



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการยึดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก
สำหรับชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

Determination of the Optimal Parameters in the Anisotropic Conductive Film Bonding Process
for Head Stack Assembly in Hard Disk Drives Using Design of Experiments

นามผู้วิจัย นางสาวอัจฉรีญา เนตรพุกณะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ไอลดา ตริรัตน์ตระกูล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ สุพิทักษ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สืบสังข์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในกระบวนการยึดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก
สำหรับชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

Determination of the Optimal Parameters in the Anisotropic Conductive Film Bonding Process
for Head Stack Assembly in Hard Disk Drives Using Design of Experiments

โดย

นางสาวอัจฉรีญา เนตรพุกกณะ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัญริญา เนตรพูกณะ 2557: การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการ
ยัดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิกสำหรับชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วย
วิธีการออกแบบการทดลอง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 111 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญและกำหนดสภาวะที่ดีที่สุดของ
กระบวนการยัดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Conductive Film, ACF) สำหรับ
การประกอบชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญ
คือ ค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาว กระบวนการยัดติด ACF เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่แทน
การบัดกรีอัลตราโซนิกในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน เนื่องจากช่วยลดรอบเวลาและความผิด
พลาดในการยัดติด จากการศึกษาข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษาและเอกสารที่เกี่ยวข้อง พบว่า
พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการยัดติด ACF ได้แก่ (1) อุณหภูมิ (2) เวลา และ
(3) น้ำหนักที่ใช้ในการยัดติด ในงานวิจัยนี้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2
ระดับ โดยมีตัวแปรตอบสนองทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว
ได้แก่ หัวที่ 0 (HD_0) หัวที่ 1 (HD_1) หัวที่ 4 (HD_4) และ หัวที่ 5 (HD_5) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
แรงดึงลอกฟิล์มกาว เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการยัดติด ACF

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ค่าพารามิเตอร์ทั้งสามมีผลต่อกระบวนการยัดติด
ACF อย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที
และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม โดยมีค่าพยากรณ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุดที่หัว HD_0 ,
 HD_1 , HD_4 และ HD_5 เท่ากับ 40.40, 40.37, 44.21 และ 39.85 กรัมแรง ตามลำดับ และค่าเบี่ยงเบน
มาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่น้อยที่สุด เท่ากับ 3.952 กรัมแรง ซึ่งอยู่ในช่วงค่าเป้าหมายที่
โรงงานกรณีศึกษากำหนด จากการทดลองเพื่อยืนยันผล พบว่า ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ย
แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่หัว HD_0 , HD_1 , HD_4 , HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวมี
ค่าสอดคล้องกับค่าพยากรณ์และค่าเป้าหมายที่โรงงานกรณีศึกษากำหนด

Autchareeya Natepukkana 2014: Determination of the Optimal Parameters in the Anisotropic Conductive Film Bonding Process for Head Stack Assembly in Hard Disk Drives Using Design of Experiments. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering.
Thesis Advisor: Assistant Professor Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 111 pages.

This research aims to study significant parameters and determine the optimal parameters in the Anisotropic Conductive Film (ACF) bonding process for Head Stack Assembly (HSA) in hard disk drives by considering the important quality characteristic, which is the peel force of ACF film. The ACF bonding process has been recently developed to replace the Ultrasonic Trace Bonding process because it can significantly reduce the cycle time and failure of the bonding. According to a case study plant and literature, it was found that the parameters that significantly affected the process efficiency included (i) bonding temperature, (ii) bonding time, and (iii) bonding weight. In this research, a 2-level Factorial design of multiple responses, including mean peel forces at 4 heads and standard deviation of the peel forces, was employed to optimize the parameters in the ACF bonding process for HSA.

