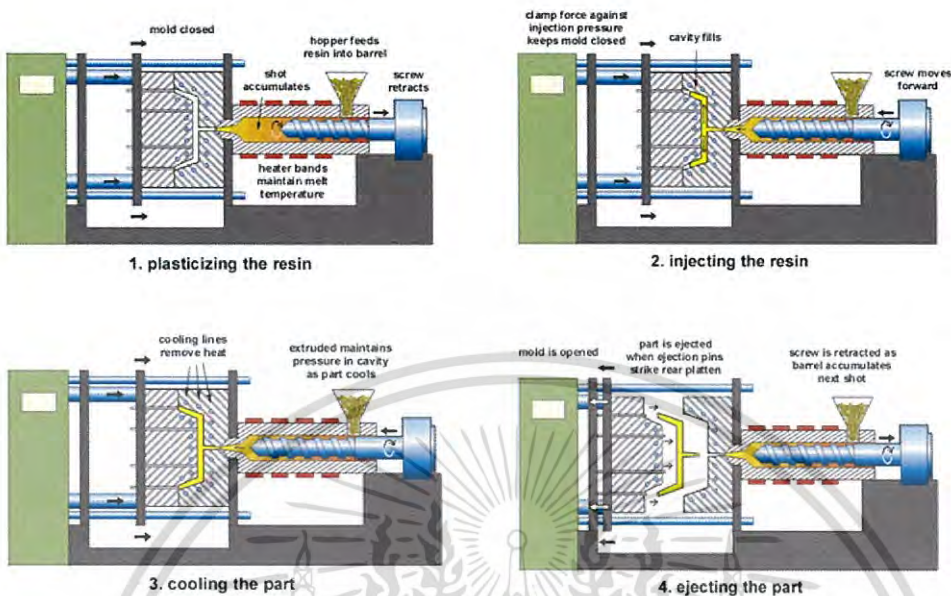
2) ตัวแปรตอบสนอง คือ

2.1) การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage)

2.2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก [29]

โดยทั่วไปแม่พิมพ์ฉีดจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ซึ่งประกอบกับเครื่องฉีด โดย 2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ ถูกทำการขึ้นรูปโพรงแบบตามชิ้นงานที่ทำการฉีด [29] ในการฉีดจะประกอบด้วยเครื่องมือและเครื่องจักรที่สำคัญ คือ แม่พิมพ์และเครื่องฉีดพลาสติก เม็ดพลาสติกจะถูกป้อนเข้าไปในกรวย สกรูส่งหรือก้านส่งจะพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกลงไปยังแม่พิมพ์ โดยผ่านตัวทำความร้อน ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดและพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกลงไปยังแม่พิมพ์โดยผ่านตัวทำความร้อน ที่ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นและปลดออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 6.1

จากรูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติกได้ดังนี้

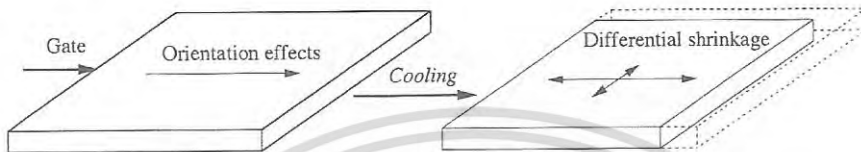
- 1) เป็นช่วงกระบวนการหลอมเหลวพลาสติกโดยสกรูจะหมุนและถอยหลังเพื่อให้ได้ปริมาตรในการฉีดชิ้นงานตามที่กำหนดไว้
- 2) เป็นช่วงกระบวนการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ และทำการฉีดอัดเพื่อรักษาความดัน โดยการรักษาความดันนี้เพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติก
- 3) เป็นช่วงกระบวนการหล่อเย็นชิ้นงานฉีดจนกระทั่งชิ้นงานฉีดมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิปลดชิ้นงาน
- 4) เป็นช่วงกระบวนการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

โดยภายหลังที่พลาสติกถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับการอัดตัวของความดันในโพรงแบบ นั่นคือผลกระทบหลักของการหดตัวและบิดงอของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกพิจารณาจากรูปที่ 6.2 และสามารถหาการหดตัวได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) ดังนั้นจึงหาอัตราการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้จาก

$$\text{ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (\%)} = \frac{\text{ขนาดของโพรงแบบ} - \text{ขนาดของชิ้นงานฉีด}}{\text{ขนาดของโพรงแบบ}} \times 100 \quad (6.1)$$



รูปที่ 6.2 พฤติกรรมหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก [30]

พฤติกรรมบดงของชิ้นงานฉีดพลาสติกพิจารณาจากรูปที่ 6.3 และสามารถหาการบดงได้ในหน่วยมิลลิเมตร (mm.) ดังนั้นจึงหาค่าการบดงของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้จาก

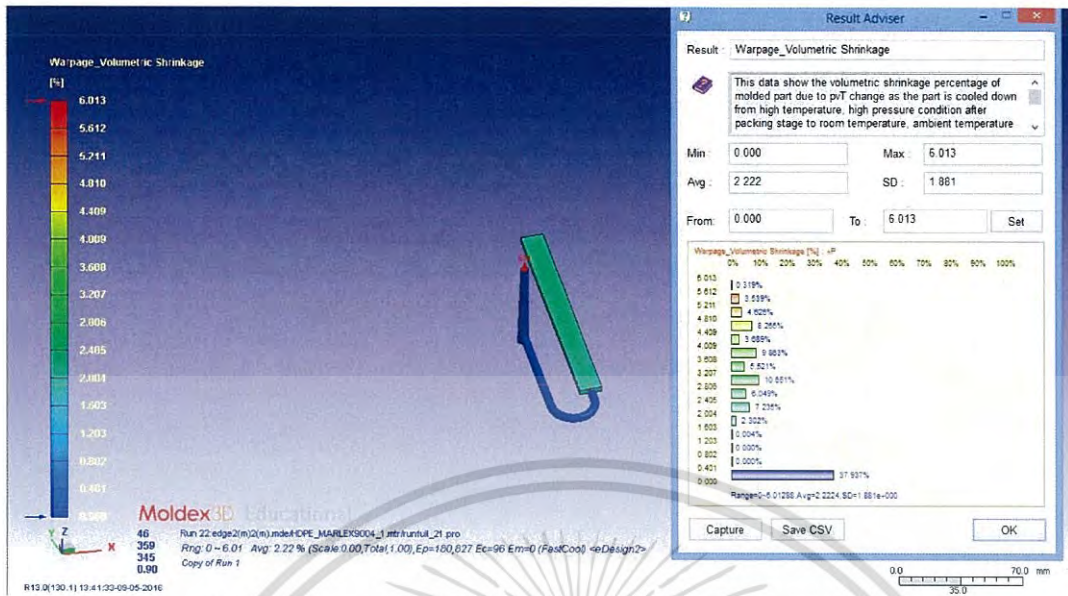
$$\text{ค่าการบดงของชิ้นงานฉีดพลาสติก (mm.)} = \text{ขนาดของโพรงแบบ} - \text{ขนาดของชิ้นงานฉีด} \quad (6.2)$$



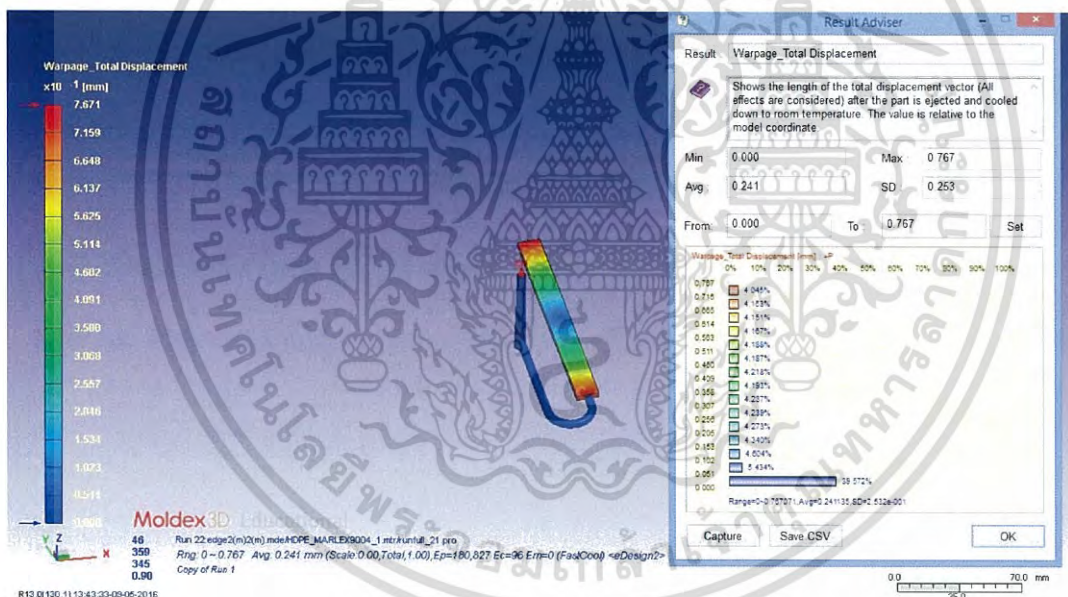
รูปที่ 6.3 พฤติกรรมบดงของชิ้นงานฉีดพลาสติก [31]

โดยในปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในการหาค่าที่ดีที่สุดในการออกแบบชิ้นงาน และค่าที่ดีที่สุดในการหดตัวและการบดงของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ สามารถแสดงดังรูปที่ 6.4 และ 6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (%) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก



รูปที่ 6.5 ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (mm.) โดยโปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก

หลังจากได้ทำการสร้างกรณีศึกษาการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลวิธีการไชนิน และวิธีการทากูชิแล้ว ในกรณีศึกษานี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนการวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design
- 2) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของไชนิน
- 3) การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูจิ วิธีการของไซนิน และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล

## 6.2 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ $2^{k-1}$ Fractional Factorial Design

### 6.2.1 รูปแบบการทดลองเป็นแบบ $2^{7-1}$ Fractional Factorial Design

ตารางที่ 6.1 ระดับของตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. เวลาในการฉีดพลาสติก (A)	2	3	sec.
2. อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (B)	215	230	°C
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (C)	35	60	°C
4. แรงอัดฉีดสูงสุด (D)	50	80	%
5. เวลาในการฉีดย้ำ (E)	4	6	sec.
6. แรงอัดฉีดย้ำสูงสุด (F)	30	50	%
7. เวลาในการหล่อเย็น (G)	12	14	sec.

#### Fractional Factorial Design

Factors:	7	Base Design:	7, 64	Resolution:	VII
Runs:	256	Replicates:	4	Fraction:	1/2
Blocks:	1	Center pts (total):	0		
Design Generators: G = ABCDEF					

รูปที่ 6.6 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial Design

จากรูปที่ 6.6 การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 7 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง 64 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 256 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้

ดังตารางที่ 6.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองของการหัตถ์ของชิ้นงานฉีดพลาสติก และการบดของชิ้นงานฉีดพลาสติกดังตารางที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ

### 6.2.1.1 การหัตถ์ของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การหัตถ์ของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ของการหัตถ์ชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	3	230	35	50	6	50	14	7.533	8.033	6.461	6.461
2	3	215	35	50	6	30	14	7.593	7.694	6.013	6.013
3	3	215	60	50	6	50	14	7.544	7.544	5.963	5.963
4	2	215	35	80	4	30	12	12.143	12.143	10.648	10.648
5	2	215	35	50	6	30	12	9.253	9.253	7.704	7.704
6	3	230	60	80	4	50	12	13.172	13.172	11.697	11.697
7	3	215	35	80	6	30	12	8.924	8.924	7.369	7.369
8	3	230	60	50	4	50	14	9.695	9.695	8.154	8.154
9	3	230	60	80	4	30	14	9.911	9.863	8.324	8.324
10	2	230	60	50	6	30	12	10.494	10.494	8.971	8.971
11	2	230	35	80	4	30	14	10.369	10.369	8.842	8.842
12	2	230	35	80	6	30	12	10.546	10.546	9.024	9.024
13	3	230	60	50	4	30	12	13.498	13.498	12.029	12.029
14	2	230	35	50	4	30	12	14.645	14.645	13.195	13.195
15	2	215	60	50	6	50	12	9.093	9.093	7.541	7.541
16	3	230	60	50	6	30	14	8.243	8.243	6.677	6.677
17	3	215	60	50	4	50	12	11.072	11.072	9.557	9.557
18	3	230	35	80	6	30	14	7.691	8.245	6.677	6.677
19	3	215	60	50	6	30	12	8.923	8.923	7.368	7.368
20	2	230	60	80	4	30	12	14.837	14.649	13.199	13.199
21	2	230	35	80	6	50	14	8.254	8.254	6.687	6.687
22	2	215	60	80	6	50	14	7.696	7.696	6.118	6.118
23	2	230	35	80	4	50	12	14.178	14.178	12.722	12.722
24	3	230	35	50	4	30	14	9.862	9.862	8.324	8.324
25	3	215	60	80	4	50	14	8.723	8.723	7.164	7.164
26	2	215	35	80	6	50	12	9.094	8.527	7.542	7.542
27	3	215	35	80	4	30	14	8.9	8.321	7.344	7.344
28	2	230	35	50	6	30	14	8.382	8.382	6.817	6.817
29	2	215	35	50	4	50	12	11.846	11.846	10.347	10.347
30	2	215	60	50	4	50	14	9.092	9.092	7.54	7.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ของการหดตัว  
ชั้นงานฉีดยาพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
31	3	230	35	50	6	30	12	10.107	10.107	8.592	8.592
32	2	230	35	50	4	50	14	9.408	10.133	8.602	8.602
33	3	215	35	50	4	50	14	8.723	8.723	7.164	7.164
34	2	230	60	50	4	50	12	14.182	14.182	12.727	12.727
35	3	215	35	50	4	30	12	11.439	11.439	9.931	9.931
36	2	215	35	80	6	30	14	7.769	7.769	6.193	6.193
37	3	230	60	80	6	50	14	8.031	8.031	6.459	6.459
38	3	215	35	80	4	50	12	11.071	11.071	9.556	9.556
39	2	215	60	50	6	30	14	7.769	7.769	6.192	6.192
40	3	230	35	80	4	50	14	9.695	9.695	8.154	8.154
41	3	230	35	50	4	50	12	13.17	13.17	11.695	11.695
42	2	215	60	80	4	30	14	9.225	9.225	7.675	7.675
43	2	230	60	50	6	50	14	8.254	8.254	6.687	6.687
44	3	230	35	80	4	30	12	13.496	13.496	12.027	12.027
45	3	215	35	50	6	50	12	8.816	8.816	7.259	7.259
46	2	215	60	50	4	30	12	12.341	12.341	10.65	10.65
47	2	230	35	50	6	50	12	10.213	10.213	8.683	8.683
48	3	215	60	50	4	30	14	8.9	8.9	7.344	7.344
49	2	230	60	80	6	30	14	11.444	8.381	6.816	6.816
50	2	215	35	80	4	50	14	8.528	9.092	7.54	7.54
51	3	230	60	50	6	50	12	9.773	9.773	8.234	8.234
52	3	215	60	80	4	30	12	11.44	11.44	9.932	9.932
53	2	215	35	50	6	50	14	7.697	7.697	6.119	6.119
54	2	230	60	80	6	50	12	10.213	10.213	8.683	8.683
55	3	230	35	80	6	50	12	9.774	9.774	8.236	8.236
56	2	215	60	80	6	30	12	9.252	9.252	7.703	7.703
57	3	215	35	80	6	50	14	7.545	7.545	5.964	5.964
58	2	230	60	80	4	50	14	10.135	10.135	8.602	8.602
59	2	215	35	50	4	30	14	9.225	9.225	7.675	7.675
60	3	230	60	80	6	30	12	10.105	10.105	8.591	8.591
61	2	215	60	80	4	50	12	11.848	11.006	10.349	10.349
62	3	215	60	80	6	50	12	8.814	8.814	7.257	7.257
63	2	230	60	50	4	30	14	10.37	10.37	8.842	8.842
64	3	215	60	80	6	30	14	7.592	7.592	6.012	6.012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การวิเคราะห์หวิธีทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 6.7

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	63	944.20	14.987	18.13	<0.001
Linear	7	867.65	123.949	149.97	<0.001
A	1	15.00	14.998	18.15	<0.001
B	1	106.57	106.566	128.93	<0.001
C	1	0.12	0.125	0.15	0.698
D	1	0.01	0.009	0.01	0.917
E	1	353.93	353.931	428.22	<0.001
F	1	4.54	4.540	5.49	0.020
G	1	387.48	387.477	468.81	<0.001
2-Way Interactions	21	72.27	3.442	4.16	<0.001
A*B	1	0.85	0.846	1.02	0.313
A*C	1	0.03	0.025	0.03	0.862
A*D	1	0.03	0.033	0.04	0.842
A*E	1	1.64	1.639	1.98	0.161
A*F	1	0.18	0.182	0.22	0.640
A*G	1	1.24	1.241	1.50	0.222
B*C	1	0.07	0.067	0.08	0.776
B*D	1	0.18	0.182	0.22	0.639
B*E	1	9.61	9.614	11.63	0.001
B*F	1	0.32	0.324	0.39	0.532
B*G	1	12.50	12.497	15.12	<0.001
C*D	1	0.07	0.068	0.08	0.774
C*E	1	0.03	0.034	0.04	0.839
C*F	1	0.03	0.027	0.03	0.858
C*G	1	0.15	0.148	0.18	0.672
D*E	1	0.05	0.049	0.06	0.807
D*F	1	0.04	0.036	0.04	0.835
D*G	1	0.05	0.049	0.06	0.808
E*F	1	0.08	0.079	0.10	0.758
E*G	1	44.92	44.918	54.35	<0.001
F*G	1	0.21	0.215	0.26	0.611
3-Way Interactions	35	4.28	0.122	0.15	1.000
A*B*C	1	0.03	0.032	0.04	0.843
A*B*D	1	0.12	0.117	0.14	0.707
A*B*E	1	0.00	0.002	0.00	0.956
A*B*F	1	0.03	0.026	0.03	0.859
A*B*G	1	0.04	0.042	0.05	0.822
A*C*D	1	0.00	0.004	0.00	0.946
A*C*E	1	0.02	0.024	0.03	0.866
A*C*F	1	0.01	0.008	0.01	0.922
A*C*G	1	0.04	0.036	0.04	0.835
A*D*E	1	0.03	0.031	0.04	0.846
A*D*F	1	0.16	0.160	0.19	0.660
A*D*G	1	0.09	0.094	0.11	0.736
A*E*F	1	0.00	0.001	0.00	0.980
A*E*G	1	0.84	0.837	1.01	0.315
A*F*G	1	0.02	0.020	0.02	0.877
B*C*D	1	0.01	0.007	0.01	0.924
B*C*E	1	0.03	0.030	0.04	0.850
B*C*F	1	0.02	0.019	0.02	0.879
B*C*G	1	0.05	0.050	0.06	0.807
B*D*E	1	0.00	0.003	0.00	0.949
B*D*F	1	0.00	0.001	0.00	0.975
B*D*G	1	0.04	0.040	0.05	0.825
B*E*F	1	0.11	0.109	0.13	0.717
B*E*G	1	2.11	2.109	2.55	0.112
B*F*G	1	0.04	0.043	0.05	0.819
C*D*E	1	0.03	0.034	0.04	0.839
C*D*F	1	0.20	0.204	0.25	0.620
C*D*G	1	0.00	0.001	0.00	0.978
C*E*F	1	0.01	0.014	0.02	0.897
C*E*G	1	0.01	0.005	0.01	0.937
C*F*G	1	0.02	0.017	0.02	0.885
D*E*F	1	0.02	0.021	0.03	0.872
D*E*G	1	0.03	0.034	0.04	0.838
D*F*G	1	0.00	0.001	0.00	0.968
E*F*G	1	0.10	0.103	0.12	0.725
Error	192	158.69	0.827		
Total	255	1102.89			

รูปที่ 6.7 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

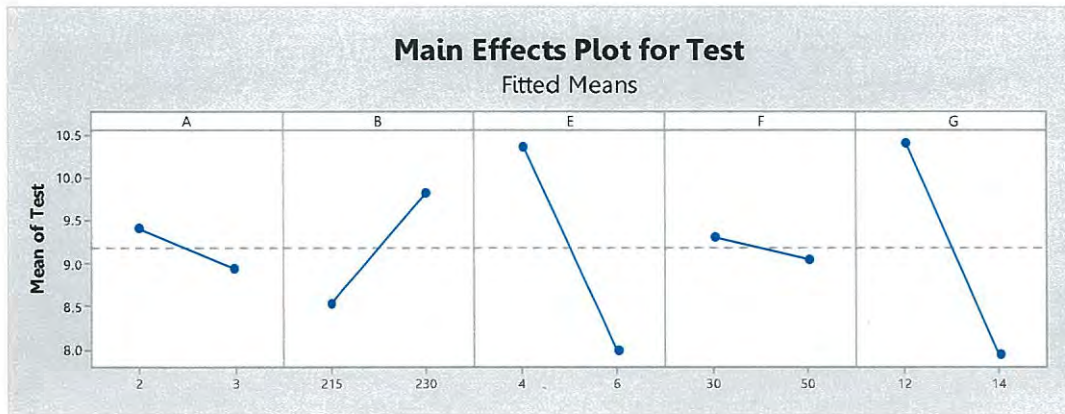
เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 6.8 พบว่าตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดน้ำ) มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุด ส่วนตัวแปรอื่นๆ คือ ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ E และ G ตัวแปร A (เวลาในการฉีดพลาสติก) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ G อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ E และตัวแปร F (แรงอัดฉีดน้ำสูงสุด) มีอิทธิพลตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 1.000 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับสูง ที่ 84.74%

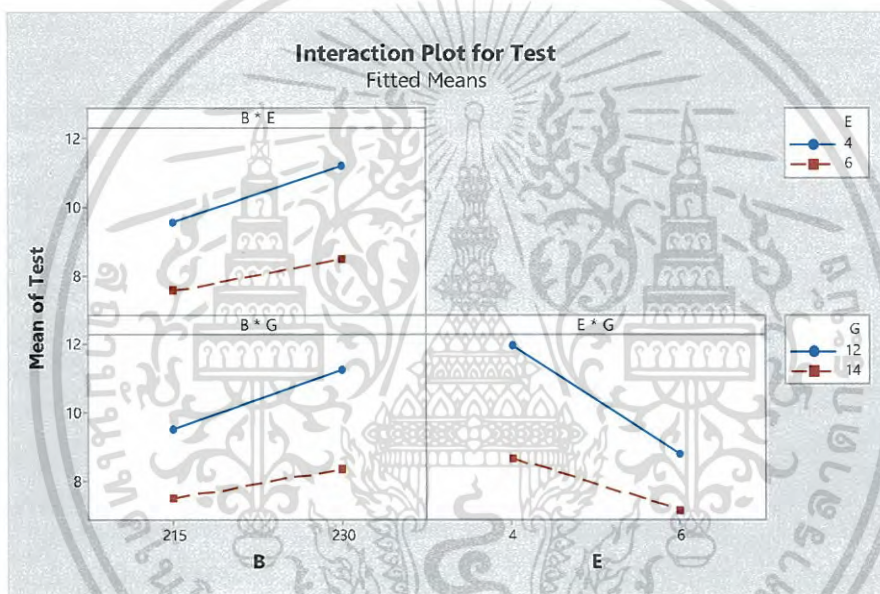
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	934.54	116.818	171.39	<0.001
Linear	5	867.51	173.502	254.56	<0.001
A	1	15.00	14.998	22.00	<0.001
B	1	106.57	106.566	156.35	<0.001
E	1	353.93	353.931	519.28	<0.001
F	1	4.54	4.540	6.66	0.010
G	1	387.48	387.477	568.49	<0.001
2-Way Interactions	3	67.03	22.343	32.78	<0.001
B*E	1	9.61	9.614	14.11	<0.001
B*G	1	12.50	12.497	18.33	<0.001
E*G	1	44.92	44.918	65.90	<0.001
Error	247	168.35	0.682		
Lack-of-Fit	55	9.66	0.176	0.21	1.000
Pure Error	192	158.69	0.827		
Total	255	1102.89			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.825581	84.74%	84.24%	83.60%		

