การลดของเสียประเภทริ้วในกระบวนการผลิตแผ่นหลังคาโปร่งแสง

นายศรัณย์ ณัฐพูลวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WRINKLE DEFECT REDUCTION IN FIBERGLASS REINFORCED PLASTIC ROOF PROCESS

Mr.Saran Natpulwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

502109

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดของเสียประเภทริ้วในกระบวนการผลิตแผ่นหลังคาโปร่งแสง
โดย	นายศรัณย์ ณัฐพูลวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

ศรัณย์ ณัฐพูลวัฒน์ : การลดของเสียประเภทริ้วในกระบวนการผลิตแผ่นหลังคาโปร่งแสง. (WRINKLE DEFECT REDUCTION IN FIBERGLASS REINFORCED PLASTIC ROOF PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพประเภทริ้วในกระบวนการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาพอลีเอสเตอร์เสริมใยแก้ว และเสนอสภาวะการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อให้เกิดปัญหาริ้วน้อยที่สุด โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองในรูปของความยาวชิ้นงานเฉลี่ยก่อนเกิดริ้ว โดยอาศัยหลักวิธีการออกแบบการทดลอง ในการทำการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของใยแก้ว โดยพิจารณาเลือกปัจจัยมาทำการทดลองได้แก่ ความหนาแน่นชิ้นงาน ความเร็วในการสายใยแก้ว และระยะห่างเส้นใยแก้ว โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับการทดลอง กำหนดระดับของปัจจัยโดยกำหนดสภาวะการผลิตในปัจจุบันเป็นระดับกลาง สำหรับระดับสูงและระดับต่ำ กำหนดโดยการเพิ่มและลดระดับของปัจจัยจากสภาวะปัจจุบันโดยไม่ให้กระทบกับคุณภาพของสินค้า วิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองโดยใช้แผนการทดลอง 3^3 แฟคทอเรียล วิเคราะห์หาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมโดยประเมินจากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และสุดท้ายนำสภาวะการผลิตที่คำนวณได้ไปทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะเดิม

ผลการศึกษาพบว่า (1) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพประเภทริ้วมากที่สุด คือ ความหนาแน่นชิ้นงาน ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของใยแก้วและความหนืดของน้ำยา นอกจากนี้ปัจจัยหลักเรื่องความเร็วในการสายไปกลับของเส้นใยแก้วและระยะห่างเส้นใยแก้วต่างก็มีผลเช่นกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 95.00% (2) สภาวะการผลิตที่ทำให้ความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้วสูงสุดที่ 42.8 เมตร คือ ความหนาแน่นชิ้นงานเท่ากับ 1.196 กรัม/ลบ.ซม. ความเร็วในการสายไปกลับของเส้นใยแก้วเท่ากับ 25.23 สโตรคต่อนาที และ ระยะห่างเส้นใยแก้วเท่ากับ 6 ซม. และ (3) จากสภาวะการผลิตใหม่ดังกล่าวข้างต้นสามารถลดปัญหาผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพประเภทริ้วลงได้ จากเดิม 2.24% เหลือ 1.26% คิดเป็นสัดส่วนที่ลดลง 43.75% ซึ่งมีมูลค่าการประหยัด 705,600 บาทต่อปี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2550

4871447421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD: DOE / ANOVA

SARAN NATPULWAT: WRINKLE DEFECT REDUCTION IN FIBERGLASS REINFORCED PLASTIC ROOF PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 125 pp.

The objectives of this research were to find causes and factors that affect the occurrence of wrinkles being rejected product and to find the solutions to prevent such problems by considering the responsive variables of the average product length before the wrinkles appeared. The research used the method of experimental design which began with the study of factors that caused the instability of fiberglass. The factors chosen for the experiment were the density of composite, speed of fiberglass waving, and space between each fiberglass chord. Each factor contained three levels which would be analyzed to find the significant factor by using the 3^3 factorial experiments, to find the operate condition by using the response surface method and brought the results to compare with the current condition.