According to the experimental analysis, it was found that the optimal parameters were set at the bonding temperature of 170 °C, the bonding time of 5 seconds and the bonding weight of 6 kg, where the predictive values of maximum mean of the peel force at HD₀, HD₁, HD₄ and HD₅ were 40.40, 40.37, 44.21, 39.85 g_f, respectively, and minimum standard deviation of the peel force was 3.952 g_f. These values were in the target range of the case study factory. According to the confirmation experiments, it was found that 95% confidence intervals of the maximum mean of the peel force at HD₀, HD₁, HD₄, HD₅ and minimum standard deviation of the peel force was correspondent with the predictive values and target range of the case study factory.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็น ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยนี้มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ดร.ไอลดา ศรีรัตน์ตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณไชยา ทองรัตนะ ผู้จัดการแผนกออกแบบ วิจัย และพัฒนา คุณเจษฎา นนทรีย์ และคุณณัฐวุฒิ แสงศิริณวิน วิศวกรฝ่ายประกอบชุดหัวอ่านเขียน บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (บางปะอิน) จำกัด ที่ให้คำปรึกษา อนุเคราะห์อุปกรณ์ และสถานที่สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนด้านการศึกษาเสมอมา รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อัจฉริญา เนตรพูกณะ

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	7
การตรวจเอกสาร	8
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	97
สรุป	97
ข้อเสนอแนะ	98
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	99
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลองแฟลทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ	105
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลองเพื่อยืนยันผล	109
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 เนื้อหาเอกสารการทำงานของกระบวนการยัดคิด ACF และข้อกำหนดของฟิล์มที่ใช้ในการใช้งานต่างๆ	13
2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณี 3 ปัจจัย	25
3 พารามิเตอร์และระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	47
4 ผลการทดลองแรงดึงลอกฟิล์มกาวของ HD ₀ , HD ₁ , HD ₄ และ HD ₅	48
5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD ₀)	52
6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD ₀) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก	53
7 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD ₁)	58
8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD ₁) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก	59
9 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD ₄)	64
10 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD ₄) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก	65
11 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD ₅)	70
12 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD ₅) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก	71
13 ค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการคำนวณ	77
14 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว	79
15 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก	80
16 ข้อกำหนดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด	85
17 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล	87
18 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD ₀) ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
19 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล	91
20 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4) ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล	92
21 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5) ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล	94
22 การวิเคราะห์ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล	95
23 ค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการพยากรณ์และช่วงความเชื่อมั่น 95% จากการทดลองเพื่อยืนยันผล	98
ตารางผนวกที่	
ก1 ข้อมูลผลการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ	106
ข1 ข้อมูลผลการทดลองเพื่อยืนยันผล	110

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการยัดยัด ACF	3
2 ความสำคัญระหว่างเปอร์เซ็นต์การยัดยัดของฟิล์มกาวกับอุณหภูมิและเวลา	4
3 รายละเอียดอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการยัดยัด ACF ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (ก) ขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความร้อน (ข) ขั้นตอนการให้ความร้อนหรือการบ่ม และ (ค) ขั้นตอนการระบายความร้อน	6
4 ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	9
5 การยัดยัดของแผ่นวงจรหลังกระบวนการยัดยัด ACF	10
6 ชนิดของอนุภาคนำไฟฟ้าที่ใช้ยัดยัด ACF (ก) อนุภาคแข็งและ (ข) อนุภาคอ่อน	12
7 กลไกของกระบวนการยัดยัด ACF	12
8 ขั้นตอนของกระบวนการยัดยัด ACF (ก) ก่อนการติดฟิล์ม ACF (ข) ก่อนการยัดยัด และ (ค) การยัดยัดขั้นสุดท้าย	14
9 รูปแบบการทดสอบแรงดึงลอกฟิล์มกาว	16
10 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ	17
11 ผลกระทบการเกิดอิทธิพลระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B (ก) กรณีไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม และ (ข) กรณีที่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม	20
12 กราฟฮิสโตแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดและความถี่	27
13 กราฟความน่าจะเป็นของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงปกติ	28
14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	29
15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	29
16 กราฟแสดงค่าสูงสุดของ y เมื่อค่า $x^* = 2$	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