รูปที่ 6.8 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

และสามารถแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ดังรูปที่ 6.9 และ 6.10



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร A, B, E, F และตัวแปร G



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BE, BG และตัวแปร EG

2) โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		9.1728	0.0516	177.77	<0.001	
A	-0.4841	-0.2420	0.0516	-4.69	<0.001	1.00
B	1.2904	0.6452	0.0516	12.50	<0.001	1.00
E	-2.3516	-1.1758	0.0516	-22.79	<0.001	1.00
F	-0.2663	-0.1332	0.0516	-2.58	0.010	1.00
G	-2.4606	-1.2303	0.0516	-23.84	<0.001	1.00
B*E	-0.3876	-0.1938	0.0516	-3.76	<0.001	1.00
B*G	-0.4419	-0.2209	0.0516	-4.28	<0.001	1.00
E*G	0.8378	0.4189	0.0516	8.12	<0.001	1.00

รูปที่ 6.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.11 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_1 = 9.1728 - 0.2420 A + 0.6452 B - 1.1758 E - 0.1332 F - 1.2303 G - 0.1938 B^*E - 0.2209 B^*G + 0.4189 E^*G \quad (6.3)$$

เมื่อ  $Y_1$  = ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage (%))

A = เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)

B = อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melt temperature)

E = เวลาในการฉีดเข้า (Packing time)

F = แรงอัดฉีดเข้าสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)

G = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

#### 6.2.1.2 การบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ของการบดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	3	230	35	50	6	50	14	1.038	1.124	0.782	0.782
2	3	215	35	50	6	30	14	1.11	1.118	0.767	0.767
3	3	215	60	50	6	50	14	1.12	1.12	0.776	0.776
4	2	215	35	80	4	30	12	1.304	1.304	0.965	0.965
5	2	215	35	50	6	30	12	1.191	1.191	0.85	0.85
6	3	230	60	80	4	50	12	1.327	1.327	0.989	0.989
7	3	215	35	80	6	30	12	1.181	1.181	0.84	0.84
8	3	230	60	50	4	50	14	1.199	1.199	0.859	0.859
9	3	230	60	80	4	30	14	1.135	1.2	0.86	0.86
10	2	230	60	50	6	30	12	1.222	1.222	0.881	0.881
11	2	230	35	80	4	30	14	1.218	1.218	0.877	0.877
12	2	230	35	80	6	30	12	1.223	1.223	0.882	0.882
13	3	230	60	50	4	30	12	1.328	1.328	0.989	0.989
14	2	230	35	50	4	30	12	1.36	1.36	1.022	1.022
15	2	215	60	50	6	50	12	1.197	1.197	0.856	0.856

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ของการบดบอ  
ชั้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
16	3	230	60	50	6	30	14	1.131	1.131	0.789	0.789
17	3	215	60	50	4	50	12	1.279	1.279	0.939	0.939
18	3	230	35	80	6	30	14	1.043	1.131	0.789	0.789
19	3	215	60	50	6	30	12	1.18	1.18	0.839	0.839
20	2	230	60	80	4	30	12	1.361	1.359	1.021	1.021
21	2	230	35	80	6	50	14	1.133	1.133	0.791	0.791
22	2	215	60	80	6	50	14	1.123	1.123	0.78	0.78
23	2	230	35	80	4	50	12	1.358	1.358	1.02	1.02
24	3	230	35	50	4	30	14	1.201	1.201	0.86	0.86
25	3	215	60	80	4	50	14	1.177	1.177	0.836	0.836
26	2	215	35	80	6	50	12	1.197	1.11	0.856	0.856
27	3	215	35	80	4	30	14	1.177	1.092	0.836	0.836
28	2	230	35	50	6	30	14	1.132	1.132	0.79	0.79
29	2	215	35	50	4	50	12	1.305	1.305	0.966	0.966
30	2	215	60	50	4	50	14	1.193	1.193	0.852	0.852
31	3	230	35	50	6	30	12	1.211	1.211	0.87	0.87
32	2	230	35	50	4	50	14	1.119	1.216	0.875	0.875
33	3	215	35	50	4	50	14	1.178	1.178	0.837	0.837
34	2	230	60	50	4	50	12	1.357	1.357	1.019	1.019
35	3	215	35	50	4	30	12	1.282	1.282	0.943	0.943
36	2	215	35	80	6	30	14	1.116	1.116	0.774	0.774
37	3	230	60	80	6	50	14	1.123	1.123	0.781	0.781
38	3	215	35	80	4	50	12	1.279	1.279	0.94	0.94
39	2	215	60	50	6	30	14	1.116	1.116	0.774	0.774
40	3	230	35	80	4	50	14	1.2	1.2	0.859	0.859
41	3	230	35	50	4	50	12	1.328	1.328	0.989	0.989
42	2	215	60	80	4	30	14	1.189	1.189	0.848	0.848
43	2	230	60	50	6	50	14	1.132	1.132	0.79	0.79
44	3	230	35	80	4	30	12	1.329	1.329	0.99	0.99
45	3	215	35	50	6	50	12	1.189	1.189	0.847	0.847
46	2	215	60	50	4	30	12	1.303	1.303	0.964	0.964
47	2	230	35	50	6	50	12	1.22	1.22	0.88	0.88
48	3	215	60	50	4	30	14	1.177	1.177	0.835	0.835
49	2	230	60	80	6	30	14	1.441	1.132	0.79	0.79
50	2	215	35	80	4	50	14	1.107	1.193	0.852	0.852
51	3	230	60	50	6	50	12	1.205	1.205	0.864	0.864
52	3	215	60	80	4	30	12	1.282	1.282	0.942	0.942
53	2	215	35	50	6	50	14	1.123	1.123	0.781	0.781
54	2	230	60	80	6	50	12	1.219	1.219	0.879	0.879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 (ต่อ) ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-1}$  ของการบดอง  
ชั้นงานฉีตพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
55	3	230	35	80	6	50	12	1.206	1.206	0.865	0.865
56	2	215	60	80	6	30	12	1.191	1.191	0.85	0.85
57	3	215	35	80	6	50	14	1.12	1.12	0.776	0.776
58	2	230	60	80	4	50	14	1.215	1.215	0.875	0.875
59	2	215	35	50	4	30	14	1.189	1.189	0.848	0.848
60	3	230	60	80	6	30	12	1.21	1.21	0.87	0.87
61	2	215	60	80	4	50	12	1.304	1.215	0.965	0.965
62	3	215	60	80	6	50	12	1.189	1.189	0.846	0.846
63	2	230	60	50	4	30	14	1.217	1.217	0.877	0.877
64	3	215	60	80	6	30	14	1.109	1.109	0.767	0.767



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การวิเคราะห์หวิธีทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป สามารถแสดงดังรูปที่ 6.12

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	63	1.35785	0.021553	0.56	0.996
Linear	7	1.27068	0.181526	4.70	<0.001
A	1	0.01816	0.018158	0.47	0.494
B	1	0.06169	0.061690	1.60	0.208
C	1	0.00143	0.001435	0.04	0.847
D	1	0.00000	0.000001	0.00	0.996
E	1	0.53582	0.535824	13.86	<0.001
F	1	0.00071	0.000709	0.02	0.892
G	1	0.65286	0.652864	16.89	<0.001
2-Way Interactions	21	0.06675	0.003179	0.08	1.000
A*B	1	0.00280	0.002796	0.07	0.788
A*C	1	0.00038	0.000375	0.01	0.922
A*D	1	0.00038	0.000375	0.01	0.922
A*E	1	0.00041	0.000410	0.01	0.918
A*F	1	0.00206	0.002059	0.05	0.818
A*G	1	0.00000	0.000003	0.00	0.993
B*C	1	0.00045	0.000452	0.01	0.914
B*D	1	0.00194	0.001936	0.05	0.823
B*E	1	0.00457	0.004573	0.12	0.731
B*F	1	0.00133	0.001332	0.03	0.853
B*G	1	0.00666	0.006663	0.17	0.679
C*D	1	0.00032	0.000315	0.01	0.928
C*E	1	0.00081	0.000805	0.02	0.885
C*F	1	0.00009	0.000090	0.00	0.962
C*G	1	0.00190	0.001903	0.05	0.825
D*E	1	0.00075	0.000749	0.02	0.889
D*F	1	0.00010	0.000100	0.00	0.959
D*G	1	0.00041	0.000405	0.01	0.919
E*F	1	0.00007	0.000066	0.00	0.967
E*G	1	0.04131	0.041311	1.07	0.303
F*G	1	0.00003	0.000032	0.00	0.977
3-Way Interactions	35	0.02042	0.000583	0.02	1.000
A*B*C	1	0.00031	0.000306	0.01	0.929
A*B*D	1	0.00164	0.001640	0.04	0.837
A*B*E	1	0.00067	0.000670	0.02	0.895
A*B*F	1	0.00003	0.000030	0.00	0.978
A*B*G	1	0.00009	0.000088	0.00	0.962
A*C*D	1	0.00020	0.000203	0.01	0.942
A*C*E	1	0.00010	0.000098	0.00	0.960
A*C*F	1	0.00006	0.000056	0.00	0.970
A*C*G	1	0.00039	0.000385	0.01	0.921
A*D*E	1	0.00010	0.000103	0.00	0.959
A*D*F	1	0.00258	0.002576	0.07	0.797
A*D*G	1	0.00175	0.001754	0.05	0.832
A*E*F	1	0.00001	0.000007	0.00	0.989
A*E*G	1	0.00189	0.001892	0.05	0.825
A*F*G	1	0.00072	0.000722	0.02	0.891
B*C*D	1	0.00002	0.000015	0.00	0.984
B*C*E	1	0.00077	0.000770	0.02	0.888
B*C*F	1	0.00011	0.000108	0.00	0.958
B*C*G	1	0.00048	0.000484	0.01	0.911
B*D*E	1	0.00005	0.000046	0.00	0.973
B*D*F	1	0.00017	0.000172	0.00	0.947
B*D*G	1	0.00046	0.000462	0.01	0.913
B*E*F	1	0.00123	0.001225	0.03	0.859
B*E*G	1	0.00134	0.001341	0.03	0.852
B*F*G	1	0.00130	0.001296	0.03	0.855
C*D*E	1	0.00070	0.000702	0.02	0.893
C*D*F	1	0.00113	0.001131	0.03	0.864
C*D*G	1	0.00006	0.000064	0.00	0.968
C*E*F	1	0.00034	0.000342	0.01	0.925
C*E*G	1	0.00003	0.000035	0.00	0.976
C*F*G	1	0.00009	0.000086	0.00	0.963
D*E*F	1	0.00032	0.000315	0.01	0.928
D*E*G	1	0.00074	0.000736	0.02	0.890
D*F*G	1	0.00018	0.000182	0.00	0.945
E*F*G	1	0.00038	0.000375	0.01	0.922
Error	192	7.42330	0.038663		
Total	255	8.78114			

รูปที่ 6.12 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

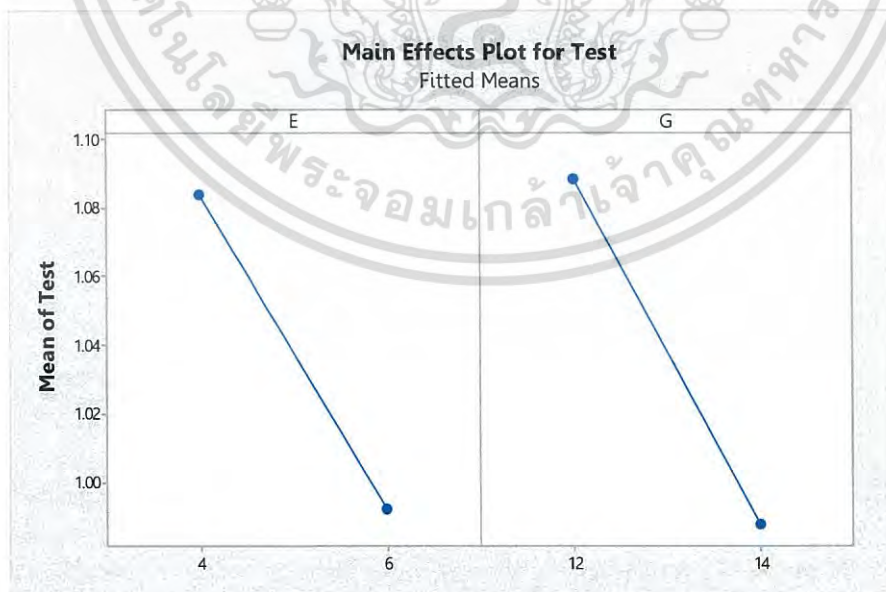
เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 6.13 พบว่าตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้า) มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 1.000 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับต่ำ ที่ 13.54%

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	2	1.1887	0.594344	19.81	<0.001
Linear	2	1.1887	0.594344	19.81	<0.001
E	1	0.5358	0.535824	17.86	<0.001
G	1	0.6529	0.652864	21.76	<0.001
Error	253	7.5925	0.030010		
Lack-of-Fit	61	0.1692	0.002773	0.07	1.000
Pure Error	192	7.4233	0.038663		
Total	255	8.7811			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
0.173233	13.54%	12.85%	11.47%		

รูปที่ 6.13 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

และสามารถแสดงอิทธิพลหลัก ดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้า) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1.0380	0.0108	95.87	<0.001	
E	-0.0915	-0.0458	0.0108	-4.23	<0.001	1.00
G	-0.1010	-0.0505	0.0108	-4.66	<0.001	1.00

รูปที่ 6.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.15 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_2 = 1.0380 - 0.0458 E - 0.0505 G \quad (6.4)$$

เมื่อ  $Y_2$  = ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement (mm.))  
 E = เวลาในการฉีดอัด (Packing time)  
 G = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

6.2.2 รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design

Fractional Factorial Design			
Factors:	7	Base Design:	7, 16
Runs:	64	Replicates:	4
Blocks:	1	Center pts (total):	0
Design Generators:		E = ABC, F = BCD, G = ACD	
		Resolution:	IV
		Fraction:	1/8

รูปที่ 6.16 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design

จากรูปที่ 6.16 การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 7 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลอง 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 64 ครั้ง ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังตารางที่ 6.1 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองของการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกและการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกดังตารางที่ 6.4 และ 6.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.2.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-3}$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-3}$  ของการหัดตัวชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	2	215	35	50	4	30	12	11.773	11.773	10.272	10.272
2	3	215	35	50	6	30	14	7.593	7.694	6.013	6.013
3	2	230	35	50	6	50	12	10.213	10.213	8.683	8.683
4	3	230	35	50	4	50	14	9.695	9.695	8.154	8.154
5	2	215	60	50	6	50	14	7.683	7.683	6.105	6.105
6	3	215	60	50	4	50	12	11.072	11.072	9.557	9.557
7	2	230	60	50	4	30	14	10.370	10.370	8.842	8.842
8	3	230	60	50	6	30	12	10.105	10.105	8.591	8.591
9	2	215	35	80	4	50	14	8.528	9.092	7.540	7.540
10	3	215	35	80	6	50	12	8.816	8.816	7.259	7.259
11	2	230	35	80	6	30	14	8.291	8.291	6.724	6.724
12	3	230	35	80	4	30	12	13.496	13.496	12.027	12.027
13	2	215	60	80	6	30	12	9.252	9.252	7.703	7.703
14	3	215	60	80	4	30	14	8.900	8.900	7.344	7.344
15	2	230	60	80	4	50	12	14.087	14.087	12.631	12.631
16	3	230	60	80	6	50	14	8.031	8.031	6.459	6.459

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป สามารถแสดงดังรูปที่ 6.17

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	226.021	15.0680	19.41	<0.001
Linear	7	210.010	30.0015	38.64	<0.001
A	1	2.114	2.1145	2.72	0.105
B	1	26.668	26.6682	34.35	<0.001
C	1	0.109	0.1093	0.14	0.709
D	1	0.422	0.4220	0.54	0.465
E	1	85.556	85.5556	110.20	<0.001
F	1	0.407	0.4069	0.52	0.473
G	1	94.734	94.7337	122.02	<0.001
2-Way Interactions	7	15.978	2.2826	2.94	0.012
A*B	1	0.035	0.0351	0.05	0.832
A*C	1	3.433	3.4331	4.42	0.041
A*D	1	0.010	0.0102	0.01	0.909
A*E	1	0.343	0.3432	0.44	0.509
A*F	1	3.611	3.6114	4.65	0.036
A*G	1	0.153	0.1532	0.20	0.659
B*D	1	8.392	8.3919	10.81	0.002
3-Way Interactions	1	0.032	0.0323	0.04	0.839
A*B*D	1	0.032	0.0323	0.04	0.839
Error	48	37.266	0.7764		
Total	63	263.286			

รูปที่ 6.17 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูป

เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 6.18 พบว่าตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) ตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้ำ) ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ E และ G (ซึ่งเป็นโครงสร้าง Aliases ของ BD + CF + EG) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ G (ซึ่งเป็นโครงสร้าง Aliases ของ AF + BG + DE) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ E (ซึ่งเป็นโครงสร้าง Aliases ของ AC + BE + DG) มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.980 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับสูง ที่ 85.63%

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	225.447	22.5447	31.58	<0.001
Linear	7	210.010	30.0015	42.02	<0.001
A	1	2.114	2.1145	2.96	0.091
B	1	26.668	26.6682	37.35	<0.001
C	1	0.109	0.1093	0.15	0.697
D	1	0.422	0.4220	0.59	0.445
E	1	85.556	85.5556	119.83	<0.001
F	1	0.407	0.4069	0.57	0.454
G	1	94.734	94.7337	132.69	<0.001
2-Way Interactions	3	15.436	5.1455	7.21	<0.001
A*C	1	3.433	3.4331	4.81	0.033
A*F	1	3.611	3.6114	5.06	0.029
B*D	1	8.392	8.3919	11.75	0.001
Error	53	37.840	0.7140		
Lack-of-Fit	5	0.574	0.1148	0.15	0.980
Pure Error	48	37.266	0.7764		
Total	63	263.286			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.844961	85.63%	82.92%	79.04%

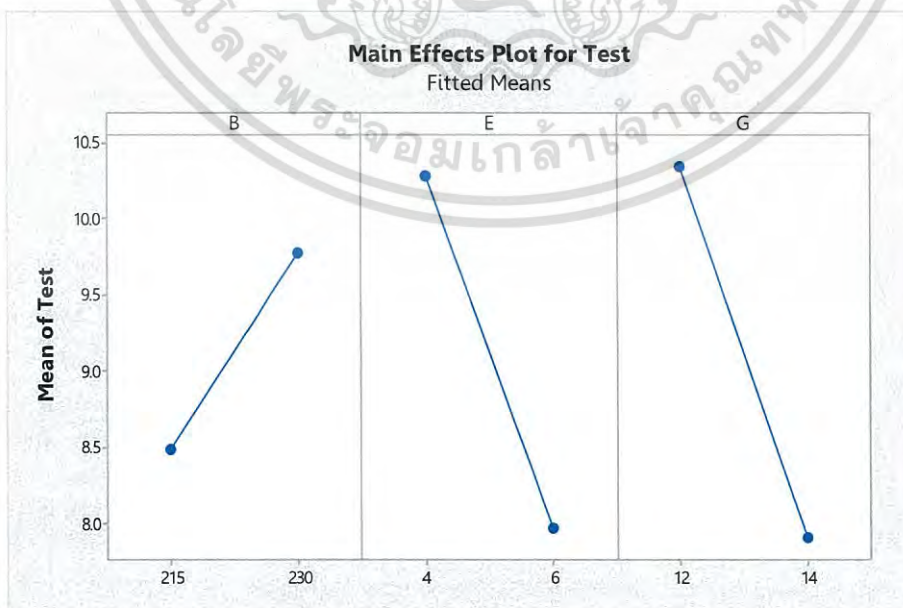
Aliases

I

A + BCE + BFG + CDG + DEF  
 B + ACE + AFG + CDF + DEG  
 C + ABE + ADG + BDF + EFG  
 D + ACG + AEF + BCF + BEG  
 E + ABC + ADF + BDG + CFG  
 F + ABG + ADE + BCD + CEG  
 G + ABF + ACD + BDE + CEF  
 AC + BE + DG  
 AF + BG + DE  
 BD + CF + EG

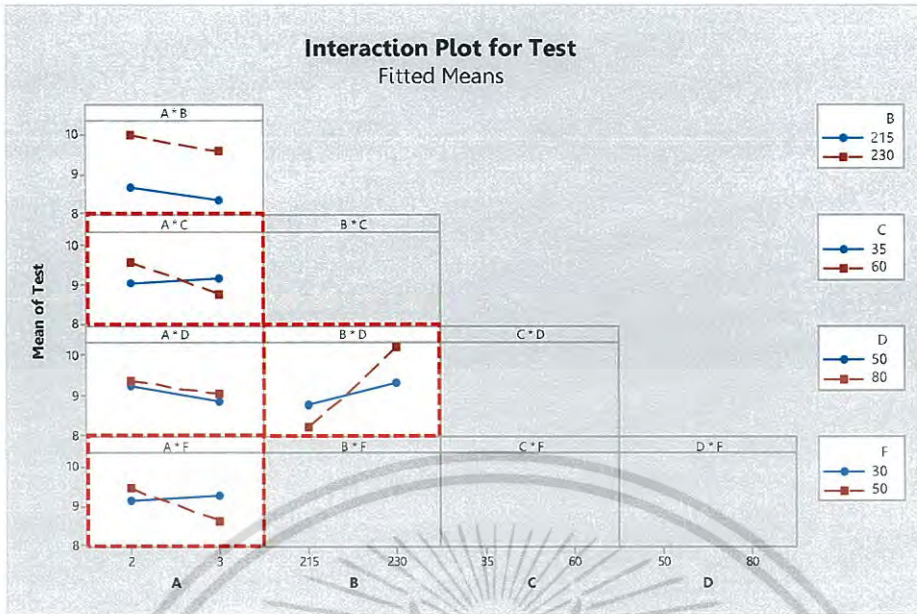
รูปที่ 6.18 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

โดยสามารถแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ดังรูปที่ 6.19 และ 6.20



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B, E และ G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร AC, AF และตัวแปร BD

2) โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		9.129	0.106	86.44	<0.001	
A	-0.364	-0.182	0.106	-1.72	0.091	1.00
B	1.291	0.646	0.106	6.11	<0.001	1.00
C	0.083	0.041	0.106	0.39	0.697	1.00
D	0.162	0.081	0.106	0.77	0.445	1.00
E	-2.312	-1.156	0.106	-10.95	<0.001	1.00
F	-0.159	-0.080	0.106	-0.75	0.454	1.00
G	-2.433	-1.217	0.106	-11.52	<0.001	1.00
A*C	-0.463	-0.232	0.106	-2.19	0.033	1.00
A*F	-0.475	-0.238	0.106	-2.25	0.029	1.00
B*D	0.724	0.362	0.106	3.43	0.001	1.00

รูปที่ 6.21 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.21 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_1 = 9.129 - 0.182 A + 0.646 B + 0.041 C + 0.081 D - 1.156 E - 0.080 F - 1.217 G - 0.232 A*C - 0.238 A*F + 0.362 B*D \tag{6.5}$$

เมื่อ  $Y_1$  = ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage (%))

A = เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- B = อุณหภูมิพลาสติกไหลอมเหลว (Melt temperature)  
 C = อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)  
 D = แรงอัดฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure profile value)  
 E = เวลาในการฉีดเข้า (Packing time)  
 F = แรงอัดฉีดเข้าสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)  
 G = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

### 6.2.2.2 การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-3}$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.5 ผลการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์  $2^{7-3}$  ของการบิดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	2	215	35	50	4	30	12	1.304	1.304	0.965	0.965
2	3	215	35	50	6	30	14	1.110	1.118	0.767	0.767
3	2	230	35	50	6	50	12	1.220	1.220	0.880	0.880
4	3	230	35	50	4	50	14	1.200	1.200	0.859	0.859
5	2	215	60	50	6	50	14	1.127	1.127	0.783	0.783
6	3	215	60	50	4	50	12	1.279	1.279	0.939	0.939
7	2	230	60	50	4	30	14	1.217	1.217	0.877	0.877
8	3	230	60	50	6	30	12	1.210	1.210	0.870	0.870
9	2	215	35	80	4	50	14	1.107	1.193	0.852	0.852
10	3	215	35	80	6	50	12	1.189	1.189	0.847	0.847
11	2	230	35	80	6	30	14	1.138	1.138	0.796	0.796
12	3	230	35	80	4	30	12	1.329	1.329	0.990	0.990
13	2	215	60	80	6	30	12	1.191	1.191	0.850	0.850
14	3	215	60	80	4	30	14	1.177	1.177	0.835	0.835
15	2	230	60	80	4	50	12	1.358	1.358	1.020	1.020
16	3	230	60	80	6	50	14	1.123	1.123	0.781	0.781

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 6.22

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	15	0.33657	0.022438	0.59	0.871	
Linear	7	0.32196	0.045994	1.20	0.320	
A	1	0.00300	0.002998	0.08	0.781	
B	1	0.01556	0.015563	0.41	0.527	
C	1	0.00009	0.000086	0.00	0.962	
D	1	0.00001	0.000014	0.00	0.985	
E	1	0.13414	0.134139	3.50	0.067	
F	1	0.00003	0.000033	0.00	0.977	
G	1	0.16913	0.169127	4.42	0.041	
2-Way Interactions	7	0.01373	0.001961	0.05	1.000	
A*B	1	0.00030	0.000298	0.01	0.930	
A*C	1	0.00248	0.002475	0.06	0.800	
A*D	1	0.00016	0.000163	0.00	0.948	
A*E	1	0.00016	0.000163	0.00	0.948	
A*F	1	0.00101	0.001008	0.03	0.872	
A*G	1	0.00016	0.000163	0.00	0.948	
B*D	1	0.00946	0.009458	0.25	0.621	
3-Way Interactions	1	0.00089	0.000885	0.02	0.880	
A*B*D	1	0.00089	0.000885	0.02	0.880	
Error	48	1.83818	0.038295			
Total	63	2.17475				

รูปที่ 6.22 ข้อมูล ANOVA แบบเต็มรูปแบบ

เมื่อทำการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว ดังรูปที่ 6.23 พบว่าตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดน้ำ) มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value < 0.05

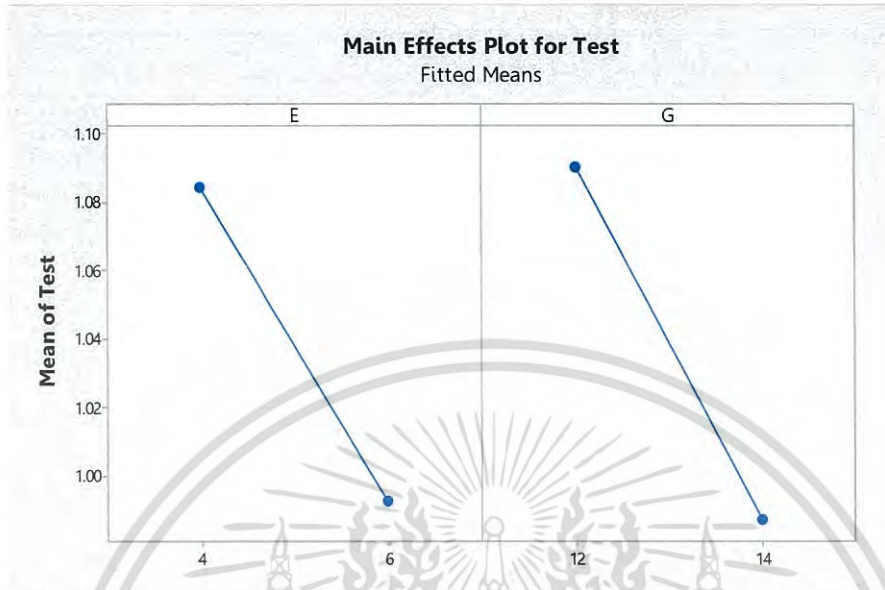
และเมื่อพิจารณาจาก Lack-of-Fit ที่มีค่า P-value เท่ากับ 1.000 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการถดถอย (Regression) ที่ได้จะมีความเหมาะสม และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับต่ำที่ 13.94%

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	2	0.30327	0.151633	4.94	0.010	
Linear	2	0.30327	0.151633	4.94	0.010	
E	1	0.13414	0.134139	4.37	0.041	
G	1	0.16913	0.169127	5.51	0.022	
Error	61	1.87149	0.030680			
Lack-of-Fit	13	0.03330	0.002562	0.07	1.000	
Pure Error	48	1.83818	0.038295			
Total	63	2.17475				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.175157	13.94%	11.12%	5.27%		

รูปที่ 6.23 ข้อมูล ANOVA แบบลดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแสดงอิทธิพลหลัก ดังรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด)

2) โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		1.0387	0.0219	47.44	<0.001		
E	-0.0916	-0.0458	0.0219	-2.09	0.041	1.00	
G	-0.1028	-0.0514	0.0219	-2.35	0.022	1.00	

รูปที่ 6.25 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.25 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_2 = 1.0387 - 0.0458 E - 0.0514 G \tag{6.6}$$

- เมื่อ  $Y_2$  = ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement (mm.))
- $E$  = เวลาในการฉีดอัด (Packing time)
- $G$  = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการของไซนิน

### 6.3.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

#### 6.3.1.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park)

มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปร ที่นำมาทดลองมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลอง โดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y (กรณีนี้ Green Y หมายถึง ค่าตอบสนอง (Y) คือ การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก) และทำการวิเคราะห์กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อ Green Y

หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าให้ตัวแปรเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) ซึ่งในกรณีศึกษา นี้ หมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกน้อยที่สุด และค่าที่แย่มากที่สุด (Marginal Level; M) ซึ่งในกรณีศึกษา นี้จะหมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุด โดยทำการทดลองที่ค่าที่ดีที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) และค่าที่แย่มากที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) จากการทดลอง 3 ครั้ง สำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้ง สำหรับค่าที่แย่มากที่สุด ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 กำหนดตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-) Marginal Level	High (+) Best Level	
1. A เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)	2	3	sec.
2. B อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melt temperature)	230	215	°C
3. C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	60	35	°C
4. D แรงอัดฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure profile value)	50	80	%
5. E เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)	4	6	sec.
6. F แรงอัดฉีดย้ำสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)	30	50	%
7. G เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	12	14	sec.
ผลการทดลองครั้งที่ 1	14.661	5.964	%
ผลการทดลองครั้งที่ 2	14.649	7.545	%
ผลการทดลองครั้งที่ 3	13.199	5.964	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่า All Best ทุกครั้งดีกว่า (การหัดตัวน้อยกว่า) All Marginal และค่ามัธยฐานของ All Best คือ 5.964 ส่วนค่ามัธยฐานของ All Marginal คือ 14.649 หลังจากนั้นต้องนำค่าที่ได้จากการทดลองไปหาอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ซึ่งถูกกำหนดไว้ว่าอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25:1 ซึ่งถ้าการทดสอบนัยสำคัญผ่าน ก็ถือว่าขั้นตอนกำหนดตัวแปร (Ball Park) เสร็จสิ้น แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ถูกต้องแล้ว ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่า D และ  $\bar{d}$  ได้ดังนี้

$$D = \text{ผลต่างของค่ามัธยฐานของ All Best กับค่ามัธยฐานของ All Marginal} \\ = |5.964 - 14.649| = 8.685$$

$$\bar{d} = (\text{ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Best กับค่าที่น้อยที่สุดของ All Best} + \text{ผลต่าง} \\ \text{ของค่าที่มากที่สุดของ All Marginal กับค่าที่น้อยที่สุดของ All Marginal}) / 2 \\ = ((7.545 - 5.964) + (14.661 - 13.199)) / 2 = 1.5215$$

ดังนั้นอัตราส่วน  $D : \bar{d} = 8.685 : 1.5215$  หรือเท่ากับ 5.71 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ (A ถึง G) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

### 6.3.1.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of important and unimportant factors)

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญ และกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไป โดยเริ่มจากการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดตัวแปร A โดยตัวแปร A จะถูกกำหนดให้เป็นค่า Marginal (A คือ เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time) = 2 sec.) ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ทั้งหมด

หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 6.7 ดังนี้

$$\text{Decision Limits} = \text{Median} \pm 2.776 \frac{\bar{d}}{1.81} \quad (6.7)$$

จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\text{Decision Limits (Low sides)} = 14.649 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ = 12.315 \text{ ถึง } 16.983$$

$$\text{Decision Limits (High sides)} = 5.964 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ = 3.630 \text{ ถึง } 8.298$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองจากครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ( $A_M R_B$ ) และผลจากการทดลองจากครั้งที่ 2 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Best

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Marginal ( $A_B R_M$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่จะเป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ

กรณีที่ 2 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ให้ผลตรงข้ามกันคือ  $A_M R_B$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ  $A_B R_M$  ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆ ตัดออกได้ทั้งหมด

กรณีที่ 3 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าตกออกนอก Decision Limits คือ  $A_M R_B$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_B R_M$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อสำหรับปัจจัยที่เหลือ คือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไป แต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลอง แสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

ดังนั้นจากผลการทดลองสำหรับตัวแปร A จะพบว่าเป็นไปตามกรณีที่ 1 คือค่าของ  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการทดลองต่อ โดยกรณีศึกษาี้ได้ทำการสรุปผลการทดลองของแต่ละสภาวะของตัวแปรแต่ละตัว (A-G) แล้วแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 6.7 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$A_M R_B$	7.745	5.964	3.630 to 8.298	A not significant
2	$A_B R_M$	13.498	14.649	12.315 to 16.983	
3	$B_M R_B$	6.461	5.964	3.630 to 8.298	B not significant
4	$B_B R_M$	12.341	14.649	12.315 to 16.983	significant
5	$C_M R_B$	7.544	5.964	3.630 to 8.298	C not significant
6	$C_B R_M$	14.645	14.649	12.315 to 16.983	
7	$D_M R_B$	5.964	5.964	3.630 to 8.298	D not significant
8	$D_B R_M$	13.199	14.649	12.315 to 16.983	significant
9	$E_M R_B$	8.723	5.964	3.630 to 8.298	E significant
10	$E_B R_M$	8.971	14.649	12.315 to 16.983	
11	$F_M R_B$	7.593	5.964	3.630 to 8.298	F not significant
12	$F_B R_M$	14.182	14.649	12.315 to 16.983	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 (ต่อ) จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
13	$G_M R_B$	8.816	5.964	3.630 to 8.298	G significant
14	$G_B R_M$	8.842	14.649	12.315 to 16.983	

สรุปผลจากผลการทดลอง พบว่าตัวแปร A, B, C, D และ F มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นตัวแปร A, B, C, D และ F จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปร E และ G มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits จึงสรุปได้ว่าตัวแปร E และ G เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ

### 6.3.1.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run)

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญจริง และยืนยันตัวแปรที่ไม่สำคัญเป็นตัวแปรที่ไม่สำคัญจริง ซึ่งจากกรณีศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญ มี 2 ตัวแปร คือ ตัวแปร E และ G ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดลองอีกครั้ง โดยกำหนดให้ครั้งที่ 1 ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal หลังจากนั้นทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best

จากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 6.7

จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 14.649 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 12.315 \text{ ถึง } 16.983 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 5.964 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 3.630 \text{ ถึง } 8.298 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal ( $E_B G_B R_M$ ) และผลจากการทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร E และตัวแปร G เป็น ค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best ( $E_M G_M R_B$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.8 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$E_B G_B R_M$	6.816	5.964	3.630 to 8.298	EG significant
2	$E_M G_M R_B$	11.071	14.649	12.315 to 16.983	

จากผลการทดลองพบว่า  $E_B G_B R_M$  มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นตัวแปร E จึงมีอิทธิพลร่วมกับตัวแปร G ดังนั้นจึงมีตัวแปร E, G และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G ที่มีนัยสำคัญ

#### 6.3.1.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis)

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วม ซึ่งจะเรียกว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 3 ว่า Pale Pink X โดยสำหรับกรณีนี้ได้ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้ว และเหลือตัวแปรที่สำคัญมากที่สุดเพียง 2 ตัวแปร คือตัวแปร E และตัวแปร G จากนั้นให้นำค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำการทดลองมารอกลงในตารางเมตริกซ์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมให้เป็นไปได้ง่ายขึ้น ดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร

	E Best		E Marginal	
G Best	7.745	6.816	8.723	
	6.461	5.964	8.842	
	7.544	7.545		
	5.964	5.964		
	7.593			
	Median = 6.816		Median = 8.783	
G Marginal	8.971		13.498	11.071
	8.816		12.341	14.661
			14.645	14.649
			13.199	13.199
			14.182	
	Median = 8.894		Median = 13.498	

E Best	= 6.816+8.894	= 15.710	G Best	= 6.816+8.783	= 15.599
E Marginal	= 8.783+13.498	= 22.281	G Marginal	= 8.894+13.498	= 22.392
$E_B G_B - E_M G_M$	= 6.816+13.498	= 20.314	$E_M G_B - E_B G_M$	= 8.783+8.894	= 17.677

เมื่อได้ตารางเมตริกซ์ที่สมบูรณ์พร้อมทั้งคำนวณหาค่ามัธยฐานแล้วให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร E, G และอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร E และ G ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main Effect E = ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานของ E Best กับค่ามัธยฐานของ E Marginal

หาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\begin{aligned} \text{Main Effect E} &= \frac{|[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_B G_M)] - [\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_M G_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[15.710 - 22.281]|}{2} \\ &= 3.286 \end{aligned}$$

และค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร G ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Main Effect G} &= \frac{|[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_B)] - [\text{Median}(E_B G_M) + \text{Median}(E_M G_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[15.599 - 22.392]|}{2} \\ &= 3.397 \end{aligned}$$

เมื่อได้ทำการคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร E และตัวแปร G แล้ว หลังจากนั้นให้ทำการคำนวณหาค่าอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร E และ G ได้ ดังนี้

EG Interaction = ผลต่างระหว่างผลรวมของค่ามัธยฐานของ E Best G Best กับ E Marginal G Marginal กับผลรวมของค่ามัธยฐานของ E Marginal G Best กับ E Best G Marginal หาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\begin{aligned} \text{EG Interaction} &= \frac{|[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_M)] - [\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_B G_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[20.314 - 17.677]|}{2} \\ &= 1.319 \end{aligned}$$

สามารถสรุปผลจากการวิเคราะห์ตัวแปรได้ว่าตัวแปร G มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X ซึ่งมีค่าคือเท่ากับ 3.397 และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับ 2 คือ ตัวแปร E โดยมีค่าเท่ากับ 3.286 หรือเรียกว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอันดับสุดท้าย คือ การเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร E และ G โดยมีค่าเท่ากับ 1.319 หรือเรียกว่า Pale Pink X

หลังจากนั้นนำตัวแปร E และตัวแปร G ไปจัดทำกราฟของอิทธิพลหลักและจัดทำกราฟอิทธิพลร่วมสำหรับตัวแปร E และ G ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) กราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปร E

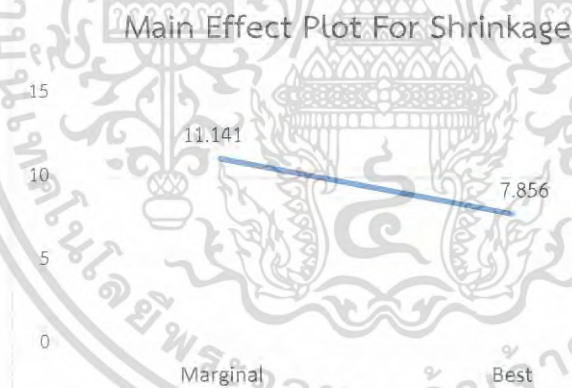
จากตารางที่ 6.9 นำค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Best ซึ่งเท่ากับ 8.783 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 13.498 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_M G_M)}{2} \\ &= \frac{8.783 + 13.498}{2} \\ &= 11.141 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Best ซึ่งเท่ากับ 6.816 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Best และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 8.894 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_B G_M)}{2} \\ &= \frac{6.816 + 8.894}{2} \\ &= 7.856 \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้า)

## 2) กราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปร G

จากตารางที่ 6.9 นำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 8.894 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 13.498 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_B G_M) + \text{Median}(E_M G_M)}{2} \\ &= \frac{8.894 + 13.498}{2} \end{aligned}$$

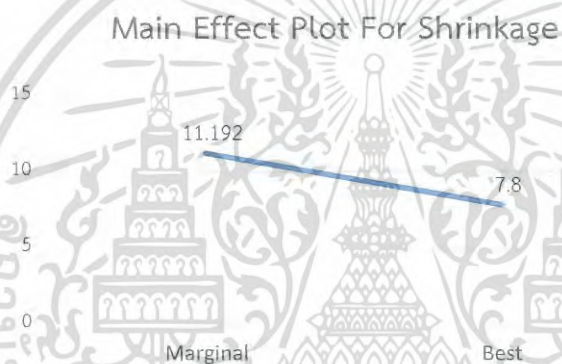
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 11.192$$

จากนั้นนำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Best ซึ่งเท่ากับ 6.816 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Best ซึ่งเท่ากับ 8.783 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_B)}{2} \\ &= \frac{6.816 + 8.783}{2} \\ &= 7.800 \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 6.27



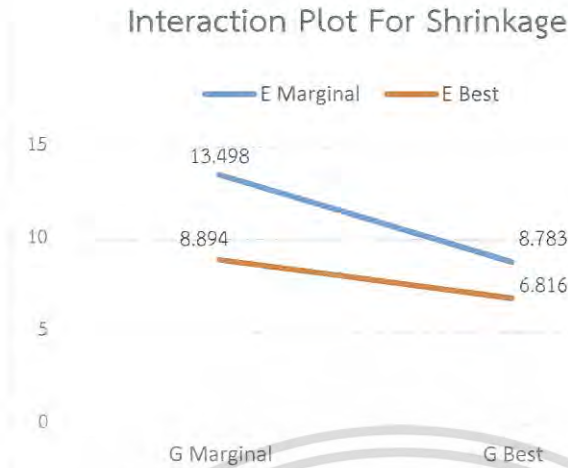
รูปที่ 6.27 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)

3) กราฟของอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

นำค่ามัธยฐานทั้ง 4 ค่า จากตาราง 6.9 มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 6.28

- E Marginal G Marginal = 13.498
- E Best G Marginal = 8.894
- E Marginal G Best = 8.783
- E Best G Best = 6.816

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

จากกราฟข้างต้นแสดงอย่างชัดเจนว่าตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

### 6.3.2 การบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

#### 6.3.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร (Ball Park)

มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปร ที่นำมาทดลองมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลอง โดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y (กรณีนี้ Green Y หมายถึง ค่าตอบสนอง (Y) คือ การบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก) และทำการวิเคราะห์กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อ Green Y

หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าให้ตัวแปรเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) ซึ่งในกรณีศึกษานี้หมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกน้อยที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด (Marginal Level; M) ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะหมายถึงค่าของชุดตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกมากที่สุด โดยทำการทดลองที่ค่าที่ดีที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) และค่าที่แย่ที่สุด (จำนวน 3 ครั้ง) จากการทดลอง 3 ครั้ง สำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้ง สำหรับค่าที่แย่ที่สุด ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 กำหนดตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-) Marginal Level	High (+) Best Level	
1. A เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time)	2	3	sec.
2. B อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melt temperature)	230	215	°C
3. C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	60	35	°C
4. D แรงอัดฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure profile value)	50	80	%
5. E เวลาในการฉีดย้า (Packing time)	4	6	sec.
6. F แรงอัดฉีดย้าสูงสุด (Maximum packing pressure profile value)	30	50	%
7. G เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	12	14	sec.
ผลการทดลองครั้งที่ 1	1.358	0.776	mm.
ผลการทดลองครั้งที่ 2	1.359	1.120	mm.
ผลการทดลองครั้งที่ 3	1.021	0.776	mm.

จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่า All Best ทุกครั้งดีกว่า (การบิดงอน้อยกว่า) All Marginal และค่ามัธยฐานของ All Best คือ 0.776 ส่วนค่ามัธยฐานของ All Marginal คือ 1.358 หลังจากนั้นต้องนำค่าที่ได้จากการทดลองไปหาอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ซึ่งถูกกำหนดไว้ว่าอัตราส่วน  $D : \bar{d}$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25:1 ซึ่งถ้าการทดสอบนี้สำคัญผ่าน ก็ถือว่าขั้นตอนกำหนดตัวแปร (Ball Park) เสร็จสิ้น แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ถูกต้องแล้ว ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่า  $D$  และ  $\bar{d}$  ได้ดังนี้

$D$  = ผลต่างของค่ามัธยฐานของ All Best กับค่ามัธยฐานของ All Marginal

$$= |0.776 - 1.358| = 0.582$$

$\bar{d}$  = (ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Best กับค่าน้อยที่สุดของ All Best + ผลต่างของค่าที่มากที่สุดของ All Marginal กับค่าน้อยที่สุดของ All Marginal) / 2

$$= ((1.120 - 0.776) + (1.359 - 1.021)) / 2 = 0.341$$

ดังนั้นอัตราส่วน  $D : \bar{d} = 0.582 : 0.341$  หรือเท่ากับ 1.70 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่าตัวแปรที่เลือกไว้ (A ถึง G) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

### 6.3.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย (Separation of important and unimportant factors)

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญ และกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไป โดยเริ่มจากการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดตัวแปร A โดยตัวแปร A จะถูกกำหนดให้เป็นค่า Marginal (A คือ เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling time) = 2 sec.) ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ทั้งหมด

หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 6.7

จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 1.358 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 0.835 \text{ ถึง } 1.881 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 0.776 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 0.253 \text{ ถึง } 1.299 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองจากครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Best ( $A_M R_B$ ) และผลจากการทดลองจากครั้งที่ 2 คือ ตัวแปร A เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่า Marginal ( $A_B R_M$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่จะเป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ

กรณีที่ 2 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ให้ผลตรงข้ามกันคือ  $A_M R_B$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ  $A_B R_M$  ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆ ตัดออกได้ทั้งหมด

กรณีที่ 3 ถ้า  $A_M R_B$  และ  $A_B R_M$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าตกออกนอก Decision Limits คือ  $A_M R_B$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_B R_M$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่ไม่ได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อสำหรับปัจจัยที่เหลือ คือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไป แต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลอง แสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

ดังนั้นจากผลการทดลองสำหรับตัวแปร A จะพบว่าเป็นไปตามกรณีที่ 1 คือค่าของ  $A_M R_B$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_B R_M$  อยู่ใน Decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ จึงทำการทดลองต่อ โดยกรณีศึกษานี้ได้ทำการสรุปผลการทดลองของแต่ละสภาวะของตัวแปรแต่ละตัว (A-G) แล้วแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 6.11 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$A_M R_B$	1.124	0.776	0.253 to 1.299	A not significant
2	$A_B R_M$	1.328	1.358	0.835 to 1.881	
3	$B_M R_B$	0.782	0.776	0.253 to 1.299	B not significant
4	$B_B R_M$	0.964	1.358	0.835 to 1.881	
5	$C_M R_B$	1.120	0.776	0.253 to 1.299	C not significant
6	$C_B R_M$	1.36	1.358	0.835 to 1.881	
7	$D_M R_B$	0.776	0.776	0.253 to 1.299	D not significant
8	$D_B R_M$	1.021	1.358	0.835 to 1.881	
9	$E_M R_B$	1.178	0.776	0.253 to 1.299	E not significant
10	$E_B R_M$	0.881	1.358	0.835 to 1.881	
11	$F_M R_B$	1.110	0.776	0.253 to 1.299	F not significant
12	$F_B R_M$	1.357	1.358	0.835 to 1.881	
13	$G_M R_B$	1.189	0.776	0.253 to 1.299	G not significant
14	$G_B R_M$	0.877	1.358	0.835 to 1.881	

สรุปผลจากผลการทดลอง พบว่าตัวแปร A, B, C, D, E, F และ G มีผลลัพธ์ที่อยู่ใน Decision Limits ดังนั้นไม่มีตัวแปรใดๆเลยที่มีนัยสำคัญ

### 6.3.2.3 ขั้นตอนที่ 3 : ยืนยันตัวแปร (Capping Run)

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญจริง และยืนยันตัวแปรที่ไม่สำคัญเป็นตัวแปรที่ไม่สำคัญจริง ซึ่งจากกรณีศึกษานี้พบว่าไม่มีตัวแปรใดๆเลยที่มีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากในการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage) พบอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G จึงทำการทดสอบนี้ในการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement) ด้วย ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดลองอีกครั้ง โดยกำหนดให้ครั้งที่ 1 ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal หลังจากนั้นทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best

จากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ (Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides)) โดยใช้สูตรที่ 6.7 จากสูตรเมื่อลองทำการแทนค่าจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (Low sides)} &= 1.358 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 0.835 \text{ ถึง } 1.881 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Decision Limits (High sides)} &= 0.776 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 \\ &= 0.253 \text{ ถึง } 1.299 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำผลจากการทดลองครั้งที่ 1 คือ ตัวแปร E และตัวแปร G เป็นค่า Best ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Marginal ( $E_B G_B R_M$ ) และผลจากการทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ตัวแปร E และตัวแปร G เป็น ค่า Marginal ส่วนตัวแปรที่เหลือเป็นค่า Best ( $E_M G_M R_B$ ) มาทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ Decision Limits (High sides) และ Decision Limits (Low sides) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.12 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	$E_B G_B R_M$	0.790	0.776	0.253 to 1.299	EG significant
2	$E_M G_M R_B$	1.279	1.358	0.835 to 1.881	

จากการดำเนินการขั้นตอนที่ 3 พบว่า  $E_B G_B R_M$  และ  $E_M G_M R_B$  มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นตัวแปร E จึงมีอิทธิพลร่วมกับตัวแปร G ดังนั้นอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G มีนัยสำคัญ

#### 6.3.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร (Factorial Analysis)

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วม ซึ่งจะเรียกว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 3 ว่า Pale Pink X โดยสำหรับกรณีนี้ได้ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้ว พบว่าอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงมีเพียง 2 ตัวแปร คือ ตัวแปร E และตัวแปร G โดยการนำค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำการทดลองมารอกลงในตารางเมตริกซ์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมให้ เป็นไปได้ง่ายขึ้น ดังตารางที่ 6.13

ตารางที่ 6.13 ตารางเมตริกซ์ในการวิเคราะห์ตัวแปร

	E Best		E Marginal	
G Best	1.124	0.776	1.178	
	0.782	1.120	0.877	
	1.120	0.776		
	0.776	0.790		
	1.110			
	Median = 0.790		Median = 1.028	
G Marginal	0.881		1.328	1.358
	1.189		0.964	1.359
			1.360	1.021
			1.021	1.279
			1.357	
	Median = 1.035		Median = 1.328	

E Best = 0.790+1.035 = 1.825	G Best = 0.790+1.028 = 1.818
E Marginal = 1.028+1.328 = 2.356	G Marginal = 1.035+1.328 = 2.363
$E_B G_B - E_M G_M = 0.790+1.328 = 2.118$	$E_M G_B - E_B G_M = 1.028+1.035 = 2.063$

เมื่อได้ตารางเมตริกซ์ที่สมบูรณ์พร้อมทั้งคำนวณหาค่ามัธยฐานแล้วให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร E, G และอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร E และ G ได้ ดังนี้

Main Effect E = ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานของ E Best กับค่ามัธยฐานของ E Marginal  
หาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\begin{aligned} \text{Main Effect E} &= \frac{|[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_B G_M)] - [\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_M G_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[1.825 - 2.356]|}{2} \\ &= 0.266 \end{aligned}$$

และค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร G ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Main Effect G} &= \frac{|[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_B)] - [\text{Median}(E_B G_M) + \text{Median}(E_M G_M)]|}{2} \\ &= \frac{|[1.818 - 2.363]|}{2} \\ &= 0.273 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ทำการคำนวณหาค่าอิทธิพลหลักของตัวแปร E และตัวแปร G แล้ว หลังจากนั้นให้ทำการคำนวณหาค่าอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร E และ G ได้ ดังนี้

EG Interaction = ผลต่างระหว่างผลรวมของค่ามัธยฐานของ E Best G Best กับ  
E Marginal G Marginal กับ ผลรวมของค่ามัธยฐานของ E Marginal  
G Best กับ E Best G Marginal ทหาร 2

หรือสามารถสรุปเป็นสูตรได้คือ

$$\begin{aligned} \text{EG Interaction} &= \frac{[\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_M)] - [\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_B G_M)]}{2} \\ &= \frac{|[2.118 - 2.063]|}{2} \\ &= 0.028 \end{aligned}$$

สามารถสรุปผลจากการวิเคราะห์ตัวแปรได้ว่าตัวแปร G มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X ซึ่งมีค่าคือเท่ากับ 0.273 และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับ 2 คือ ตัวแปร E โดยมีค่าเท่ากับ 0.266 หรือเรียกว่า Pink X และตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอันดับสุดท้าย คือ การเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร E และ G โดยมีค่าเท่ากับ 0.028 หรือเรียกว่า Pale Pink X

หลังจากนั้นนำตัวแปร E และตัวแปร G ไปจัดทำกราฟของอิทธิพลและจัดทำกราฟอิทธิพลร่วม สำหรับตัวแปร E และ G ดังนี้

#### 1) กราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปร E

จากตารางที่ 6.13 นำค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Best ซึ่งเท่ากับ 1.028 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 1.328 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

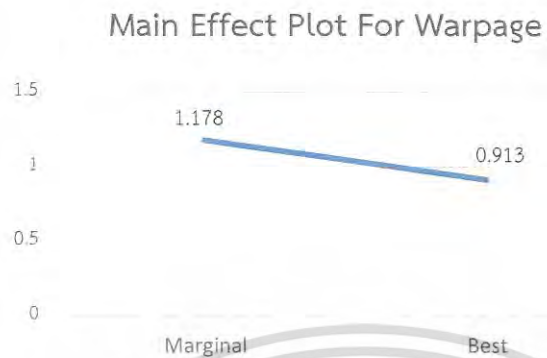
$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_M G_B) + \text{Median}(E_M G_M)}{2} \\ &= \frac{1.028 + 1.328}{2} \\ &= 1.178 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Best ซึ่งเท่ากับ 0.790 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Best และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 1.035 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_B G_M)}{2} \\ &= \frac{0.790 + 1.035}{2} \\ &= 0.913 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดยา)

2) กราฟของอิทธิพลหลักของตัวแปร G

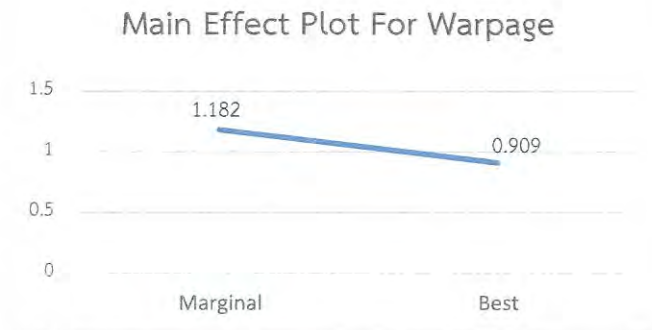
จากตารางที่ 6.13 นำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 1.035 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Marginal ซึ่งเท่ากับ 1.328 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Median}(E_B G_M) + \text{Median}(E_M G_M)}{2} \\
 &= \frac{1.035 + 1.328}{2} \\
 &= 1.182
 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่ามัธยฐานของ E Best และ G Best ซึ่งเท่ากับ 0.790 มาบวกกับค่ามัธยฐานของ E Marginal และ G Best ซึ่งเท่ากับ 1.028 แล้วหารด้วย 2 โดยสามารถแสดงเป็นสูตรคำนวณได้ คือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Median}(E_B G_B) + \text{Median}(E_M G_B)}{2} \\
 &= \frac{0.790 + 1.028}{2} \\
 &= 0.909
 \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 6.30

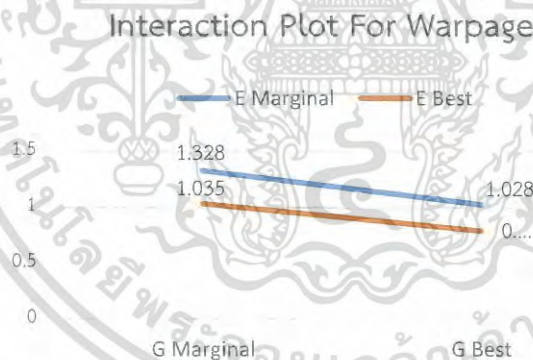


รูปที่ 6.30 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)

3) กราฟของอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

นำค่า Median ทั้ง 4 ค่า จากตาราง 6.13 มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 6.31

- E Marginal G Marginal = 1.328
- E Best G Marginal = 1.035
- E Marginal G Best = 1.028
- E Best G Best = 0.790



รูปที่ 6.31 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

จากกราฟข้างต้นแสดงอย่างชัดเจนว่า ตัวแปร E (เวลาในการฉีดน้ำ) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

## 6.4 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ

การทดลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์และระดับของตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว รวมถึงค่าตอบสนองที่ใช้ สำหรับกรณีศึกษานี้มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา 7 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรกำหนดให้มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Arrays) เป็น L16 ( $2^7$ ) เพราะฉะนั้นจึงมีจำนวนครั้งของการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ดังนั้นเท่ากับว่าจะมีการทดลองทั้งหมดจำนวน 64 ครั้ง โดยสำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้ค่าตอบสนองที่มีค่าน้อย (Smaller – the –better) ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ได้ดังตารางที่ 6.14 และ 6.15 และแสดงแผนการทดลอง และผลการทดลองดังตารางที่ 6.17 และ 6.18

ตารางที่ 6.14 แสดงระดับของตัวแปรควบคุมทั้ง 7 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. เวลาในการฉีดพลาสติก (A)	2	3	sec.
2. อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (B)	215	230	°C
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (C)	35	60	°C
4. แรงอัดฉีดสูงสุด (D)	50	80	%
5. เวลาในการฉีดยา (E)	4	6	sec.
6. แรงอัดฉีดยาสูงสุด (F)	30	50	%
7. เวลาในการหล่อเย็น (G)	12	14	sec.

ตารางที่ 6.15 แสดงระดับของตัวแปรควบคุมไม่ได้ 2 ตัวแปร

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
1. อุณหภูมิห้อง (H)	15	40	°C
2. อุณหภูมิปลัดขิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (I)	50	99	°C

โดยสำหรับการทดลองจะดำเนินการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ในสภาวะของตัวแปรควบคุมไม่ได้ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 6.16

ตารางที่ 6.16 การทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ในสภาวะของตัวแปรควบคุมไม่ได้ที่แตกต่างกัน

		อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ( I )	
		50 °C	99 °C
อุณหภูมิห้อง ( H )	15 °C	Replicate 1	Replicate 2
	40 °C	Replicate 3	Replicate 4

#### 6.4.1 การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 (2<sup>7</sup>) ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.17 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 (2<sup>7</sup>) ของการหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	2	215	35	50	4	30	12	12.1467	12.1467	10.6523	10.6523
2	2	215	35	80	4	50	14	8.5280	9.0920	7.5400	7.5400
3	2	215	60	50	6	30	14	7.7690	7.7690	6.1920	6.1920
4	2	215	60	80	6	50	12	9.0930	9.0930	7.5410	7.5410
5	2	230	35	50	6	50	12	10.2130	10.2130	8.6830	8.6830
6	2	230	35	80	6	30	14	8.4368	8.4368	6.8727	6.8727
7	2	230	60	50	4	50	14	10.1350	10.1350	8.6020	8.6020
8	2	230	60	80	4	30	12	14.8370	14.6490	13.1990	13.1990
9	3	215	35	50	6	50	14	7.5450	7.5450	5.9640	5.9640
10	3	215	35	80	6	30	12	8.9240	8.9240	7.3690	7.3690
11	3	215	60	50	4	50	12	11.0720	11.0720	9.5570	9.5570
12	3	215	60	80	4	30	14	8.9000	8.9000	7.3440	7.3440
13	3	230	35	50	4	30	14	9.8620	9.8620	8.3240	8.3240
14	3	230	35	80	4	50	12	13.1700	13.1700	11.6950	11.6950
15	3	230	60	50	6	30	12	10.1050	10.1050	8.5910	8.5910
16	3	230	60	80	6	50	14	8.0310	8.0310	6.4590	6.4590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.4.1.1 การวิเคราะห์ห้วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

Analysis of Variance for Means						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
B	1	6.6967	6.6967	6.6967	29.32	<0.001
E	1	22.5192	22.5192	22.5192	98.60	<0.001
G	1	24.9595	24.9595	24.9595	109.28	<0.001
B*E	1	0.7042	0.7042	0.7042	3.08	0.113
B*G	1	0.8523	0.8523	0.8523	3.73	0.085
E*G	1	2.8344	2.8344	2.8344	12.41	0.006
Residual Error	9	2.0556	2.0556	0.2284		
Total	15	60.6219				

รูปที่ 6.32 ข้อมูล ANOVA

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาทำการประมวลผลและวิเคราะห์ผล พบว่าตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร E (เวลาในการฉีด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปร E และตัวแปร G ที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก เนื่องจาก P-value < 0.05 ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

#### 6.4.1.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Estimated Model Coefficients for Means					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	9.1731	0.1433	64.031	<0.001	
B 215	-0.6470	0.1433	-4.516	0.001	
E 4	1.1864	0.1433	8.281	<0.001	
G 12	1.2490	0.1433	8.718	<0.001	
E*G 4 12	0.4209	0.1433	2.938	0.013	
S = 0.5730 R-Sq = 94.0% R-Sq(adj) = 91.9%					

รูปที่ 6.33 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.33 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 6.8 และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่สูง ที่ 94.0%

$$Y_1 = 9.1731 - 0.6470 B + 1.1864 E + 1.2490 G + 0.4209 E*G \quad (6.8)$$

เมื่อ  $Y_1$  = ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Volumetric shrinkage (%))

B = อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melt temperature)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E = เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)

G = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

#### 6.4.1.3 การวิเคราะห์ห่วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

ค่าตอบสนองที่มีค่าน้อย (Smaller – the –better) คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratios สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 6.8

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{\sum y_i^2}{n} \quad (6.9)$$

จากรูปที่ 6.34 ข้อมูล Signal-to-Noise Ratios ของการหดตัวชิ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าตัวแปร A (เวลาในการฉีดพลาสติก) ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร C (อุณหภูมิแม่พิมพ์) ตัวแปร D (แรงอัดฉีดสูงสุด) และตัวแปร F (แรงอัดฉีดย้ำสูงสุด) เป็น Robustness คือ ตัวแปรเหล่านี้มีสภาวะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

โดยพบว่าตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้ำ) ที่ระดับ High (ค่า -18.03) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) ที่ระดับ High (ค่า -17.97) ให้ค่า S/N ratios ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของร้อยละการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วย ที่ตัวแปร E (เวลาในการฉีดย้ำ) ที่ระดับ High (ค่า 7.987) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) ที่ระดับ High (ค่า 7.924) ที่มีค่าน้อยเช่นกัน

Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better							
Level	A	B	C	D	E	F	G
1	-19.31	-18.53	-19.09	-19.08	-20.18	-19.23	-20.24
2	-18.91	-19.68	-19.12	-19.13	-18.03	-18.98	-17.97
Delta	0.40	1.15	0.03	0.04	2.15	0.26	2.28
Rank	4	3	7	6	2	5	1

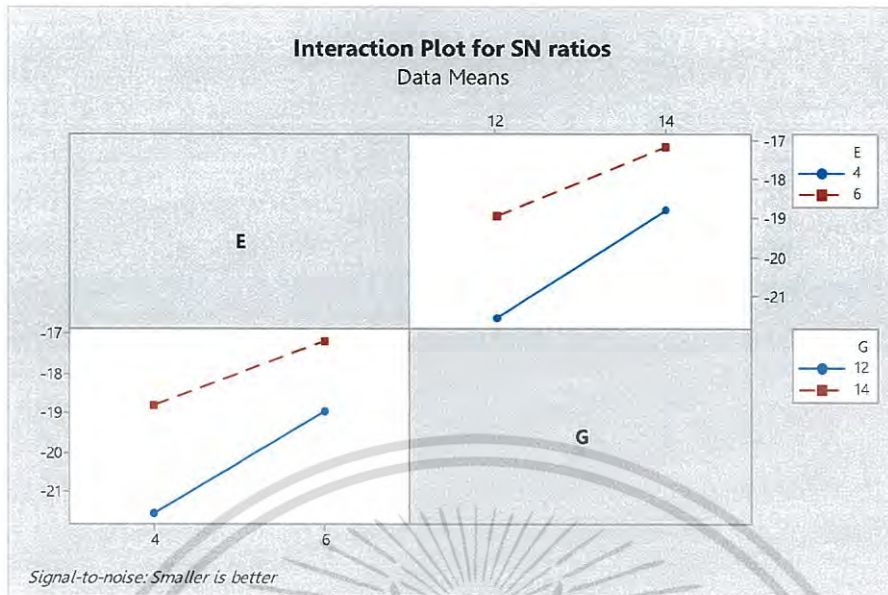
Response Table for Means							
Level	A	B	C	D	E	F	G
1	9.414	8.526	9.138	9.088	10.360	9.339	10.422
2	8.932	9.820	9.208	9.258	7.987	9.007	7.924
Delta	0.482	1.294	0.070	0.170	2.373	0.333	2.498
Rank	4	3	7	6	2	5	1

รูปที่ 6.34 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ยของการหดตัวชิ้นงานฉีดพลาสติก

เมื่อพิจารณาที่ตัวแปร E และ G พบว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G แสดง

#### ผังรูปที่ 6.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.35 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก จะได้ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร E (เวลาในการฉีด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอันตรกิริยาของตัวแปร E กับ G เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ย และจะได้ตัวแปร E (เวลาในการฉีด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอันตรกิริยาของตัวแปร E กับ G เมื่อวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

#### 6.4.2 การบดของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การบดของชิ้นงานฉีดพลาสติกสามารถแสดงการทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^7$ ) ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.18 การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 ( $2^7$ ) ของการบดของชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
1	2	215	35	50	4	30	12	1.29987	1.29987	0.96083	0.96083
2	2	215	35	80	4	50	14	1.10700	1.19300	0.85200	0.85200
3	2	215	60	50	6	30	14	1.11600	1.11600	0.77400	0.77400
4	2	215	60	80	6	50	12	1.19700	1.19700	0.85600	0.85600
5	2	230	35	50	6	50	12	1.22000	1.22000	0.88000	0.88000
6	2	230	35	80	6	30	14	1.13532	1.13532	0.79332	0.79332
7	2	230	60	50	4	50	14	1.21500	1.21500	0.87500	0.87500
8	2	230	60	80	4	30	12	1.36100	1.35900	1.02100	1.02100
9	3	215	35	50	6	50	14	1.12000	1.12000	0.77600	0.77600

ตารางที่ 6.18 (ต่อ) การทดลองและข้อมูลของค่าตอบสนองของพารามิเตอร์ L16 (2<sup>7</sup>) ของการบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

Runs	A	B	C	D	E	F	G	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4
10	3	215	35	80	6	30	12	1.18100	1.18100	0.84000	0.84000
11	3	215	60	50	4	50	12	1.27900	1.27900	0.93900	0.93900
12	3	215	60	80	4	30	14	1.17700	1.17700	0.83500	0.83500
13	3	230	35	50	4	30	14	1.20100	1.20100	0.86000	0.86000
14	3	230	35	80	4	50	12	1.32800	1.32800	0.98900	0.98900
15	3	230	60	50	6	30	12	1.21000	1.21000	0.87000	0.87000
16	3	230	60	80	6	50	14	1.12300	1.12300	0.78100	0.78100