The result found that (1) the factor that affects the most was the density of composite which was the relation between fiberglass quantity and viscosity. However, other factors, the speed of fiberglass waving and space between each fiberglass chord were also affecting the wrinkle occurrence with 95.00% confidence. (2) the operate condition that helped increasing the average product length before the wrinkles appeared to 42.8 m. was at the density of composite equals to 1.196 g/cu.cm., the speed of fiberglass waving equals to 25.23 Stroke/min, and space between each fiberglass chord equals to 6 cm. (3) the above operate condition that helped decreasing the problems of the product non-conformance with wrinkles from 2.24 percent to 1.26 percent which is 43.75 percent of the current condition. The cost saving is 705,600 Baht per year.

Department: INDUSTRIAL ENGINEERING Student's Signature.....

Field of Study: INDUSTRIAL ENGINEERING Advisor's Signature.....

Academic Year: 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงซึ่งท่านได้ชี้แนะแนวทางและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี หากไม่มีท่านคอยช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สำเร็จลงได้ และขอกราบขอบพระคุณประธานและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ และ รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก ที่ได้คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพนักงานทุกระดับในโรงงานที่ได้คอยให้ความรู้ ,ความช่วยเหลือ ในการทดลองเป็นอย่างดี ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ ขอกราบขอบคุณบิดามารดา ซึ่งได้อดทนและอดออมในการเลี้ยงดู และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจที่จะนำไปเป็นแนวทางไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 รายละเอียดวัตถุดิบ 3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 7
2.3 สาเหตุความสูญเสีย 9
2.4 หลักการออกแบบการทดลอง 14
2.4.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต 16
2.4.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง 17
2.4.3 คำจำกัดความ 17
2.4.4 หลักในการออกแบบการทดลอง 17
2.4.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง 18
2.4.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง 20
2.4.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing) 21
2.4.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง 23
2.4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) 26
2.4.10 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง 33
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์สภาพปัจจุบัน 37
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา 37
3.2 การวิเคราะห์การเกิดปัญหาอาการริ้วเพื่อนำไปสู่การดำเนินการวิจัย 52
3.3 ข้อสันนิษฐานเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ (Reject) อาการริ้ว 57

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย 58
4.1 การค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของใยแก้ว 58
4.1.1 การเลือกปัจจัยหลักสำหรับการดำเนินการด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง .. 60
4.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัย 61
4.1.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง 61
4.1.4 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง 61
4.1.5 แผนการทดลองเบื้องต้น 62
4.1.6 แผนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม 63
4.2 การดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล 63
4.2.1 การดำเนินการทดลองเบื้องต้น 63
4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองเบื้องต้น 65
4.2.3 การดำเนินการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม 67
4.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสม 67
4.3 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขสภาวะเหมาะสม 68
4.3.1 การทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 68
4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 69

บทที่ 5 ผลการดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล 70
5.1 ผลการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของใยแก้ว 70
5.1.1 ปัจจัยควบคุมกระบวนการผลิต (Process Operating Condition) 70
5.1.2 ปัจจัยรบกวน 70
5.1.3 การกำหนดระดับของปัจจัยหลัก 71
5.1.4 ตัวแปรตอบสนอง 74

หน้า

5.2 ผลการดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ผล 75
5.2.1 ผลการทดลองเบื้องต้น 75
5.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น 76
5.2.3 ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม 85
5.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองหาสภาวะเหมาะสม 92
5.3 ผลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขสภาวะเหมาะสม 105
5.3.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 105
5.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 106
5.3.3 สรุปผลการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 108
5.4 การแก้ไขปัญหาผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพประเภทอื่น ๆ 108

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 111
6.1 สรุปผลการวิจัย 111
6.2 ภาพรวมของการปรับปรุง 112
6.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย 114