17	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าตอบสนองยิ่งมากยิ่งดี (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าตอบสนองยิ่งน้อยยิ่งดี (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าความพึงพอใจสองด้านอยู่ในช่วงเป้าหมายดีที่สุด (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง ค่าความพึงพอใจจะดีที่สุดเมื่อค่าตอบสนองอยู่ในขอบเขตข้อจำกัด	36
18	ผังเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากการยึดติด ACF	43
19	ตัวอย่างหัวชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	45
20	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ	55
21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	55
22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	56
23	การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab	57
24	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ	61
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	61
26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	62
27	การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab	63
28	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ	67
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	67
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	68
31	การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4) จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab	69
32	กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ	73
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	74
35 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5) จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab	75
36 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ	82
37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง	82
38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง	83
39 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab	84
40 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว (HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5) และค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวจากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ตัวอย่างหัวชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	86
41 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดสอบ เพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0)	89
42 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดสอบ เพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1)	90
43 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดสอบ เพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4)	92
44 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดสอบ เพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5)	93
45 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดสอบ เพื่อยืนยันผลของค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว	95

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Y_{HD0}	= ค่าทำนาย (หรือพยากรณ์) ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0)
Y_{HD1}	= ค่าทำนาย (หรือพยากรณ์) ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1)
Y_{HD4}	= ค่าทำนาย (หรือพยากรณ์) ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4)
Y_{HD5}	= ค่าทำนาย (หรือพยากรณ์) ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5)
$Y_{ln S.D.}$	= ค่าทำนาย (หรือพยากรณ์) ของค่า $\ln$ S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว
A	= อุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติด
B	= เวลาที่ใช้ในการยึดติด
C	= น้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด
A*B	= ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติดและเวลาที่ใช้ในการยึดติด
A*C	= ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติดและน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด
B*C	= ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาที่ใช้ในการยึดติดและน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด
A*B*C	= ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติด เวลาที่ใช้ในการยึดติดและน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด
S.D.	= ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยัดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก
สำหรับชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

**Determination of the Optimal Parameters in the Anisotropic Conductive Film
Bonding Process for Head Stack Assembly in Hard Disk Drives
Using Design of Experiments**

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของไทย เป็นอุตสาหกรรมผลิตที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ โดยเน้นการผลิตเพื่อส่งออกและมีศักยภาพในการแข่งขันในตลาดโลกเป็นอันดับต้นๆ ในแต่ละปีมีมูลค่าการส่งออกหลายแสนล้านบาทและยังมีแนวโน้มขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่เพียงเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ยังมีอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ที่ใช้ฮาร์ดดิสก์กันอย่างแพร่หลาย เช่น กล้องถ่ายรูป เครื่องเล่นเกม เครื่องใช้ไฟฟ้า และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น โดยใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการบันทึกข้อมูล และยังมีแนวโน้มในการประยุกต์ใช้กับสินค้าต่างๆ อีกมากมายในอนาคต ด้วยเหตุนี้ทางโรงงานกรณีศึกษา จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงวิธีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้เปรียบด้านเทคโนโลยีกับคู่แข่งในอุตสาหกรรมเดียวกัน

อุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่ง คือ กระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน (Head Stack Assembly, HSA) ซึ่งมีวิธีการประกอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิต 2 วิธี คือ วิธีการยัดติดอัลตราโซนิก หรือยูเอสทีบี (Ultrasonic Trace Bonding, USTB) และวิธีการยัดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก หรือเอซีเอฟ (Anisotropic Conductive Film, ACF) ซึ่งเทคนิคการยัดติดเหล่านี้เป็นเทคโนโลยีหลักที่สำคัญในการประกอบหัวอ่านเขียน (Head Gimbal Assembly, HGA) ต่อเข้ากับแผงวงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit Assembly, FPCA) บนส่วนประกอบของแอกทูเอเตอร์ไพลอทเพลกซ์ (Actuator Pivot Flex Assembly, APFA) กระบวนการยัดติด ACF เป็นเทคโนโลยีการยัดติดที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ส่งผลต่อการลดรอบเวลาและความผิดพลาดในการยัดติดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง การปรับปรุงในส่วนของการยัดติด ACF เป็นเรื่องสำคัญมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ถูกยัดติดด้วยวิธี