#### 6.4.2.1 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วย ANOVA

Analysis of Variance for Means							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value	
B	1	0.004047	0.004047	0.004047	32.40	<0.001	
E	1	0.033721	0.033721	0.033721	269.96	<0.001	
G	1	0.042388	0.042388	0.042388	339.34	<0.001	
B*E	1	0.000648	0.000648	0.000648	5.19	0.049	
B*G	1	0.000314	0.000314	0.000314	2.51	0.148	
E*G	1	0.002213	0.002213	0.002213	17.72	0.002	
Residual Error	9	0.001124	0.001124	0.000125			
Total	15	0.084454					

รูปที่ 6.36 ข้อมูล ANOVA

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาทำการประมวลผลและวิเคราะห์ผล พบว่าตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B กับ E และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และตัวแปร G ที่มีอิทธิพลต่อการบดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก เนื่องจาก P-value < 0.05 ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

#### 6.4.2.2 โมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์

Estimated Model Coefficients for Means				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.03795	0.002998	346.256	<0.001
B 215	-0.01590	0.002998	-5.306	<0.001
E 4	0.04591	0.002998	15.315	<0.001
G 12	0.05147	0.002998	17.170	<0.001
B*E 215 4	-0.00636	0.002998	-2.123	0.060
E*G 4 12	0.01176	0.002998	3.923	0.003
S = 0.01199    R-Sq = 98.3%    R-Sq(adj) = 97.4%				

รูปที่ 6.37 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression)

จากการวิเคราะห์รูปที่ 6.37 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients Regression) จากการลดจำนวนตัวแปรที่ลดรูปแล้ว สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 6.10 และพบว่าค่า R-sq อยู่ในระดับที่สูง ที่ 98.3%

$$Y_2 = 1.03795 - 0.01590 B + 0.04591 E + 0.05147 G - 0.00636 B^*E + 0.01176 E^*G \quad (6.10)$$

เมื่อ  $Y_2$  = ค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก (Total displacement (mm.))  
 B = อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melt temperature)  
 E = เวลาในการฉีดอัด (Packing time)  
 G = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

#### 6.4.2.3 การวิเคราะห์วิธีการทางสถิติด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

ค่าตอบสนองที่มีค่าน้อย (Smaller – the –better) คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratios สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 6.9

จากรูปที่ 6.38 ข้อมูล Signal-to-Noise Ratios ของการบิดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าตัวแปร A (เวลาในการฉีดพลาสติก) ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร C (อุณหภูมิแม่พิมพ์) ตัวแปร D (แรงอัดฉีดสูงสุด) และตัวแปร F (แรงอัดฉีดอัดสูงสุด) เป็น Robustness คือ ตัวแปรเหล่านี้มีสถานะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

โดยพบว่าตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด) ที่ระดับ High (ค่า -0.050537) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) ที่ระดับ High (ค่า -0.001548) ให้ค่า S/N ratios ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของค่าการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วย ที่ตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด) ที่ระดับ High (ค่า 0.9920) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) ที่ระดับ High (ค่า 0.9865) ที่มีค่าน้อยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

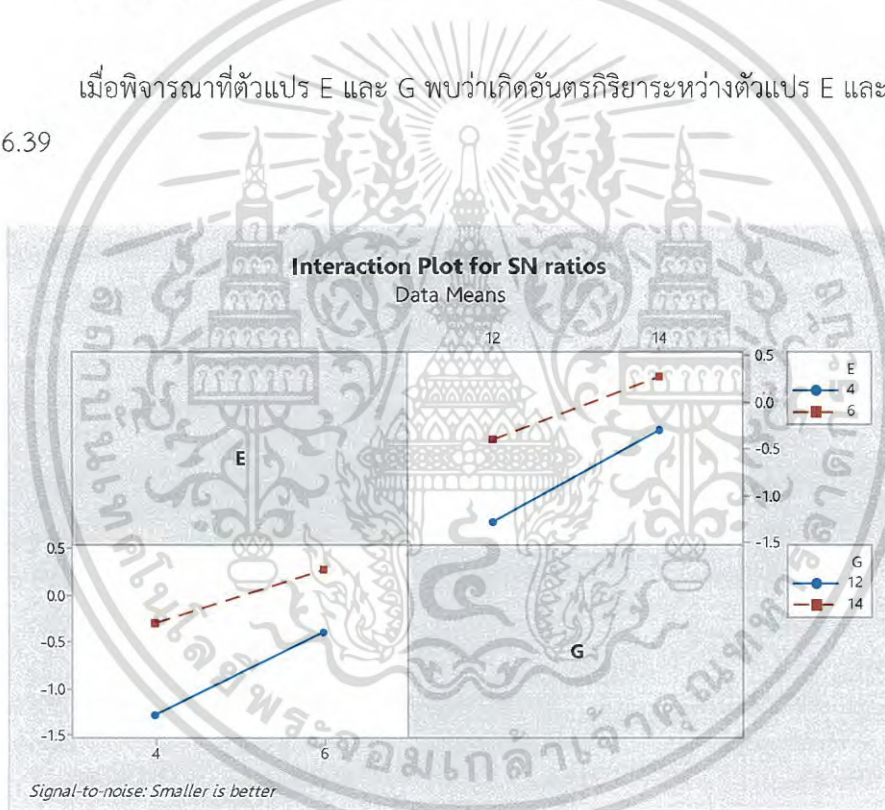
Response Table for Signal to Noise Ratios								
Smaller is better								
Level	A	B	C	D	E	F	G	
1	-0.464393	-0.290900	-0.407665	-0.418889	-0.786184	-0.431476	-0.835172	
2	-0.372328	-0.545820	-0.429055	-0.417831	-0.050537	-0.405245	-0.001548	
Delta	0.092065	0.254920	0.021390	0.001059	0.735647	0.026231	0.833624	
Rank	4	3	6	7	2	5	1	

Response Table for Means								
Level	A	B	C	D	E	F	G	
1	1.0441	1.0220	1.0366	1.0372	1.0839	1.0396	1.0894	
2	1.0318	1.0539	1.0393	1.0387	0.9920	1.0362	0.9865	
Delta	0.0123	0.0318	0.0026	0.0014	0.0918	0.0034	0.1029	
Rank	4	3	6	7	2	5	1	

รูปที่ 6.38 ข้อมูลค่าตอบสนองของอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และค่าเฉลี่ยของการบิดงอชิ้นงานฉีดพลาสติก

เมื่อพิจารณาที่ตัวแปร E และ G พบว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E และ G แสดงดังรูปที่ 6.39



รูปที่ 6.39 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่มีอิทธิพลต่อการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก จะได้ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร E (เวลาในการฉีดย่ำ) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) อันตรกิริยาของตัวแปร B กับ E และอันตรกิริยาของตัวแปร E กับ G เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ย และจะได้ตัวแปร E (เวลาในการฉีดย่ำ) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และอันตรกิริยาของตัวแปร E กับ G เมื่อวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สรุปผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล

จากกรณีศึกษาการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial Design และวิธีการแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design จะได้ตัวแปร B (อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว) ตัวแปร E (เวลาในการฉีด) ตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ E อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ B และ G และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของ E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก แต่วิธีการของ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial Design จะได้ตัวแปร A (เวลาในการฉีดพลาสติก) และตัวแปร F (แรงอัดฉีดสูงสุด) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติเพิ่มเข้ามาด้วย ส่วนวิธีการของทากูชิ จะได้ตัวแปร B, E, G และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก และวิธีการของไชนิน จะได้ตัวแปร E, G และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

สำหรับการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial และวิธีการแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design จะได้ตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก ส่วนวิธีการทากูชิ จะได้ตัวแปร B, E, G อันตรกิริยาของตัวแปร B กับ E และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก และวิธีการของไชนินจะได้ตัวแปร E, G และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 6.19

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบจุดเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 6.20

ตารางที่ 6.19 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับการเกิดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก  
อย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการ ออกแบบ การทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพล												Signal-to- noise ratios (S/N)	Linear Model			
	การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก						การบิดงอของชิ้นงาน ฉีดพลาสติก										
	A	B	E	F	G	BE	BG	EG	B	E	G	BE			EG		
$2^{k-1}$ Fractional Factorial Design	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓						✓
$2^{k-3}$ Fractional Factorial Design		✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓						✓
หลักการ ค้นหา ตัวแปรของ ไซนิน			✓		✓			✓		✓	✓			✓			
วิธีการทากูชิ		✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

วิธีการทากูชิ แสดงให้เห็นว่าตัวแปร B เป็น Robustness คือ ตัวแปรนี้มีสภาวะที่ทนต่อสภาพแวดล้อม  
และตัวแปรอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

ตารางที่ 6.20 ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหา  
ตัวแปรของไซนินและการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน  $2^{k-1}$  Fractional  
Factorial Design

หัวข้อที่ทำการ วิเคราะห์	วิธีการของทากูชิ	หลักการค้นหา ตัวแปรของไซนิน	การออกแบบการทดลองแบบ เศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล	
			$2^{7-1}$	$2^{7-3}$
เปอร์เซ็นต์จำนวน ครั้งในการทดลอง ที่ลดลงได้	64 ครั้ง (ลดลง 75 %)	22 ครั้ง (ลดลง 91.41 %)	256 ครั้ง	64 ครั้ง (ลดลง 75 %)
ต้นทุนที่ใช้ในการ ทดลอง	ปานกลาง (ตาม จำนวนครั้งของ การทดลอง)	ต่ำ	สูง (ตาม จำนวนครั้งของ การทดลอง)	ปานกลาง (ตามจำนวน ครั้งของการ ทดลอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.20 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนินและการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน  $2^{k-1}$  Fractional Factorial Design

หัวข้อที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการของทากูชิ	หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล	
			$2^{7-1}$	$2^{7-3}$
หลักการของการวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratios	ค่ามัธยฐาน (Median)	ANOVA	ANOVA
สมการถดถอย	มี	ไม่มี	มี	มี
ความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางสถิติ	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA)	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA)
ความเชื่อมั่นในทางสถิติ	สูง (ใช้ ANOVA และ S/N Ratios)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ ANOVA)	สูง (ใช้ ANOVA)
จำนวนตัวแปรที่เหมาะสมกับการทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัวแปรจำนวนมาก การทดลองก็ยิ่งน้อยอยู่ดี)	ปานกลาง	ปานกลาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองวิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ วิธีการของไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษาของการเกิดการหดตัวและบิดงอขึ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าการออกแบบการทดลองของทากูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้ใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งมีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่า ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทากูชิ และการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทากูชิ และการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา พบว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่มากขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อต้องการผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติเทียบเท่ากับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แพคทอเรียล) และยังใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่า สามารถนำวิธีการของทากูชิมาระยุกต์ใช้ช่วยในการออกแบบการทดลอง ให้ง่าย สะดวก และมีประสิทธิภาพ

และสำหรับวิธีการของไซนิน ผู้ที่ทำการออกแบบการทดลองต้องเป็นผู้ที่คลุกคลีอยู่ในงานนั้นๆพอสมควร ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งสำหรับผู้ที่ไม่มีความชำนาญในงานประเภทนั้นๆ เนื่องจากยากในการกำหนดระดับของปัจจัยเป็นค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก และวิธีการของไชนิน จะได้ตัวแปร E, G และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

สำหรับการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{7-1}$  Fractional Factorial และวิธีการแบบ  $2^{7-3}$  Fractional Factorial Design จะได้ตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก ส่วนวิธีการของทากูชิ จะได้ตัวแปร B, E, G อันตรกิริยาของตัวแปร B กับ E และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก และวิธีการของไชนินจะได้ตัวแปร E, G และอันตรกิริยาของตัวแปร E และ G ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก

จากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี พบว่าการออกแบบการทดลองของทากูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้ใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งมีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่า ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทากูชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทากูชิ การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา สามารถสรุปได้ว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแฟคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่ยาวขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อต้องการผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติเทียบเท่ากับการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล) และยังใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่า สามารถนำวิธีการของทากูชิมาประยุกต์ใช้ช่วยในการออกแบบการทดลอง ให้ง่าย สะดวกและมีประสิทธิภาพ

และสำหรับวิธีการของไชนิน ผู้ที่ทำการออกแบบการทดลองต้องเป็นผู้ที่คลุกคลีอยู่ในงานนั้นๆพอสมควร ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งสำหรับผู้ที่ไม่ได้มีประสบการณ์ในงานประเภทนั้นๆ เนื่องจากการยากในการกำหนดระดับของปัจจัยเป็นค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด

ผู้วิจัยจึงเสนอการออกแบบการทดลองแบบวิธีการของทากูชิและวิธีการของไชนิน เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ที่ลดจำนวนครั้งในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการของทากูชิและวิธีการของไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่งนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลอง ทำให้สามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1) หากต้องการผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติเทียบเท่ากับการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล) โดยการดำเนินการทดลองที่ไม่สามารถทำการทดลองได้จำนวนมาก ซึ่งสามารถกำหนดแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีการของทากูชิมาช่วยในการออกแบบการทดลองให้ง่ายและสะดวกและเป็นวิธีดำเนินการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยการเข้าใกล้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้อย่างเหมาะสมที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ และเป็นวิธีที่เป็นระบบ

2) ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้กรณีศึกษาที่มีตัวแปรจำนวน 5 ตัวแปร ในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 และตัวแปรจำนวน 7 ตัวแปร ในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งสำหรับหลักการค้นหาตัวแปรของการออกแบบการทดลองของไชนินั้นในทางทฤษฎีสามารถวิเคราะห์ได้ถึง 20 ตัวแปร ผู้วิจัยจึงเสนอแนะว่าหากผู้ที่ได้นำหลักการค้นหาตัวแปรของการออกแบบการทดลองของไชนินไปใช้ สามารถไปใช้กับกรณีที่มีจำนวนตัวแปรมากกว่างานวิจัยฉบับนี้ได้

3) เนื่องด้วยวิธีการของไชนินั้น ผู้ที่ทำการออกแบบการทดลองต้องเป็นผู้ที่คลุกคลีอยู่ในงานนั้นๆพอสมควร จึงเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งสำหรับผู้ที่ไม่มีความรู้ในงานประเภทนั้นๆ เนื่องจากยากในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ไว้ที่ค่าใดจึงเป็นค่าที่ดี (Best) หรือปรับค่าพารามิเตอร์ไว้ที่ค่าใดจึงเป็นค่าที่แย่ (Marginal)

4) ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และอธิบายการออกแบบการทดลองของทากูชิวิธีการของไชนิน การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล) ด้วยกรณีศึกษาเพียง 3 กรณีเท่านั้น ดังนั้นผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างจากกรณีศึกษาของผู้วิจัย เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับการออกแบบการทดลองของทากูชิและวิธีการของไชนิน

5) การออกแบบการทดลองวิธีการของทากูชิและวิธีการของไชนิน เหมาะสำหรับผู้ที่มีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ด้านค่าใช้จ่าย ต้นทุนน้อย หรือทรัพยากรที่มีอยู่ เวลา และหน่วยทดลองที่ไม่เพียงพอ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery, Douglas C. 2013. *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. Hoboken, NJ : Wiley.
- [2] พิชิต สุขเจริญพงษ์. 2550. “Shainin DOE : เทคนิคของไชนินสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ,” ใน เอกสารประกอบการสัมมนาสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
- [3] Phadke, M.S. 1989. *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [4] Bhote, K. 2000. *World Class Quality : Using Design of Experiment to Make It Happen*. 2nd ed. Amacom. New York.
- [5] ยศวิจน์ ศิริกมลชัย. 2554. “การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการไชนิน.” ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [6] Thomas, A.D. and Antony, J. 2004. “Applying Shainin’s Variables Search Methodology in Aerospace Applications.” *Assembly Automation*. 24 : 184-191.
- [7] Antony, J. and Alfred Ho Yuen Cheng. 2003. “Training for Shainin’s Approach to Experimental Design Using a Catapult.” *Journal of European Industrial Training*. 27/8 : 405-412.
- [8] Antony, J. 1999. “Spotting the Key Variables Using Shainin’s Variables Search Design.” *Logistics Information Management*. 12/4 : 325-331
- [9] Roy, R.K. 1990. *A Primer on the Taguchi (Competitive Manufacturing Series)*. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [10] Roy, R.K. 2001. *Design of Experiment Using the Taguchi Approach*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [11] Daniel Frey. “Robust System Design.” [Slide]. Massachusetts Institute of Technology : MIT OpenCourseWare. 1998.
- [12] Wei-Chung Weng, Fan Yang and Atef Elsherbeni. 2008. *Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi’s Method*. Morgan & Claypool Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Peace, Glen Stuart. 1993. *Taguchi Method : a Hands- on Approach*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [14] Asahi Shimbun, April 17, 1979 (in Japanese)
- [15] สุริยพงศ์ นิลสังข์. 2558. “การบูรณาการการออกแบบพารามิเตอร์ทนทานและการจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแผนกฉุกเฉินของโรงพยาบาล.” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [16] Navneet Khanna and J.P Davim. 2015. “Design-of-experiments Application in Machining Titanium Alloys for Aerospace Structural Components.” *Measurement*. 61 : 280–290.
- [17] G. Venkatesan, N. Kulasekharan, V.Muthukumar and S. Iniyan. 2015. “Regression Analysis of a Curved Vane Demister with Taguchi Based Optimization.” *Desalination*. 370 : 33–43.
- [18] กิตติกร ฤทธิ์สิงห์ และเลิศศักดิ์ สุมาลย์. 2546. “การปรับปรุงคุณภาพงานหล่อขึ้นเ็ก อลูมิเนียมบรอนซ์ โดยวิธีการของทาคุชิ.” *ปริญญาานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.*
- [19] อัษฎาวุธ หนูเกื้อ. 2550. “การปรับปรุงคุณภาพงานฉีดพลาสติกโดยวิธีการทาคุชิ.” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.*
- [20] อรอุมา หล้าแหล่ง. 2551. “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไซโคลเด็กซ์ทรินโดยวิธีทาคุชิ.” *ปริญญาานิพนธ์อุตสาหกรรมเกษตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*
- [21] De Mast, J. 2004. “A Methodological Comparison of Three Strategies for Quality Improvement.” *International Journal of Quality and Reliability Management*. 21 : 198-213.
- [22] Verma, A.K., Srividya, A., Mannikar, A.V., Pankhawala, V.A. and Rathanraj, K.J. 2004. “Shainin Method: Edge Over other DOE Techniques.” *International Engineering Management Conference*. 3 : 1110-1113.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] Thomas, A.J. and Antony, J. 2005. "A Comparative Analysis of the Taguchi and Shainin DOE Techniques in an Aerospace Environment." *International Journal of Productivity and Performance Management*. 54 : 658-678.
- [24] Martin, Tanco., Elisabeth, Viles. and Lourdes Pozueta. "Are All Designs of Experiments Approaches Suitable for Your Company?." *Proceedings of the World Congress on Engineering.*, vol. II, July 2-4, 2008. Pp. 922-1706.
- [25] Anand, K.Bewoor. and Maruti, S. Pawar. 2010. "Use of Shainin Tools for Simplifying Six Sigma Implementation In QMS/ISO Certified Environment-An Indian SME Case Study." *Journal of Engineering Research and Studies*. 1: 177-194.
- [26] F.B. Zhang, Z.L. Wang and M.Y. Yang. 2015. "Assessing the Applicability of the Taguchi Design Method to an Interrill Erosion Study." *Journal of Hydrology*. 521 : 65-73.
- [27] อัญธิมา เสน่หา. 2551. "การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการวางแผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลและการวางแผนการทดลองแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียล." *ปริญญาโทบริหารมหาบัณฑิต (สถิติประยุกต์) บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*
- [28] สมชาย ม้วนโคกสูง. 2553. "การหาจุดเหมาะสมสำหรับการย้าหมุดอลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.*
- [29] P.K. Kennedy. 2008. "Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation." M.S. Thesis, Technische Universities Eindhoven Netherlands.
- [30] Robert A. Malloy. 1994. *Plastic Part Design for Injection Molding*. Carl Hanser Verlag, New York.
- [31] Erik Foltz, "Injection Molding: The Importance of Nominal Wall For Lightweighting Molded Parts." [Slide]. USA : A Gardner Business Media. 2014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ธนกานต์ วิชิระประเสริฐ, ทศพล เกียรติเจริญผล. 2559. “การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของโซลิน และวิธีการทากูชิ กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดลูมิเนียม” วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร. มกราคม-มิถุนายน ปีที่ 11 ฉบับที่ 1

<h1>NUUEJ</h1>	
NARESUAN UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL	
January – June 2018 Vol.11, No.1 ISSN 1905-615X	
<h3>Research Articles</h3>	
Monitoring Screw Fastening Process: an Application of SVM Classification.....1 Supawan Pongitakchai	1
การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของโซลิน และวิธีการทากูชิ กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดลูมิเนียม.....7 ธนกานต์ วิชิระประเสริฐ	7
การเพิ่มขนาดคอนกรีตประสิทธิผลสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุน.....15 ปิยะพงษ์ สุวรรณณิไซต์, พงษ์ธร จันทน์ทอง, ประทีป นิลาราย, ภาควัฒน์ จ้อยกสิต์, ธนกร พิระพันธ์	15
การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงด้วยระบบเอสบีอาร์.....61 ณรงค์ จันทราช, Hang Thai Le, ศศนาถิ์ รัตนานาคม, อุดมศักดิ์ นาทริกย์, วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา	61
การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกประสานโดยผสมทราย.....67 กมล อมรฟ้า	67
การวิจัยหาร่างมาตรฐานโดยการวิเคราะห์ข้อมูล 3 มิติ.....75 วิศรุต ชวัญคุ้ม, ไพศาล นนธิ์สว่าง	75
อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเสียดทานสำหรับอุตสาหกรรมเชื่อมเหล็ก.....85 สมศักดิ์ แก่นทอง, วิเชียร เรือนเครือวัลย์, ศิริชัย ต่อสกุล	85
การแนวความคิดการประเมินด้วยวิธีดัชนีบวทกภาพ (CPG) ในงานก่อสร้างถนน.....93 เมธากุล มีธรรม, วชรภูมิ เบลูจโอหา	93
การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยเทคนิคการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....101 วิระยุทธ หล้าอมรชัยกุล	101
การเตรียมโพลีเมียมไดออกไซด์ก่อนการนาโนโดยใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการโซล-เจลเพื่อขยายสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก.....111 ณัฐญา คุ่มทรัพย์	111
<h3>Review Article</h3>	
วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์และการประยุกต์ใช้.....23 สายสัมพันธ์ ชันเจริญ, ศรีสัจจา วิทย์ศักดิ์, กุพงษ์ พงษ์เจริญ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการทาгуชิ  
กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม  
Experimental Design with Shainin and Taguchi Methods:  
A Case Study of Aluminum Riveting Process

ธนกานต์ วิชิระประเสริฐ<sup>1\*</sup>, ทศพล เกียรติเจริญผล<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
E-mail: thanakarn.v@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและกำหนดแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการของทาгуชิและหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน โดยอาศัยกรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน กับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิ จะดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Array) เป็น L16 และหลักการค้นหาตัวแปรของไชนินจะดำเนินการ 4 ขั้นตอน ส่วนวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะมีรูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2<sup>5</sup> Factorial Design จากผลการทดลองพบว่าวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนการทดลองที่น้อยครั้งกว่า ส่วนวิธีการของไชนินใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทาгуชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง การประยุกต์ใช้วิธีการของทาгуชิ และไชนิน มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ในกรณีที่การดำเนินการทดลองไม่สามารถทำการทดลองได้จำนวนมากและมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองแบบคัดกรอง (Screening) แต่อย่างไรก็ตามการวางแผนการทดลองของวิธีการของทาгуชิและไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่างนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลองมากกว่าแบบแฟคทอเรียล

**คำสำคัญ:** วิธีการของทาгуชิ, หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน, ตารางแนวฉาก, แผนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล, วิธีการทดลองแบบแฟคทอเรียล

**Abstract**

The aim of this research is to study and provide the implementation of Taguchi method and Shainin methods by using a case of Aluminum Riveting Process. Then, comparative analysis of Taguchi, Shainin and classical factorial experiment designs was carried out. Taguchi method uses the experiment of Orthogonal Array (L16) and Shainin method operates in four processes. 2<sup>5</sup> Factorial Design is used as a classical experimental designs. Taguchi method give the same result as the classical factorial experiment that provides high confidence with fewer number of trials. The number of trials of Shainin method is less than those of Taguchi method and classical factorial experiment. It is valuable to reduce cost and time of experiments. Therefore, applications of Taguchi and Shainin methods are useful for the study when a number of trials cannot be performed on many experiments, especially in case of the screening experiment. However, the approaches of Taguchi and Shainin methods require the understanding of process parameters more than that of classical factorial design in order to select factors and to set suitable levels of experimental conditions.