รายการอ้างอิง 116

ภาคผนวก 117

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 125

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน 29
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างรูปลอนของผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคาพอลีเอสเตอร์เสริมใยแก้วต่างๆ . 38
ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาพอลีเอสเตอร์เสริมใยแก้ว 40
ตารางที่ 3.3 ปริมาณและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ (Reject) จำแนกตามรายเดือน..... 46
ตารางที่ 3.4 ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ (Reject), รายละเอียดของปัญหา
และแนวทางที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุง 47
ตารางที่ 3.5 ชื่อกำกับชิ้นงานสำหรับหาเปอร์เซ็นต์ใยแก้ว 53
ตารางที่ 3.6 เปอร์เซ็นต์ใยแก้วแต่ละตำแหน่งในแผ่นหลังคาแผ่นเต็ม (แผ่นที่มีอาการริ้ว) 54
ตารางที่ 3.7 เปอร์เซ็นต์ใยแก้วแต่ละตำแหน่งในแผ่นหลังคาแผ่นเต็ม (แผ่นปกติ) 56
ตารางที่ 4.1 แผนการทดลองเบื้องต้น (Data Matrix Randomized) 64
ตารางที่ 4.2 ตารางโครงสร้างคู่แฝดแฝง (Alias Structure) 65
ตารางที่ 4.3 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน 65
ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบระดับของปัจจัยที่สภาวะปัจจุบันและที่สภาวะที่เหมาะสม..... 68
ตารางที่ 5.1 สรุประดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง..... 74
ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลองเบื้องต้น 76
ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น 5 ปัจจัย 77
ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น (Without M/C Speed)... 78
ตารางที่ 5.5 การคำนวณหาปริมาตรน้ำยาที่ความหนืดและสัดส่วนต่าง ๆ 86
ตารางที่ 5.6 ปริมาตรใยแก้วที่สัดส่วนต่าง ๆ..... 87
ตารางที่ 5.7 ความหนาแน่นชิ้นงานที่ความหนืดและสัดส่วนใยแก้วต่าง ๆ..... 88
ตารางที่ 5.8 ความหนาแน่นชิ้นงานเรียงลำดับจากน้อยไปมาก..... 89
ตารางที่ 5.9 ระดับการทดลองของปัจจัยความหนาแน่น 90
ตารางที่ 5.10 ตารางการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม 91
ตารางที่ 5.11 ตารางสรุปการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม 92
ตารางที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองหาสภาวะเหมาะสม 92
ตารางที่ 5.13 ผลการดำเนินการตามวิธี Stepwise Resression 101
ตารางที่ 5.14 การวิเคราะห์สมการถดถอย (Coded units) 102
ตารางที่ 5.15 การวิเคราะห์สมการถดถอย (Uncoded units) 103

หน้า

ตารางที่ 5.16 ระดับของปัจจัยที่สภาวะปัจจุบันและที่สภาวะที่เหมาะสม 106
ตารางที่ 5.17 ผลการเก็บข้อมูลการประยุกต์ใช้เงื่อนไข 106
ตารางที่ 5.18 ตารางการทดสอบสมมติฐาน 107
ตารางที่ 5.19 ตารางเปรียบเทียบค่าความยาวเฉลี่ยเกิดริ้วที่คำนวณได้จาก Model
กับผลการผลิตจริง 108
ตารางที่ 5.20 การแก้ไขปัญหาผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพที่ทราบสาเหตุแล้ว 109

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ราคาน้ำมันดิบในช่วงเดือนสิงหาคมเดียวกันตั้งแต่ปี ค.ศ.2001 ถึง 2006 1
รูปที่ 2.1 ลักษณะการรับแรงดึง 8
รูปที่ 2.2 ลักษณะการรับแรงกดอัด 8
รูปที่ 2.3 ลักษณะการรับแรงเฉือน 9
รูปที่ 2.4 ลักษณะการรับแรงดัด 9
รูปที่ 2.5 รูปแบบแผนผังก้างปลา 14
รูปที่ 2.6 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ 15
รูปที่ 2.7 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์ 16
รูปที่ 2.8 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 24
รูปที่ 2.9 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 25
รูปที่ 3.1 แผนผังองค์กร 37
รูปที่ 3.2 การระบุขนาดกระเบื้องมุงหลังคาพอลีเอสเตอร์เสริมใยแก้ว 39
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการผลิต 39
รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการผลิตตามตำแหน่งของเครื่องจักร 42
รูปที่ 3.5 แผนภูมิราคาวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงเทียบปีฐาน 2003 43
รูปที่ 3.6 แผนภูมิอัตราผลิตภาพด้านวัตถุดิบ 44
รูปที่ 3.7 แผนภูมิส่วนประกอบต่าง ๆ ของของเสีย 44
รูปที่ 3.8 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ (%Reject) 2006 (January-August) 45
รูปที่ 3.9 ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ (Reject) แยกตามอาการ 46
รูปที่ 3.10 ของเสียตามกระบวนการผลิต 50
รูปที่ 3.11 ปริมาณของเสียแยกตามกระบวนการย่อย 51
รูปที่ 3.12 ของเสียกระบวนการย่อยการขึ้นรูปลอน (Form) 51
รูปที่ 3.13 น้ำหนักใยแก้วในชิ้นงานที่มีอาการริ้วและชิ้นงานปกติ 52
รูปที่ 3.14 เปอร์เซ็นต์ใยแก้วในชิ้นงานที่มีอาการริ้วและชิ้นงานปกติ 52
รูปที่ 3.15 ภาพการแบ่งแผ่นหลังคาโปร่งแสงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ใยแก้ว 53
รูปที่ 3.16 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณใยแก้วตามแนวยาวชิ้นตัวอย่างริ้ว (SD1) 55
รูปที่ 3.17 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณใยแก้วตามแนวขวางชิ้นตัวอย่างริ้ว (SD2) 55
รูปที่ 3.18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณใยแก้วตามแนวยาวชิ้นตัวอย่างปกติ (SD3) 56