USTB เพราะคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม ACF สามารถเปลี่ยนจากวัสดุที่นุ่มและมีความยืดหยุ่นให้เป็นวัสดุที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นหลังจากการยึดติด นอกจากนี้กระบวนการยึดติด ACF ยังสามารถปรับปรุงแก้ไขตัวชิ้นงานที่ผ่านการยึดติดแล้วด้วยการประยุกต์ใช้สารเคมีบางชนิด เช่น อะซิโตนกับเครื่องมือขัดชนิดแข็ง ในการขัดเอาฟิล์ม ACF ที่ผ่านการยึดติดแล้วเกิดข้อผิดพลาดออก เพื่อนำชิ้นงานกลับไปทำการยึดติด ACF ตามกระบวนการได้ใหม่อีกครั้ง

กระบวนการยึดติด ACF มีคุณลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญสำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการยึดติด คือ แรงดึงลอกฟิล์มกาว (Peel Force) ซึ่งค่าที่ได้ต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ โดยสาเหตุที่ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด อาจเกิดจากลักษณะของฟิล์มกาว ACF หลังจากการยึดติดแล้วเกิดการไหม้ดำ หรือฟิล์มกาวหลังการยึดติดหลุดออกได้ง่าย เป็นต้น เนื่องมาจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการยึดติดที่ไม่เหมาะสมจึงเกิดลักษณะข้อบกพร่องดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการยึดติด ACF เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของกระบวนการ ช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการยึดติด ACF ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญของกระบวนการยึดติดเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ โดยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ เพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน และเพิ่มความสามารถในการผลิต

ความเป็นมาและปัญหาของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นหนึ่งในโรงงานที่ประกอบกิจการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหลัก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญใช้จัดเก็บข้อมูลทั้งหมดของเครื่องคอมพิวเตอร์ และสินค้าอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นโปรแกรมใช้งานที่หลากหลาย และไฟล์ข้อมูลต่างๆ รวมทั้งระบบปฏิบัติการ ในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีส่วนของกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งใช้เทคนิคการยึดติดเป็นเทคโนโลยีหลักในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน (HSA) ต่อเข้ากับชุดประกอบแผงวงจรไฟฟ้า (APFA) กระบวนการยึดติด ACF เป็นเทคโนโลยีการยึดติดใหม่ ที่มีผลต่อการลดรอบเวลาและลดความผิดพลาดในการยึดติด อย่างไรก็ตามการปรับปรุงในส่วนของกระบวนการยึดติด ACF เป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากตัวฟิล์ม ACF มีคุณสมบัติเด่นทางกายภาพที่สามารถเปลี่ยนจากวัสดุที่นุ่มและมีความยืดหยุ่นให้กลายเป็นวัสดุที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นได้ สามารถนำไฟฟ้าได้