**Keyword:** Taguchi method, Shainin method, Orthogonal Array, Factorial Design, Classical factorial experiment designs

## 1. บทนำ

เนื่องจากเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น [1] ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิต โดยการออกแบบการทดลองจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening หรือ Process characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ใช้ในงานด้านการพัฒนากระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้เราสามารถที่จะพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น โดยทั่วไปจะใช้แบบแฟคทอเรียล (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อีกเทคนิคที่ถูกเรียกว่า หลักการค้นหาตัวแปร (Variable Search Method) ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของโชนิน วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย โดเรียน โชนิน (Dorian Shainin) ชาวอเมริกา ผู้ซึ่งเป็นที่ปรึกษาของบริษัทชั้นนำต่างๆมากกว่า 800 แห่ง เทคนิคนี้ถือว่าเป็นเทคนิคในการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างง่าย แต่ให้ประสิทธิภาพสูง และทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเข้าถึงปัญหาได้ดี โดยเทคนิคของโชนินถือเป็นกลุ่มวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องพึ่งหลักการทางสถิติที่ซับซ้อนมากนัก และเป็นวิธีการที่มีกระบวนการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอน รวมทั้งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมต่างๆได้เป็นอย่างดี [2]

นอกจากนี้วิธีการอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในเชิงปฏิบัติ คือ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ เป็นการลดความสูญเสีย ที่เกิดจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย โดยการตรวจสอบจากผลรวมของความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆผันแปรไปจากคุณภาพของเป้าหมาย และหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตนั้นเป็นอย่างไร รวมไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่น ๆ ที่นอกเหนือการควบคุม [3] โดยสำหรับในงานวิจัยนี้พัฒนาจากงานวิจัยของสมชาย [4] กรณีศึกษากระบวนการอัดอูมิเนียม และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล หลักการค้นหาตัวแปร และวิธีการทากูชิ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิธีการของโชนิน (Shainin Method)

วิธีการของโชนิน ให้เทคนิคของหลักการค้นหาตัวแปร ซึ่งมีประโยชน์เมื่อมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเท่ากับหรือมากกว่า 4 ตัวแปรขึ้นไปในระบบ ซึ่งวิธีการของโชนินได้ให้นิยามของตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า PinkX และถัดมาเป็น PalePinkX และกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองเรียกว่า GreenY [5] หลักการค้นหาตัวแปรสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน

#### 2.1.1 กำหนดตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลองโดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y ที่ใช้ในการวัดคุณภาพและทำการวิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพสินค้า หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละปัจจัยเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) และค่าที่แย่มากที่สุด (Marginal Level; M) โดยกำหนดขนาดตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดเพียง 2 ชั้น คือ BOB (Best Of Best) และ WOW (Worst Of Worst) อย่างละชั้นและทำการประเมินหาแนวโน้มอย่างคร่าวๆ โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกที่ดีที่สุด ครั้งที่สองที่ค่าที่แย่มากที่สุดของทุกปัจจัย โดยถ้ามีความแตกต่างของค่า Green Y อย่างมากระหว่างค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่มากที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าค่าที่ดีที่สุดทุกค่าดีกว่าค่าที่แย่มากที่สุด แต่แตกต่างกันไม่มากแสดงว่ายังมีปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกซึ่งมีผลต่อคุณภาพหรือค่า Green Y แต่ถ้าค่าที่ดีที่สุดไม่ได้แสดงอย่างชัดเจนว่าดีกว่าค่าที่แย่มากที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ไม่มีผลต่อคุณภาพและให้ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วจึงทดสอบนัยสำคัญเพื่อพิสูจน์ว่า Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัวดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่มากที่สุดทั้ง 3 ตัว โดยการทดสอบนัยสำคัญจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด คือ Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัว ต้องดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่มากที่สุดทั้ง 3 ตัว และอัตราส่วน  $D : d$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ  $1.25 : 1$  ซึ่งถ้าการทดสอบนัยสำคัญผ่าน จะถือว่าขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้น แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ถูกต้องแล้วถ้าการทดสอบนัยสำคัญไม่ผ่าน แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพยังไม่ถูกเลือกให้กลับไปทำการวิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพสินค้าใหม่อีกครั้ง

#### 2.1.2 จำแนกแยกแยะปัจจัย

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญและกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไปรวมทั้งอันตรกิริยาที่เกิดจากตัวแปรนั้นออกไปด้วย โดยเริ่มจากทำการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ แล้วคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ โดยใช้สูตร  $\text{median} \pm 2.776 d / 1.81$  ซึ่งผลลัพธ์ที่เป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถ้า  $A_m R_b$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_b R_m$  อยู่ใน decision limits-low แสดงว่า A ไม่นับนัยสำคัญ กรณีที่ 2 ถ้า  $A_m R_b$  และ  $A_b R_m$  ให้ผล

ตรงข้ามกัน คือ  $A_mR_b$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆ ตัดออกได้ทั้งหมด กรณีที่ 3 ถ้า  $A_mR_b$  และ  $A_bR_m$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่า ตกออกนอก Decision limits คือ  $A_mR_b$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_bR_m$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อ สำหรับปัจจัยที่เหลือคือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไปแต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลองแสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

### 2.1.3 ยืนยันตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญและยืนยันความสำคัญของตัวแปรนั้น โดยทดสอบยืนยันผลของตัวแปรและอันตรกิริยาโดยสลับค่าของปัจจัย เช่น  $A_bB_bR_m$  และ  $A_mB_mR_b$  ทดสอบยืนยันผลอันตรกิริยา 3 ตัว (ถ้ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปัจจัย)

### 2.1.4 การวิเคราะห์ตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของปัจจัยสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมซึ่งในกรณีที่อันตรกิริยาของปัจจัยหรือตัวแปรคู่ใดมีนัยสำคัญให้เขียนกราฟอิทธิพลร่วม เพื่อหาว่าอันตรกิริยาของปัจจัยคู่นั้นมีมากหรือไม่ เพื่อนำไปสู่การกำหนดค่าของปัจจัยที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุดต่อไป [6]

## 2.2 วิธีการทาคุชิ (Taguchi Method)

วิธีการทาคุชิ เป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวนของกระบวนการซึ่งวิธีทาคุชินั้น ถือเป็นฟังก์ชันความสูญเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง คือ การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทาคุชิได้สรุปว่าการเบี่ยงเบนใดๆของกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ออกห่างจากค่าเป้าหมายจะก่อให้เกิดค่าความสูญเสีย

2.2.1 กำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางแนวฉาก (Orthogonal Array) และ linear graph ใน Robust Design  
ในขั้นตอนการวางแผนการทดลองจะเริ่มที่การออกแบบแผนการทดลองแบบเมตริกซ์ ซึ่งทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆปัจจัยพร้อมๆ กัน คือ การกำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางแนวฉาก

ตารางที่ 1 ตารางแนวฉาก

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด
L4	3	2
L8	7	2
L9	4	3
L12	11	2
L16	15	2
	5	4
L18	1	2
	7	3
L27	13	3
L32	31	2
	1	2
	9	4

จากตารางข้างต้น จำนวนตัวเลขของ L คือ จำนวนครั้งของการทดลอง เช่น L8 จะมีการทดลอง 8 ครั้ง หรือ L16 จะมีการทดลอง 16 ครั้ง เป็นต้น โดยจำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมากความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่าการทดลองนั้นยังมีความถูกต้อง ซึ่งโดยปกติปัจจัยในการเลือกขึ้นอยู่กับ [7]

1. จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
2. จำนวนระดับของตัวแปรที่ต้องการ
3. ความต้องการของผู้ทดลอง, งบประมาณ, และข้อจำกัดในด้านอื่นๆ

2.2.2 การวิเคราะห์ (ANOVA) ผลการทดลองจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal-to-Noise (S/N Ratio)

อัตราส่วนของ Signal-to-Noise (S/N Ratio) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Smaller – the – better (กรณีค่าน้อยยิ่งดี) , Nominal – the – best (กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด) และ Larger – the – better (กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี) [1]

สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก คือ ค่าที่ดีที่สุด จากกฎของทาคุชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุด

2.2.3 ปัจจัยที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง (Robustness factor)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยจะได้ค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise Ratio ของแต่ละระดับปัจจัย ซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือ ปัจจัยที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง (Robustness factor) ซึ่งไม่จำเป็นต้องไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมเนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้น ไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละระดับปัจจัย

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 กำหนดกรณีศึกษาที่ทราบค่าตัวแปรใด มีผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม

กรณีศึกษาพัฒนาจากงานวิจัยกระบวนการย้าหมุด อลูมิเนียม เพื่อหาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพล ต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม [4] ซึ่งมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ระดับ	
	ต่ำ(-)	สูง(+)
1. ขนาดแรงกด (A)	ต่ำ	สูง
2. ขนาดรูเจาะ (B)	เล็ก	ใหญ่
3. ความหนาของงาน (C)	บาง	หนา
4. ความยาวหมุดย้า (D)	สั้น	ยาว
5. เวลาในการกดแช่ (E)	น้อย	มาก

3.2 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ 2<sup>k</sup> Full Factorial Design

ดำเนินการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2<sup>5</sup> มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 32 ครั้ง แต่ละครั้งของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 160 ครั้ง และจัดการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม

3.3 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการค้นหาตัวแปร ด้วยวิธีการของโซนิค

ดำเนินการตามขั้นตอนของการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการค้นหาตัวแปรของโซนิค 4 ขั้นตอน [8]

3.4 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิ

ดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก ซึ่งจะได้รับการทดลองเป็น L16 ( 2<sup>5</sup> ) โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง แต่ละครั้ง ของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 80 ครั้ง

จากนั้นนำมาสรุป เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองทั้ง 3 แบบ

4. ผลการดำเนินงานและบทวิจารณ์

4.1 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ 2<sup>k</sup> Full Factorial Design

ดำเนินการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยอาศัยโปรแกรม Minitab โดยแยกวิเคราะห์ผลแต่ละปัจจัย โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม คือ ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) , ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ B และ C

4.1.1 สมการถดถอย

$$Y = 1283.75 + 98.00 B + 6.00 C - 15.75 B * C \quad (1)$$

เมื่อ Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)

B = ขนาดรูเจาะ (Size)

C = ความหนาของงาน (Thick)

4.2 การออกแบบการทดลองวิธีการของโซนิค

4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร

จากการทดลอง 3 ครั้งสำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้งสำหรับค่าที่แย่มากที่สุด ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Ball Park

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	ต่ำ (-) Marginal Level	สูง (+) Best Level	
1. ขนาดแรงกด (A)	ต่ำ	สูง	-
2. ขนาดรูเจาะ (B)	เล็ก	ใหญ่	-
3. ความหนาของงาน (C)	หนา	บาง	-
4. ความยาวหมุดย้า (D)	สั้น	ยาว	-
5. เวลาในการกดแช่ (E)	น้อย	มาก	-
ผลการทดลองครั้งที่ 1	1170	1390	N/mm <sup>2</sup>
ผลการทดลองครั้งที่ 2	1250	1360	N/mm <sup>2</sup>
ผลการทดลองครั้งที่ 3	1230	1410	N/mm <sup>2</sup>

จากการทดลองพบว่าค่า All-Best ทุกครั้ง ดีกว่า All-Marginal และค่ามัธยฐานของ All-Best คือ 1390 และของ All-Marginal คือ 1230 โดย  $D = 1390 - 1230 = 160$  และ  $\bar{d} = ((1410 - 1360) + (1250 - 1170)) / 2 = 65$  ดังนั้น  $D : \bar{d} = 160 : 65$  หรือเท่ากับ 2.46 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่า ปัจจัยที่เลือกไว้ (A ถึง E) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย แสดงผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1420	1390	1290.31 to 1489.69	A not significant
2	A <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1200	1230	1130.31 to 1329.69	
3	B <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1170	1390	1290.31 to 1489.69	B significant
4	B <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1380	1230	1130.31 to 1329.69	
5	C <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1390	1390	1290.31 to 1489.69	C not significant
6	C <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1160	1230	1130.31 to 1329.69	
7	D <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1330	1390	1290.31 to 1489.69	D not significant
8	D <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1220	1230	1130.31 to 1329.69	
9	E <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1410	1390	1290.31 to 1489.69	E not significant
10	E <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1240	1230	1130.31 to 1329.69	

ขอบเขตการตัดสินใจ คือ Decision Limits (High sides) =  $1390 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 = 1290.31$  ถึง  $1489.69$  และ Decision Limits (Low sides) =  $1230 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 = 1130.31$  ถึง  $1329.69$  จากผลการทดลองแสดงว่าปัจจัย A, C, D และ E มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นปัจจัย

A, C, D และ E จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัย B มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits แสดงว่าปัจจัย B มีนัยสำคัญ 4.2.3 ขั้นตอนที่ 3: ยืนยันตัวแปร แสดงผลในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A <sub>B</sub> B <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1300	1390	1290.31 to 1489.69	AB significant
2	A <sub>M</sub> B <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1180	1230	1130.31 to 1329.69	
3	B <sub>B</sub> C <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1440	1390	1290.31 to 1489.69	BC significant
4	B <sub>M</sub> C <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1210	1230	1130.31 to 1329.69	
5	B <sub>B</sub> D <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1370	1390	1290.31 to 1489.69	BD not significant
6	B <sub>M</sub> D <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1100	1230	1130.31 to 1329.69	
7	B <sub>B</sub> E <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1370	1390	1290.31 to 1489.69	BE not significant
8	B <sub>M</sub> E <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1120	1230	1130.31 to 1329.69	

จากผลการทดลองพบว่า A<sub>B</sub>B<sub>B</sub>R<sub>M</sub>, A<sub>M</sub>B<sub>M</sub>R<sub>B</sub> และ B<sub>B</sub>C<sub>B</sub>R<sub>M</sub>, B<sub>M</sub>C<sub>M</sub>R<sub>B</sub> มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นปัจจัย B

จึงมีอิทธิพลร่วมกับปัจจัย A และ C ดังนั้นจึงมีปัจจัย A, B, C และอันตรกิริยา AB และ BC ที่มีนัยสำคัญ

4.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร แสดงผลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ตัวแปร

	A Best	A Marginal	C Best	C Marginal
B	1390 1390	1420	1420 1390	1380
B	1330 1360	1380	1330 1360	1390
Best	1410 1410		1410 1410	
	1300		1440	
5585	Median=1390	Median=1400	Median=1410	Median=1385
B	1200	1160 1170	1160	1200 1170
Marginal	1170	1220 1250	1170	1220 1250
		1240 1230		1240 1230
		1180		1210
4790	Median=1185	Median=1220	Median=1165	Median=1220

A best	= 1390+1185=2575	C best	= 1410+1165=2575
A marginal	= 1400+1220=2620	C marginal	= 1385+1220=2605
A <sub>B</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>M</sub> B <sub>M</sub>	= 1390+1220=2610	B <sub>B</sub> C <sub>B</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>M</sub>	= 1410+1220=2630
A <sub>M</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>B</sub> B <sub>M</sub>	= 1400+1185=2585	B <sub>B</sub> C <sub>M</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>B</sub>	= 1385+1165=2550

อิทธิพลหลักของปัจจัย A = (2620-2575) / 2 = 22.5  
 อิทธิพลหลักของปัจจัย B = (5585-4790) / 4 = 198.75  
 อิทธิพลหลักของปัจจัย C = (2605-2575) / 2 = 15  
 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B = (2610-2585) / 2 = 12.5  
 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย B และ C = (2630-2550) / 2 = 40  
 จากตารางที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัยสามารถสรุปได้ว่าปัจจัย B มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X ซึ่งมีค่าคือเท่ากับ 198.75 และปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับ 2 คือการเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย B และ C โดยมีค่าเท่ากับ 40 หรือเรียกว่า Pink X และปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอันดับสุดท้ายคือ ปัจจัย A โดยมีค่าเท่ากับ 22.5 หรือเรียกว่า PalePinkX

สรุป จากผลลัพธ์ข้างต้นแสดงอย่างชัดเจนว่า ปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดยาลูมิเนียม

4.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ทากูชิ

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก (Larger - the -better) และเลือกตารางแนวฉากแบบ L16

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Force	1	42	42	42	0.14	0.720
Size	1	156420	156420	156420	523.87	0.000
Thick	1	650	650	650	2.18	0.190
Length	1	0	0	0	0.00	0.978
Time	1	2	2	2	0.01	0.934
Force*Size	1	240	240	240	0.80	0.404
Size*Thick	1	4290	4290	4290	14.37	0.009
Size*Length	1	6	6	6	0.02	0.890
Size*Time	1	6	6	6	0.02	0.890
Residual Error	6	1792	1792	299		
Total	15	163450				

รูปที่ 1 ข้อมูล ANOVA

จากรูปที่ 1 ข้อมูล ANOVA พบว่า ตัวแปรหลัก (Main Effect) คือ ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดยาลูมิเนียม เนื่องจาก P-value < α = 0.05 ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนสูงสุด

ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก Larger - the -better คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\frac{S}{N} = -10 \log(\sum \frac{1}{y_i^2})/n \quad (2)$$

จากรูปที่ 2 ข้อมูล Signal to Noise Ratios พบว่าปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย E (เวลาในการกดแช่) และปัจจัย D (ความยาวหมุดยาลูมิเนียม) เป็น Robustness คือ ปัจจัยเหล่านี้มีสภาวะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

โดยพบว่าปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 62.81) และปัจจัย C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 62.19) ให้ค่า S/N ratio ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนสูงสุดด้วย ที่ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 1383) และปัจจัย C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 1290) ที่มีค่าสูงเช่นกัน

Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	62.13	61.46	62.08	62.13	62.14
2	62.14	62.81	62.19	62.14	62.13
Delta	0.01	1.34	0.11	0.00	0.00
Rank	3	1	2	5	4

Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	1282	1185	1277	1284	1284
2	1285	1383	1290	1284	1283
Delta	3	198	13	0	1
Rank	3	1	2	5	4

รูปที่ 2 ข้อมูล Signal to Noise Ratios

โดยมีสมการถดถอย คือ

$$Y = 1283.63 - 98.87B - 6.38C - 16.37B*C \quad (3)$$

4.4 การเปรียบเทียบวิธีออกแบบการทดลอง

จากกรณีศึกษาการย้าหมุดอลูมิเนียม พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปรหลัก คือ ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดยาลูมิเนียม และวิธีการของโชนิน จะได้ปัจจัย A (ขนาดแรงกด) , ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดยาลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 7

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบจุดเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบกันทั้ง 3 วิธีการทดลองการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลอง	ตัวแปร					Signal to noise ratio (S/N)	Linear Model
	A	B	C	AB	BC		
วิธีการทากูชิ		✓	✓			✓	✓
วิธีการของไชนิน	✓	✓				✓	
2 <sup>k</sup> Factorial Design		✓	✓			✓	✓

ตารางที่ 8 สรุปเปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูชิ ไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน 2<sup>k</sup> Factorial Design

หัวข้อที่เปรียบเทียบ	วิธีการของทากูชิ	วิธีการของไชนิน	การออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
เปอร์เซ็นต์จำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลงได้	80 ครั้ง (ลดลง 50%)	10 ครั้ง (ลดลง 93.75%)	160 ครั้ง
ต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	ต่ำ	สูง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)
หลักการของการวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratio	Median	ANOVA
สมการถดถอย	มี	ไม่มี	มี
ความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางสถิติ	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA)
ความเชื่อมั่นในทางสถิติ	สูง (ใช้ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ ANOVA)
จำนวนตัวแปรที่ใช้ได้กับการทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัวแปรจำนวนมาก การทดลองก็ยังมีน้อยอยู่ดี)	น้อย (เพราะยังมีจำนวนตัวแปรมาก การทดลองก็ยิ่งมาก)

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษาของการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยมีทั้งหมด 5 ปัจจัย พบว่าการออกแบบการทดลองของทากูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง อีกทั้งยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่า คือ 80 ครั้ง (ลดลง 50%) ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่า

วิธีการของทากูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือใช้เพียง 10 ครั้ง (ลดลง 93.75%) ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทากูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา สามารถสรุปได้ว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแฟคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่มากขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ผู้วิจัยจึงเสนอการออกแบบการทดลองแบบวิธีการของทากูชิ และวิธีการของไชนิน เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ที่ลดจำนวนครั้งในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการของทากูชิและไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่งนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลอง ทำให้สามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Montgomery, Douglas C. (2013). Design and analysis of experiments. 8<sup>th</sup> ed. Hoboken, NJ : Wiley.

[2] Bhote, K. (2000). World Class Quality : Using Design of Experiment to Make It Happen. 2<sup>nd</sup> ed. Amacom. New York

[3] Peace, Glen Stuart. (1993). Taguchi method : a hands-on approach. Addison-Wesley Publishing Company.

[4] สมชาย ม้วนโคกสูง. (2553). การหาจุดเหมาะสมสำหรับการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[5] Andrew, thomas.; & Jiju, Antony. (2004). Applying Shainin's variables search methodology in aerospace applications. Assembly Automaton. 24: 184-191.

[6] พิชาติ สุขเจริญพงษ์. (2550). "Shainin DOE : เทคนิคของไชนินสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ," ในเอกสารประกอบการสัมมนาสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.