หน้า

รูปที่ 3.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณใยแก้วตามแนวขวางชิ้นตัวอย่างปกติ (SD4) 57
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบระบบตัดใยแก้ว..... 58
รูปที่ 4.2 แผนภาพเชิงเส้นระบบตัดใยแก้ว..... 59
รูปที่ 4.3 ผังก้างปลาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อสัดส่วนใยแก้ว..... 59
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จาก Inverter(Hz)
กับความเร็วการส่ายไปกลับของใยแก้ว(Stroke/นาที)..... 72
รูปที่ 5.2 กราฟ Normal Probability Plot of Effect..... 78
รูปที่ 5.3 แผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัย..... 79
รูปที่ 5.4 กราฟ Normality Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน..... 81
รูปที่ 5.5 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล..... 82
รูปที่ 5.6 ค่าส่วนตกค้างกับความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้วที่ถูกทำนาย..... 83
รูปที่ 5.7 กราฟ Main Effect Plot ของค่าความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้ว..... 84
รูปที่ 5.8 กราฟ Interaction Effect Plot ของค่าความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้ว..... 84
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความหนาแน่น..... 85
รูปที่ 5.10 กราฟ Normal Probability Plot of Effect..... 93
รูปที่ 5.11 แผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัย..... 93
รูปที่ 5.12 กราฟ Normality Probability Plot..... 95
รูปที่ 5.13 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล..... 96
รูปที่ 5.14 ค่าส่วนตกค้างกับความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้วที่ถูกทำนาย..... 97
รูปที่ 5.15 กราฟ Main Effect Plot ของค่าความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้ว..... 98
รูปที่ 5.16 กราฟ Interaction Effect Plot ของค่าความยาวเฉลี่ยมากสุดก่อน..... 98
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเส้นใยแก้วกับความเร็วการส่ายไปกลับเส้นใยแก้ว
ที่ความหนาแน่นชิ้นงาน 1.185 g/cu.cm..... 99
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเส้นใยแก้วกับความเร็วการส่ายไปกลับเส้นใยแก้ว
ที่ความหนาแน่นชิ้นงาน 1.191 g/cu.cm..... 99
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเส้นใยแก้วกับความเร็วการส่ายไปกลับเส้นใยแก้ว
ที่ความหนาแน่นชิ้นงาน 1.203 g/cu.cm..... 100
รูปที่ 5.20 กราฟสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลกับค่าความยาวเฉลี่ยก่อนเกิดริ้ว (m/time)..... 104

รูปที่ 5.21 กราฟ Contour plot ของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นชิ้นงาน
กับความเร็วการส่ายไปกลับเส้นใยแก้วที่ระยะห่างเส้นใยแก้ว 6.0 cm 104
รูปที่ 5.22 กราฟ Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นชิ้นงาน
กับความเร็วการส่ายไปกลับเส้นใยแก้วที่ระยะห่างเส้นใยแก้ว 6.0 cm 105
รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร 107
รูปที่ 6.1 ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพแยกตามขั้นตอนการผลิตหลังการดำเนินงานวิจัย 112