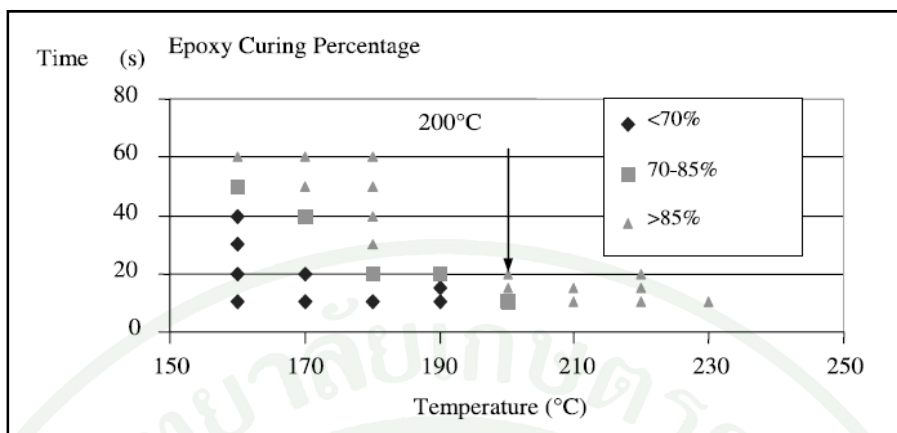
หลังจากการยึดติด นอกจากนี้ในปัจจุบันวิธีการยึดติด ACF ยังสามารถปรับปรุงแก้ไขตัวชิ้นงานที่ผ่านการยึดติดแล้วได้โดยใช้เครื่องมือแรงสำหรับขัดรวมกับการใช้อะซิโตนขัดส่วนของฟิล์มออกแล้วทำการยึดติดซ้ำได้หลายครั้ง

กระบวนการยึดติด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียนมีขั้นตอนที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการยึดติด ACF

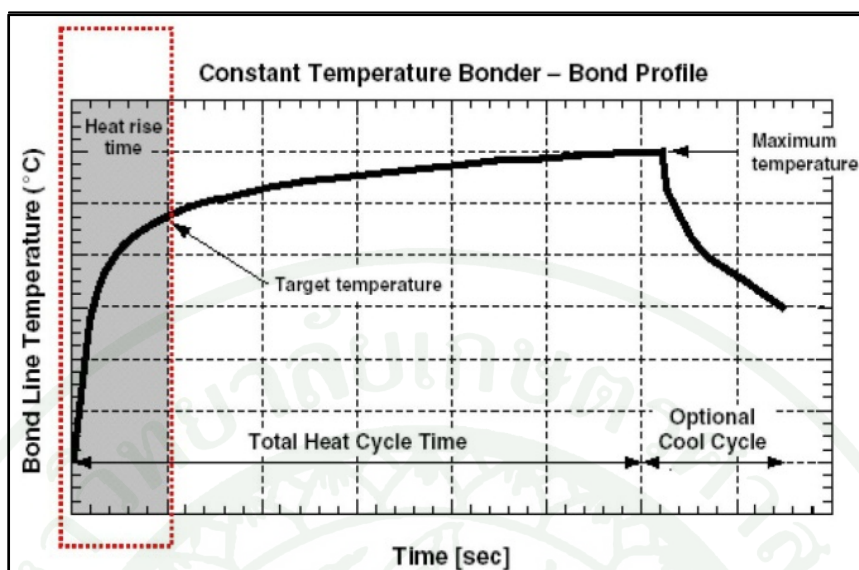
จากการสอบถามพนักงานผู้เชี่ยวชาญและศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ในกระบวนการสุดท้ายของการยึดติด ACF มีพารามิเตอร์ 3 ตัว ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิในการยึดติด เวลาในการยึดติด และน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด ซึ่งความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการตั้งค่าสำหรับการใช้งานในกระบวนการยึดติด เกณฑ์การยอมรับในการยึดติดของฟิล์มกาวที่สมบูรณ์ได้ถูกกำหนดให้อยู่ในระดับที่เกิน 85% ของการยึดติดของฟิล์มกาว ดังแสดงในภาพที่ 2 สภาวะของกระบวนการที่มีอุณหภูมิการยึดติดอยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการยึดติดอยู่ที่ 20 วินาที ทำให้กระบวนการยึดติด ACF มีประสิทธิภาพสูงสุด (Luk, 2002)