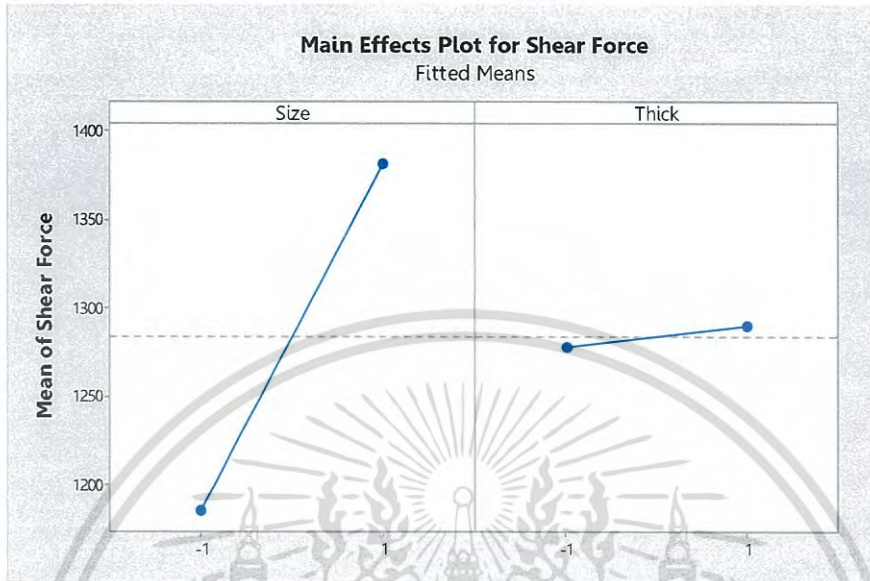
[7] P.J. Ross. (1996). บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย, สืบค้นจาก <http://digilib.library.tu.ac.th/thesis/en/0423/04chapter3.pdf>

[8] ยศวิจน์ ศิริกรมลชัย. (2554). การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการไชนิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ).

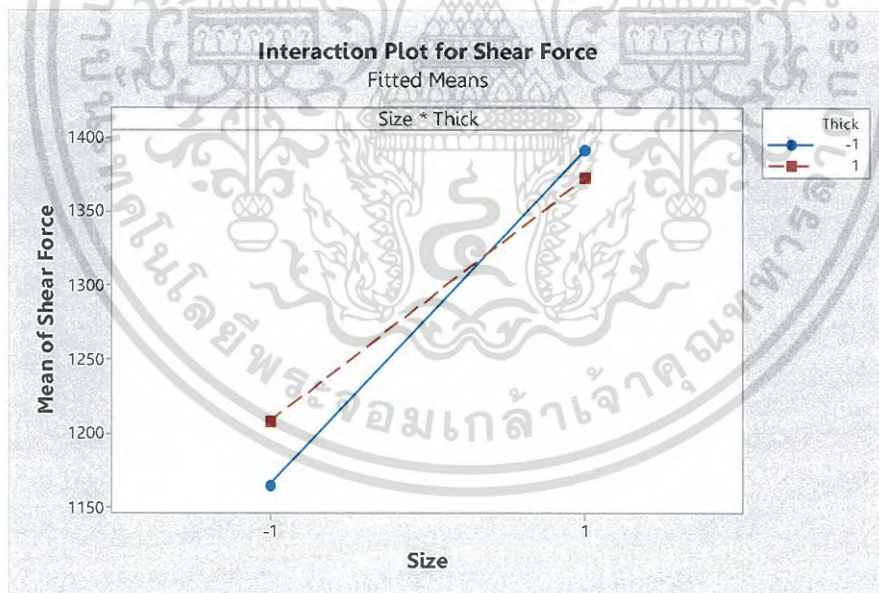


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม

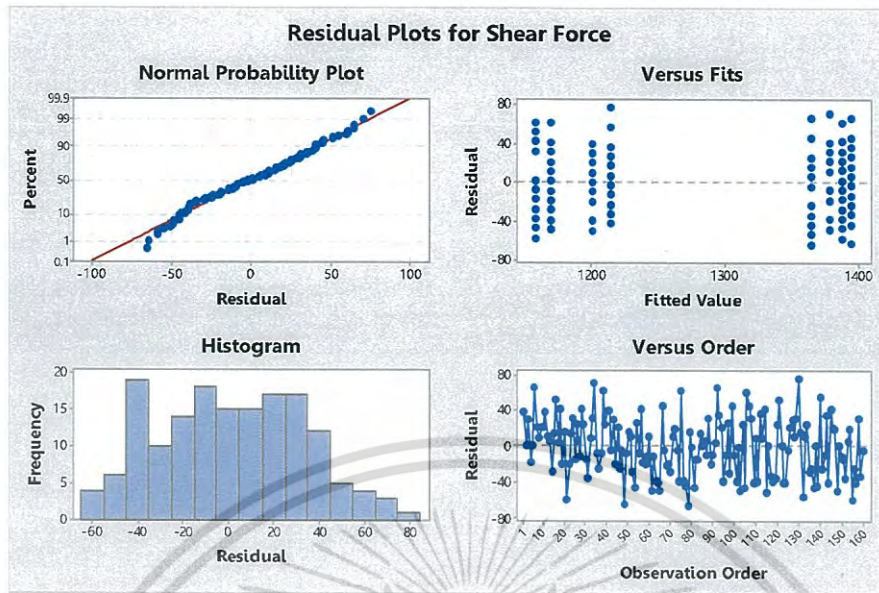


รูปที่ ข.1 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ) และ C (ความหนาของงาน)



รูปที่ ข.2 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC

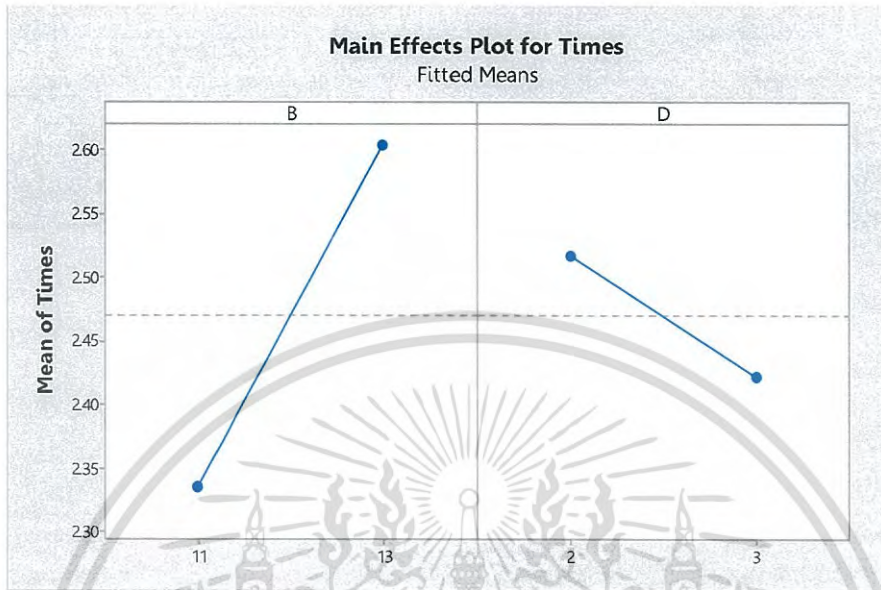
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



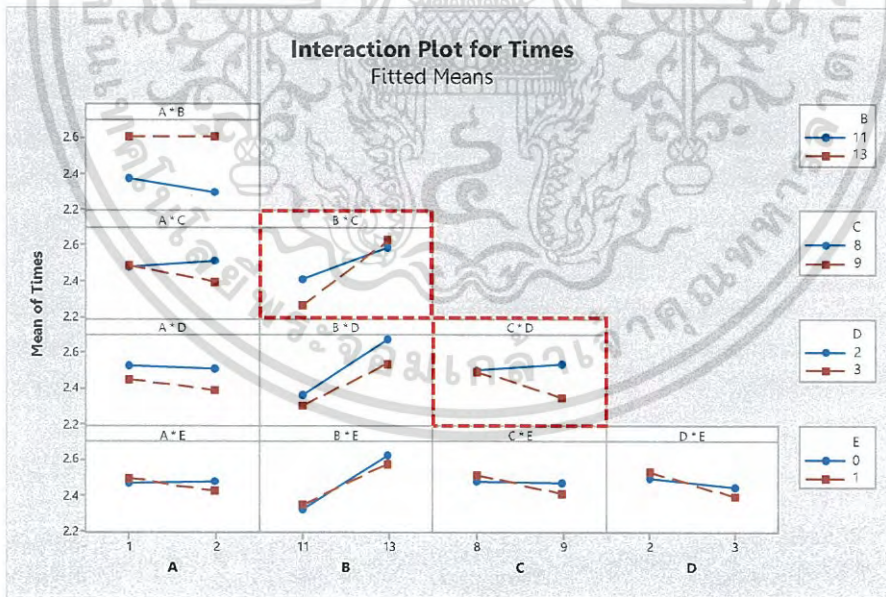
รูปที่ ข.3 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ

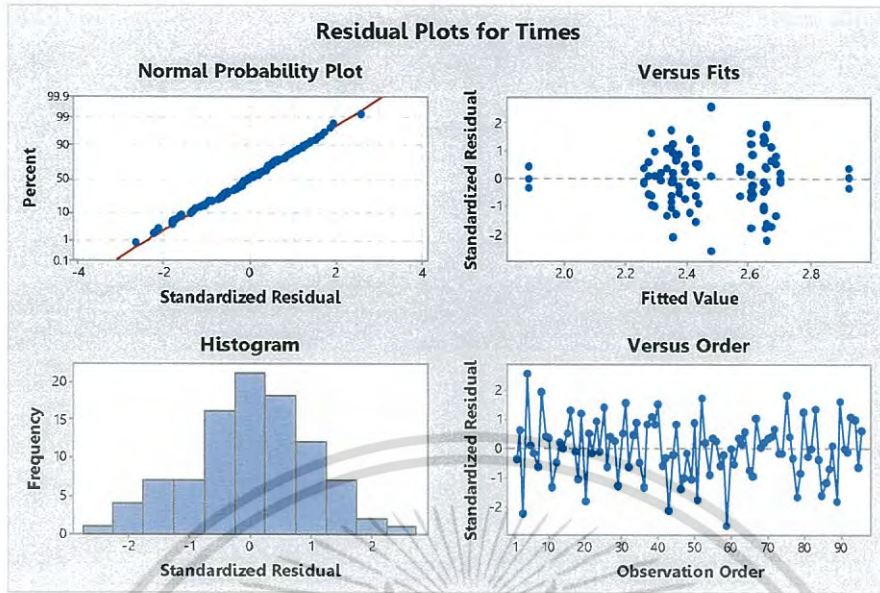


รูปที่ ข.4 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก) และตัวแปร D (ความกว้างของลำตัว)



รูปที่ ข.5 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC และตัวแปร CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 กราฟแสดง Residual Plots for Times



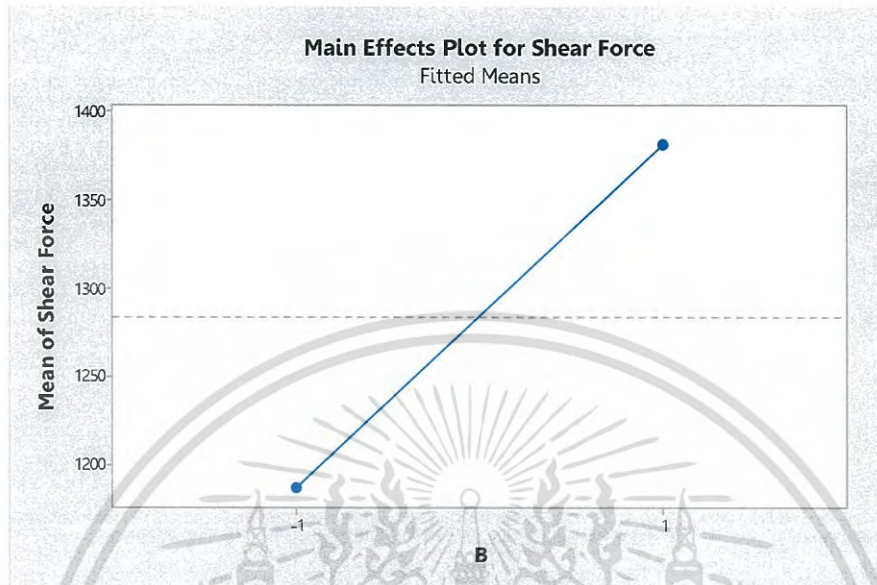
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



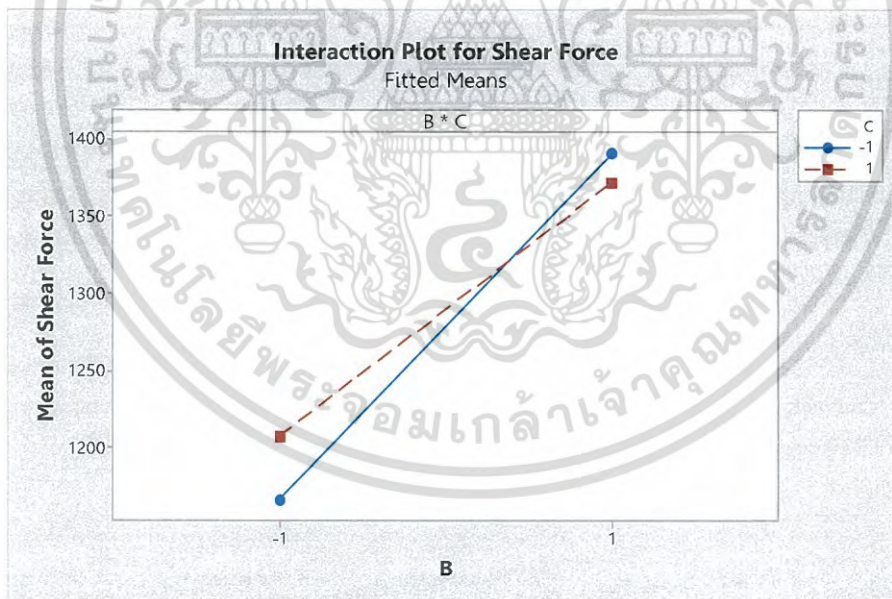
ภาคผนวก ค  
การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม

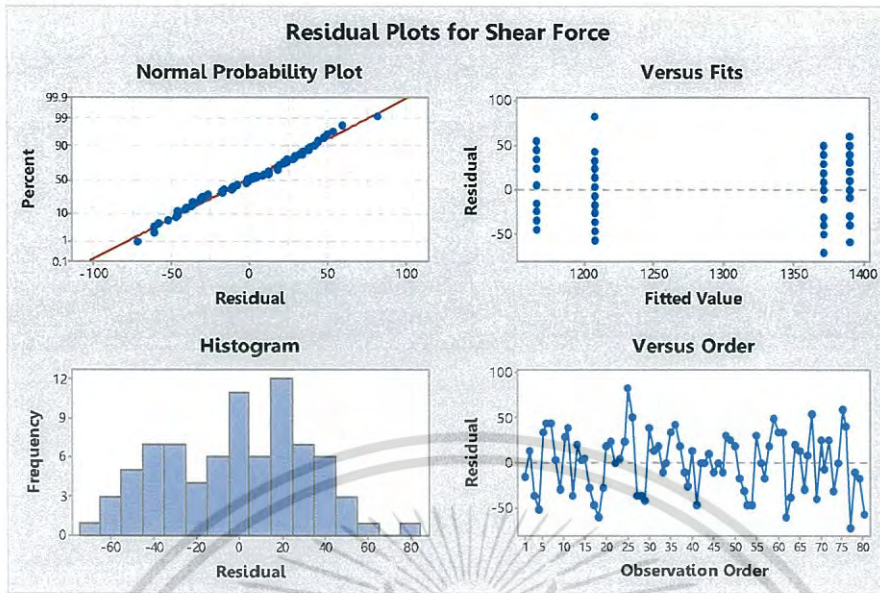


รูปที่ ค.1 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ)



รูปที่ ค.2 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

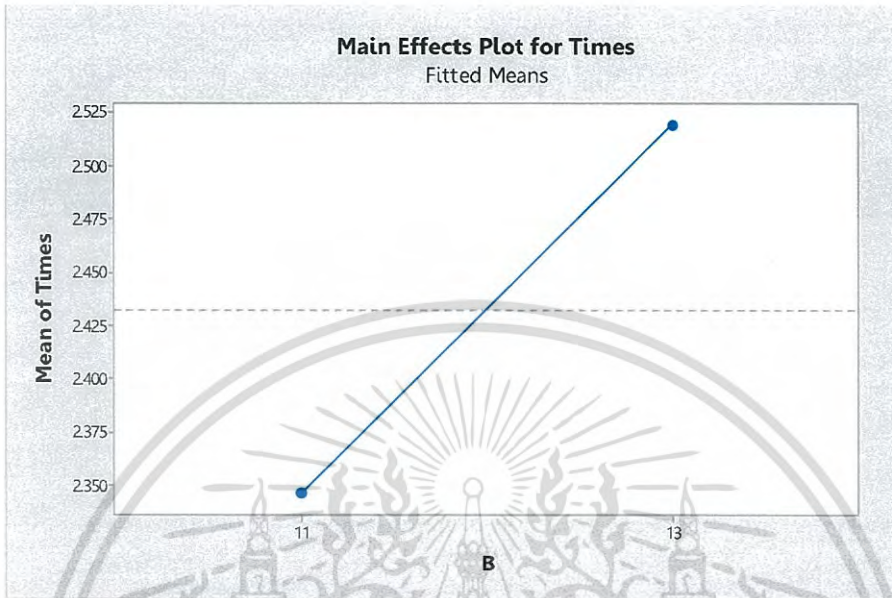


รูปที่ ค.3 กราฟแสดง Residual Plots for Shear Force

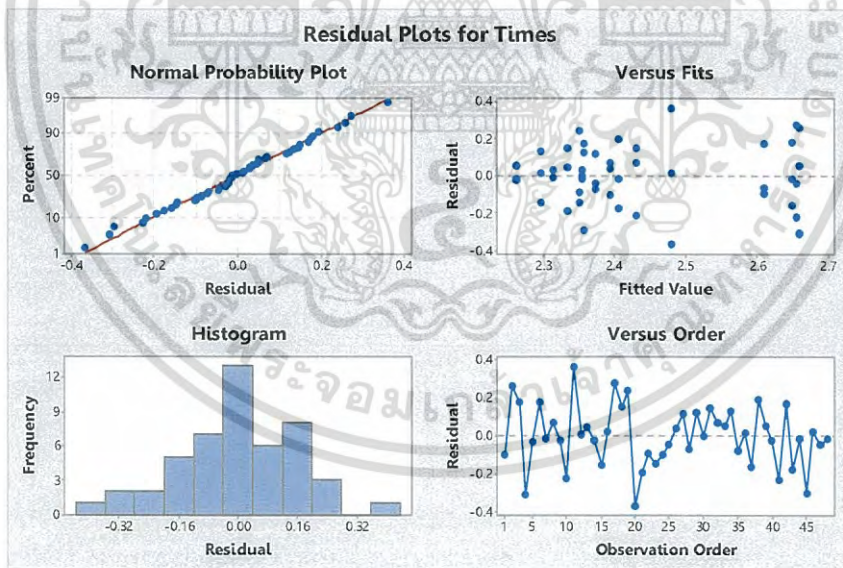


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ



รูปที่ ค.4 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก)



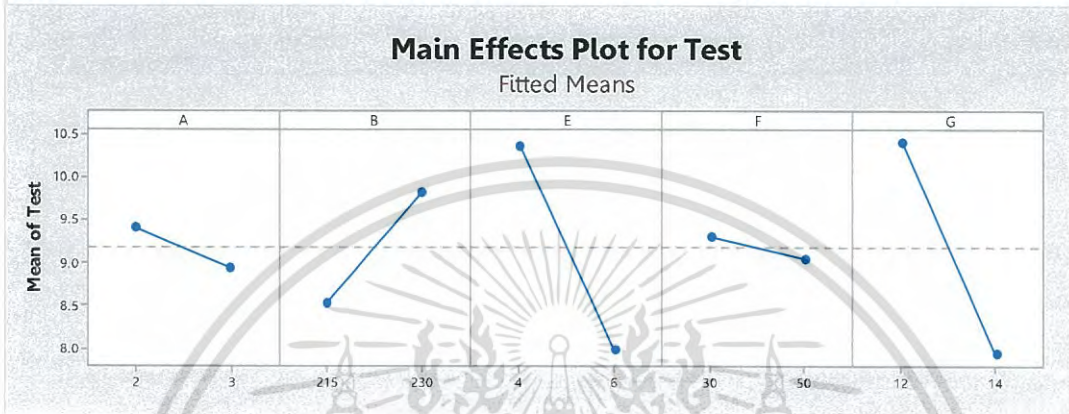
รูปที่ ค.5 กราฟแสดง Residual Plots for Times

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

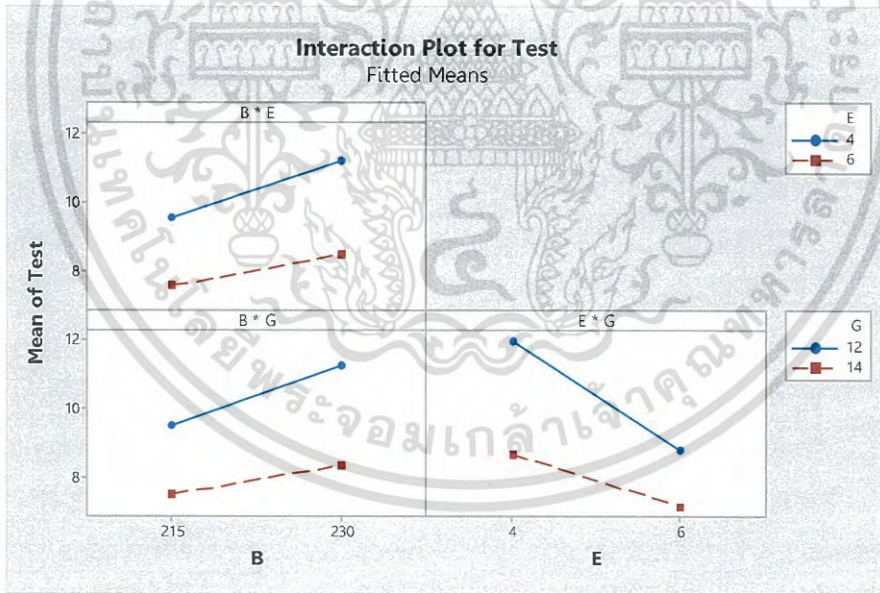
กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก

1) การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{7-1}$  Fractional factorial design