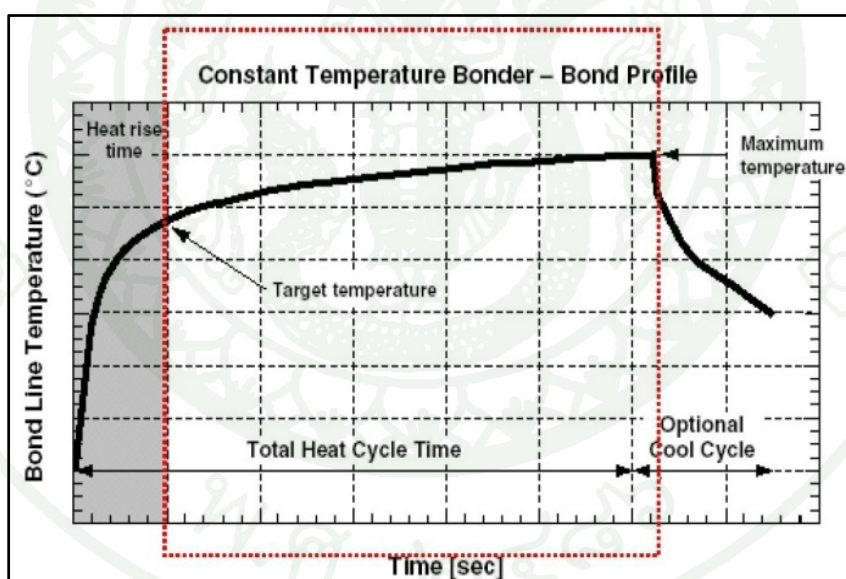
ภาพที่ 2 ความสำคัญระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึดติดของฟิล์มกาวกับอุณหภูมิและเวลา

ที่มา: Luk (2002)

การใช้อุณหภูมิหรือความร้อนในกระบวนการยึดติด ACF ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของความร้อน การบ่มแรงของความร้อน และการระบายความร้อน ซึ่งในขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความร้อนแสดงในภาพที่ 3 (ก) เห็นได้ว่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปยังอุณหภูมิเป้าหมายภายใน 3-8 วินาที โดยในช่วงเวลานี้ฟิล์มกาวจะไหลและอนุภาคนำไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ติดอยู่ระหว่างร่องหรือช่องว่าง หลังจากขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความร้อนแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ ขั้นตอนการให้ความร้อนหรือการบ่มแรงความร้อน ทำให้ฟิล์มกาวถูกบ่มด้วยความร้อนด้วยอุณหภูมิตั้งที่ ช่วงเวลาการให้ความร้อนของขั้นตอนนี้แสดงในภาพที่ 3 (ข) ค่าที่ใช้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป้าหมายและอุณหภูมิที่ใช้ได้สูงสุดของวงจร ทั้งในขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความร้อนและขั้นตอนการบ่มแรงความร้อน ซึ่งถ้าใช้อุณหภูมิในการยึดติดต่ำเกินไปจะส่งผลให้ฟิล์มกาว ACF ไม่แข็งตัวเท่าที่ควร ในขณะที่ถ้าอุณหภูมิในการยึดติดสูงเกินไปจะทำให้ความร้อนไปสลายพันธะของฟิล์มกาวเนื่องจากเกิดการไหม้ของฟิล์มกาวและทำให้ผิวของวัสดุเกิดความเสียหาย ส่งผลให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าลดลงและเกิดช่องว่างของฟิล์มหลังการยึดติดได้ ขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนการระบายความร้อนดังแสดงในภาพที่ 3 (ค) เป็นช่วงที่ทำการยกตัวเทอร์โมด (Thermode) ที่กำลังกดฟิล์มกาวกับตัวชิ้นงานขึ้นเพื่อระบายความร้อน หรือสามารถเป่าลมเข้าไปขณะยึดติดด้วยแรงดันคงที่



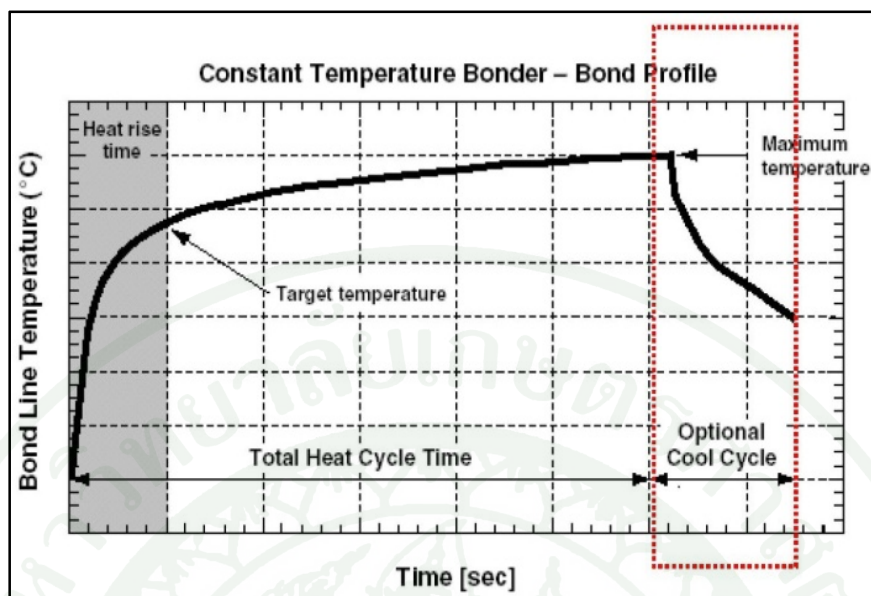
(ก)



(ข)

ภาพที่ 3 รายละเอียดอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการยึดติด ACF ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ
 (ก) ขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความร้อน (ข) ขั้นตอนการให้ความร้อนหรือการบ่ม และ
 (ค) ขั้นตอนการระบายความร้อน

ที่มา: 3M Electronics (2008)



(ค)

ภาพที่ 3 (ต่อ)

จากการสอบถามรายละเอียดข้อมูลในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการยึดติด ACF ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจากวิศวกรฝ่ายประกอบชุดหัวอ่านเขียนของโรงงานกรณีศึกษา พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติดอยู่ในช่วง 170-210 องศาเซลเซียส เวลาในการยึดติดอยู่ในช่วง 5-10 วินาที และน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติดอยู่ในช่วง 2-6 กิโลกรัม เนื่องจากช่วงดังกล่าวของทั้ง 3 พารามิเตอร์ เป็นช่วงที่ทำให้การทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ หลังจากกระบวนการยึดติดแล้วเกิดของเสียน้อยที่สุด

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) มาประยุกต์ใช้ โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพด้านแรงดึงลอกฟิล์มกาวในกระบวนการยึดติด ACF สำหรับการประกอบชุดหัวอ่านเขียน จากนั้นใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อช่วยหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยึดติด ACF ทั้งนี้เพื่อให้กระบวนการยึดติดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้

1. เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการยึดติด ACF ที่มีผลต่อแรงดึงลอกฟิล์มกาวในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน
2. เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการกระบวนการยึดติด ACF สำหรับการประกอบชุดหัวอ่านเขียน

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเฉพาะพารามิเตอร์ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญ คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวระหว่างตำแหน่งหัวยึดติด โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่

1. อุณหภูมิในการยึดติด (Bonding Temperature)
2. เวลาในการยึดติด (Bonding Time)
3. น้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด (Bonding Weight)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิตให้ดีกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด
2. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์หรืออุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน และเป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองดังกล่าว