1.1) การหาค่าของชิ้นงานฉีดพลาสติก



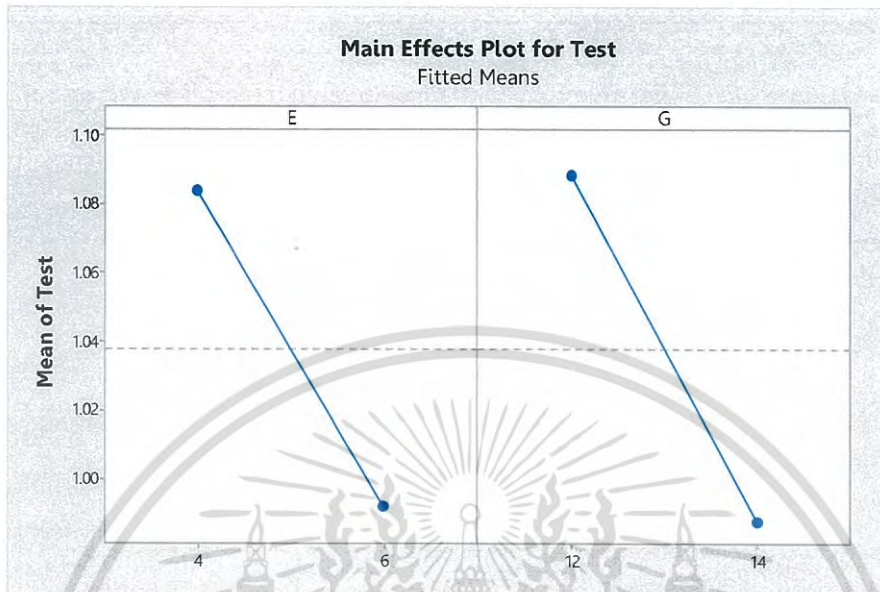
รูปที่ ค.6 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร A, B, E, F และตัวแปร G



รูปที่ ค.7 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร BE, BG และตัวแปร EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

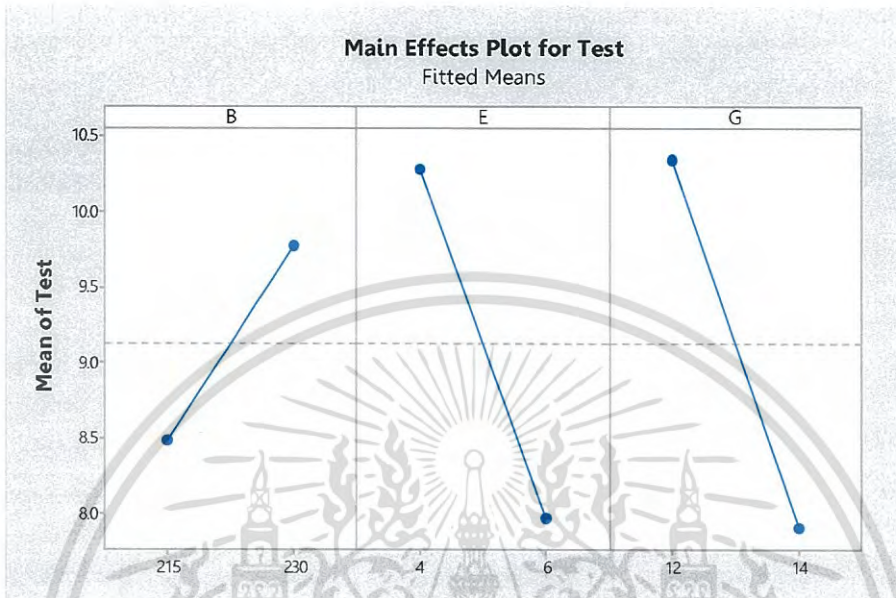
## 1.2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก



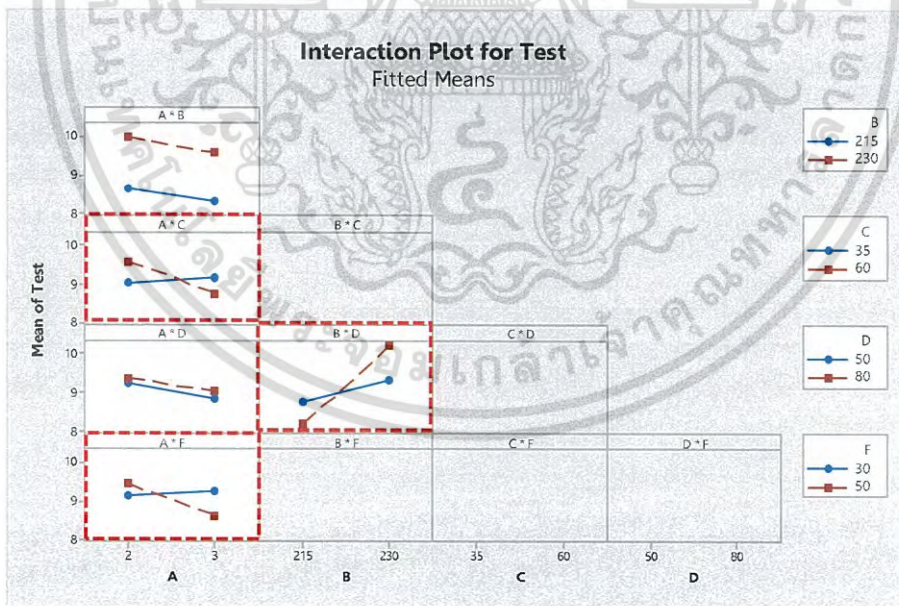
รูปที่ ค.8 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีด) และตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การออกแบบการทดลองแบบ  $2^{7-3}$  Fractional factorial design  
 2.1) การหาค่าของชิ้นงานฉีดพลาสติก



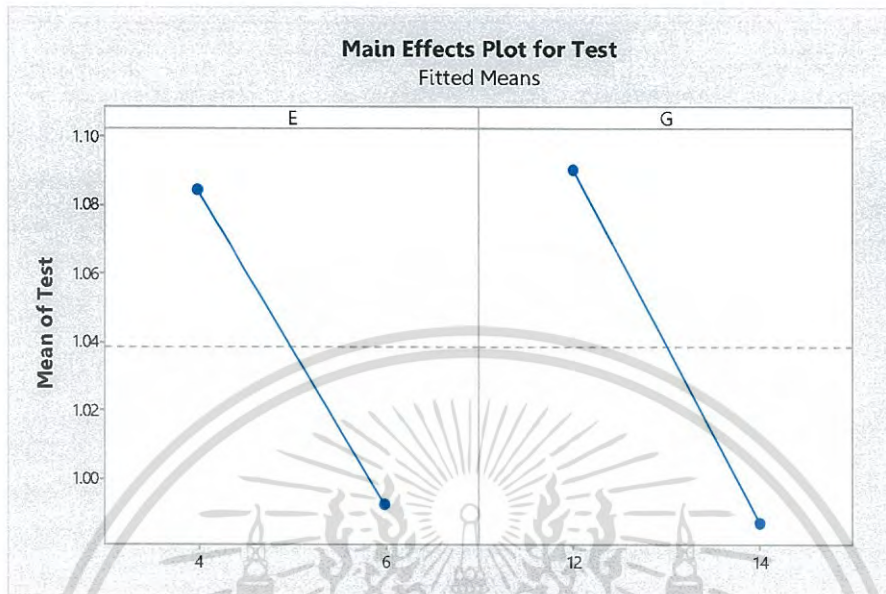
รูปที่ ค.9 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร B, E และ G



รูปที่ ค.10 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปร AC, AF และตัวแปร BD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก



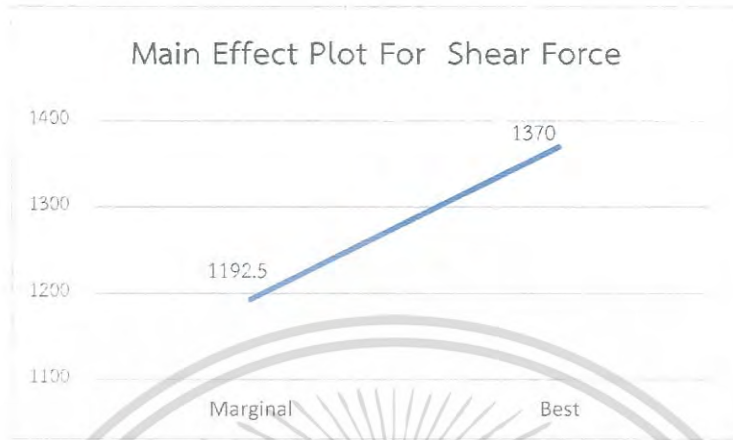
รูปที่ ค.11 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น) และตัวแปร E (เวลาในการฉีดอัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

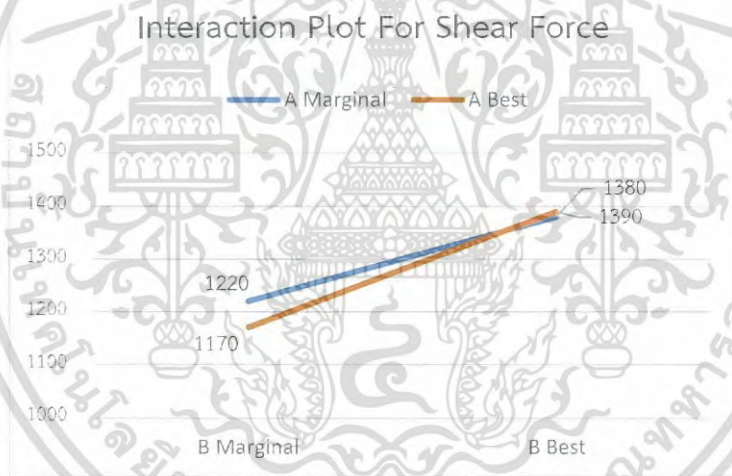


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

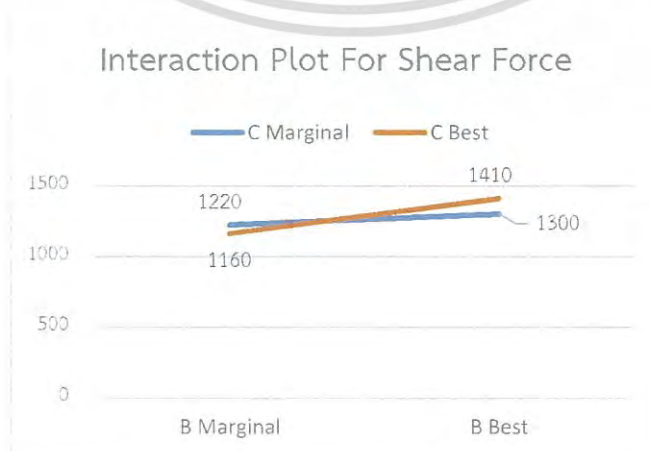
กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้ายหมุดลูมิเนียม



รูปที่ ง.1 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ขนาดรูเจาะ)



รูปที่ ง.2 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ B



รูปที่ ง.3 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ



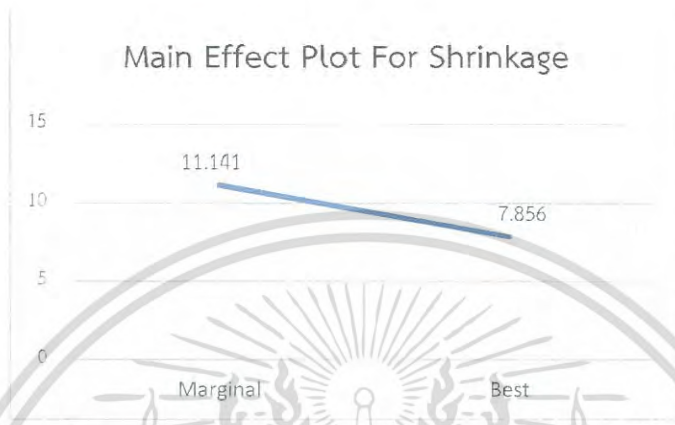
รูปที่ ง.4 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร B (ความยาวของปีก)



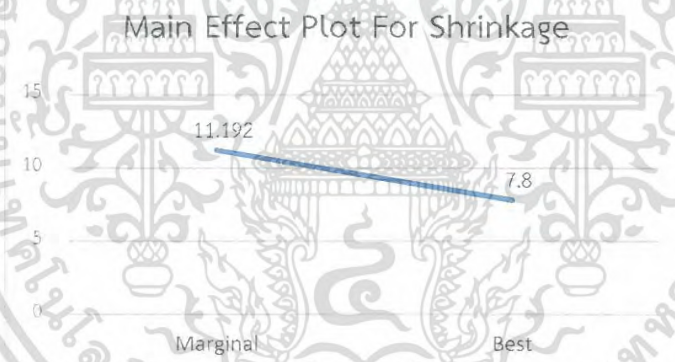
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก

1) การหาค่าของชิ้นงานฉีดพลาสติก



รูปที่ 5.5 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีด)



รูปที่ 5.6 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)



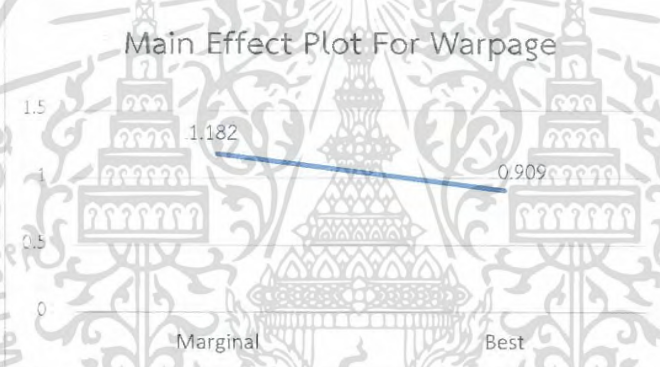
รูปที่ 5.7 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

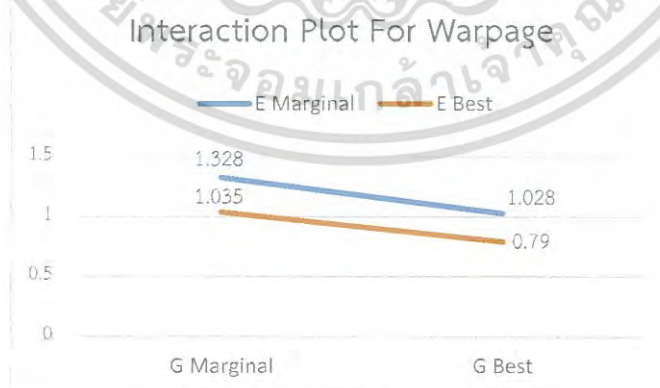
2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก



รูปที่ ง.8 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร E (เวลาในการฉีดขึ้นรูป)



รูปที่ ง.9 กราฟอิทธิพลหลักของตัวแปร G (เวลาในการหล่อเย็น)



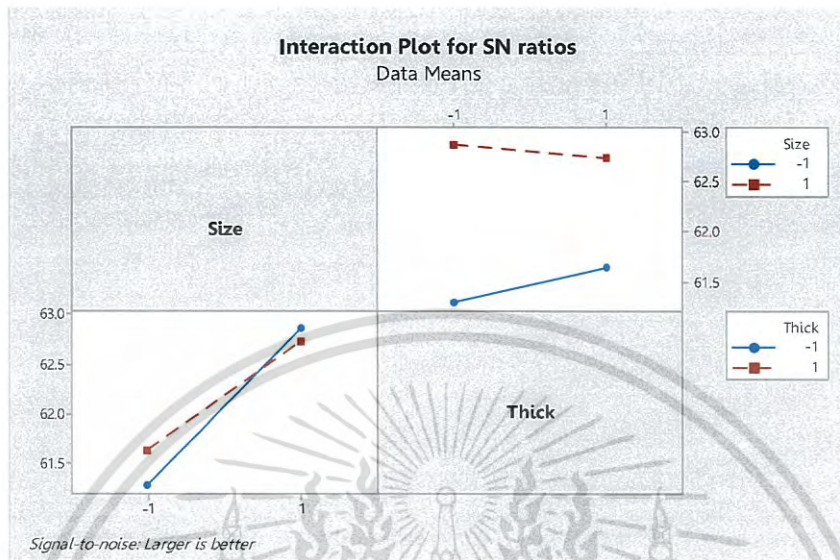
รูปที่ ง.10 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



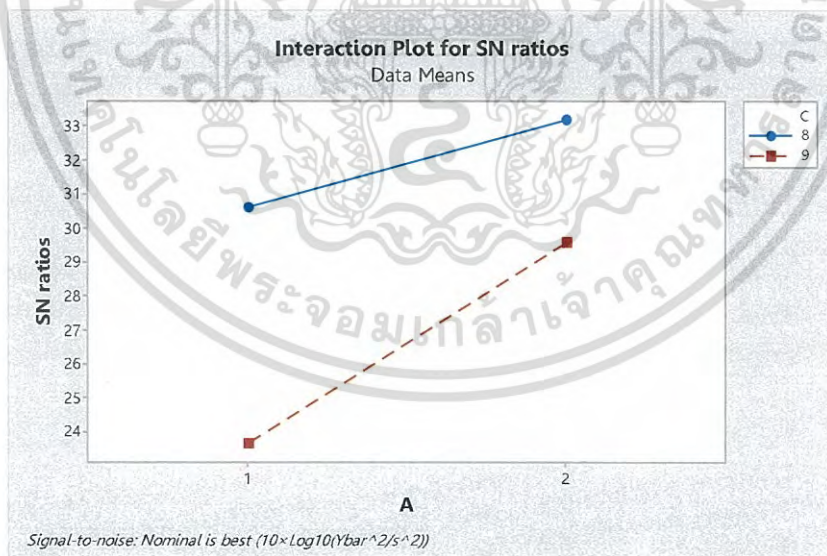
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม



รูปที่ จ.1 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร B และ C

กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ

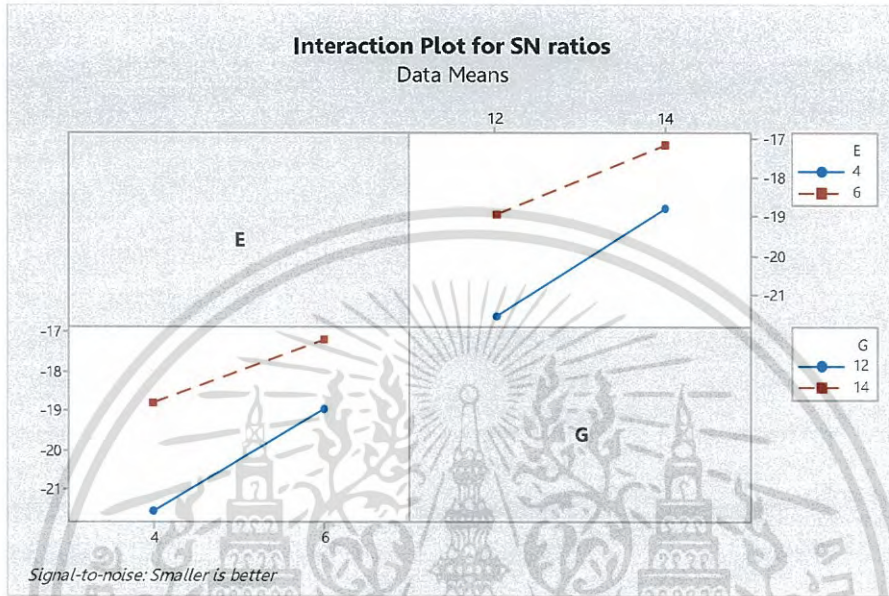


รูปที่ จ.2 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร A และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

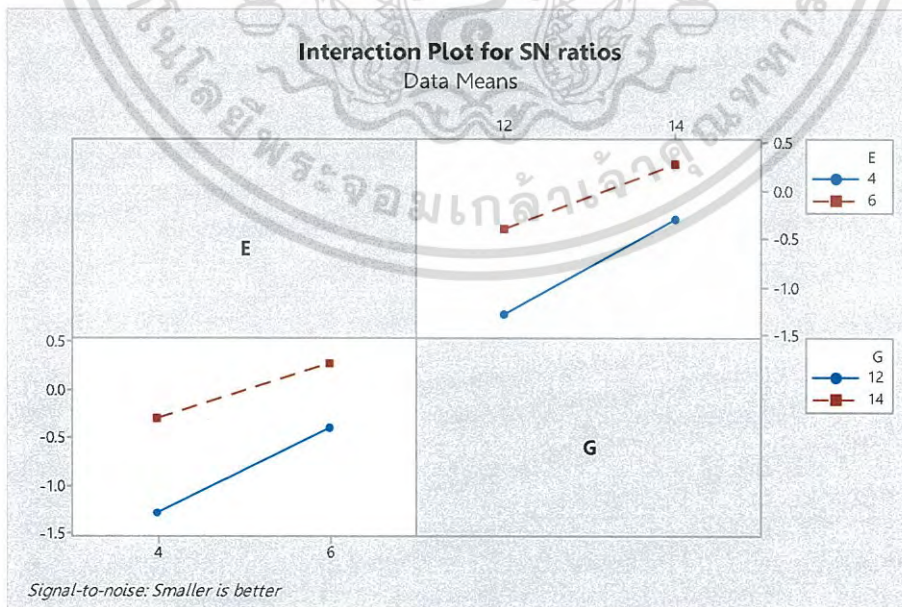
กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก

1) การหัดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก



รูปที่ จ.3 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

2) การบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก



รูปที่ จ.4 กราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปร E และ G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 1 : กระบวนการย้าหมุดลุมิเนียม

ตารางที่ ๑.1 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าลุมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญ  
ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบ การทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแรงเฉือนสูงสุดของ หมุดย้าลุมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญ					Signal-to- noise ratios	Linear Model
	B	C	AB	BC	BCD		
$2^k$ Factorial Design	✓	✓		✓	✓		✓
$2^{k-1}$ Fractional Factorial Design	✓			✓			✓
หลักการค้นหาตัวแปร ของซินิน	✓		✓	✓			
วิธีการทากูชิ	✓			✓		✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 2 : เฮลิคอปเตอร์กระดาษ

ตารางที่ ฉ.2 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับระยะเวลามากที่สุดในการร่อนลงจอดของเฮลิคอปเตอร์กระดาษอย่างมีนัยสำคัญ							Signal-to-noise ratios	Linear Model
	B	D	BC	CD	ACDE	BCDE	ABCDE		
2 <sup>k</sup> Factorial Design	√	√	√	√	√	√	√		√
2 <sup>k-1</sup> Fractional Factorial Design	√								√
หลักการค้นหาตัวแปรของไซนิน	√								
วิธีการทากูชิ	√							√	√

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีศึกษาที่ 3 : กระบวนการฉีดพลาสติก

ตารางที่ ฉ.3 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลกับการเกิดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติก  
อย่างมีนัยสำคัญ ของทั้ง 4 วิธีของการออกแบบการทดลอง

วิธีการ ออกแบบ การทดลอง	ตัวแปรที่มีอิทธิพล												Signal-to- noise ratios (S/N)	Linear Model		
	การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก						การบิดงอของชิ้นงาน ฉีดพลาสติก									
	A	B	E	F	G	BE	BG	EG	B	E	G	BE			EG	
$2^{k-1}$ Fractional Factorial Design	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
$2^{k-3}$ Fractional Factorial Design		✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓					✓
หลักการ ค้นหา ตัวแปรของ ซินิน			✓		✓			✓		✓	✓		✓			✓
วิธีการทฤษฎี		✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวธนกานต์ วิชิระประเสริฐ
วัน เดือน ปีเกิด	18 กันยายน 2535 ที่จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่	99/6 หมู่ 2 ตำบลเสม็ด อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. “การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการทากูชิ กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม (Experimental Design with Shainin and Taguchi Methods : A Case Study of Aluminum Riveting Process)” วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ฉบับประจำเดือน มกราคม-มิถุนายน 2559 ปีที่ 11 ฉบับที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้