การตรวจเอกสาร

การตรวจเอกสารแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drives, HDD) เป็นส่วนที่สำคัญของคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่ในการจัดเก็บและบันทึกข้อมูลได้อย่างถาวร ในปัจจุบันมีการใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อใช้บันทึกข้อมูลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายผลิตภัณฑ์ เช่น กล้องถ่ายภาพ เครื่องบันทึกเสียง และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกสร้างให้มีลักษณะเฉพาะสำหรับกระบวนการทำงาน โดยการอ่านหรือเขียนข้อมูลนั้นต้องอาศัยการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนหลายส่วนประกอบเข้าด้วยกัน (ทิมบรรณาธิการ, 2546)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆ อยู่ภายในเคส (Case) มีลักษณะเป็นโลหะถูกปิดผนึกเป็นสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นผงหรือสิ่งอื่นๆ หลุดเข้าไปในระบบ ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1.1 จานแม่เหล็ก (Platter) ซึ่งมีหน้าที่สำหรับการบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแผ่น การบันทึกข้อมูลนั้นใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจานแม่เหล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีมอเตอร์ สำหรับควบคุมการหมุนของจานดิสก์

1.2 แกนหมุน (Spindle) ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการหมุนของจานดิสก์ถ้ามีระดับความถี่ที่สูงก็จะส่งผลให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็ว เพราะส่วนของข้อมูลที่จะถูกหมุนมาอยู่ภายใต้หัวอ่านและเขียนของฮาร์ดดิสก์จะค้นพบข้อมูลที่อยู่ภายใต้หัวอ่านและเขียนเร็วขึ้น ในส่วนนี้จะใช้กลไกที่เรียกว่า ตลับลูกปืนที่มีความเร็วและน้ำหนักกว่ามอเตอร์แบบเก่า สิ่งที่ต้องระวัง คือ ตัวแกนหมุน เพราะตัวแกนหมุนมีความอ่อนไหวและบอบบางมาก ถ้าหากได้รับการกระทบกระเทือนที่รุนแรง ส่งผลให้ตัวลูกปืนสามารถหลุดออกมาจากวงแหวนที่ยึดตัวลูกปืนนั้นได้

1.3 หัวอ่านและเขียน (Read and Write Head) ในส่วนนี้มีหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลจากจานแม่เหล็ก มีลักษณะทางกายภาพ คือ จะติดอยู่กับปลายของแขนหัวอ่านเขียน ซึ่งจะมีอยู่ทั้งส่วนบนและส่วนล่างของจานแม่เหล็ก เมื่อตัวไดรฟ์เริ่มทำงานตัวแกนหมุนจะหมุน ทำให้จานแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ของฮาร์ดดิสก์แต่ละตัว การหมุนด้วยความเร็วนี้เองจะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งจะช่วยยกส่วนแขนหัวอ่านเขียนให้สูงขึ้นจากระดับเดิม ลอยเหนือจานแม่เหล็กเล็กน้อย การลอยอยู่เหนือจานแม่เหล็กมีประโยชน์ต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์มาก ถ้าหากหัวอ่านแตะกับจานแม่เหล็ก จะก่อให้เกิดรอยขีดข่วนอย่างถาวรได้ อาจจะทำให้ไม่สามารถใช้งานได้อีก

1.4 ส่วนเชื่อมต่อ (Interface) ซึ่งเป็นช่องสำหรับเชื่อมต่อกับสายสัญญาณประเภทต่างๆ ตามชนิดของฮาร์ดดิสก์ ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลและรับข้อมูลกับซีพียูได้

1.5 แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arms) อุปกรณ์ชิ้นนี้มีหน้าที่ในการเคลื่อนที่แขนหัวอ่านเขียน ซึ่งส่วนปลายจะมีหัวอ่านและเขียนติดอยู่ ส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของฮาร์ดดิสก์ โดยเป็นส่วนที่บอกถึงความเร็วในการทำงานของตัวไดรฟ์ ตัวแขนของหัวอ่านเขียนจะต้องเคลื่อนหัวอ่านเขียนไปยังตำแหน่งที่กำหนดอย่างแม่นยำ เพื่อให้สามารถเขียนข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

ส่วนประกอบต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงในภาพที่ 4 ดังนี้

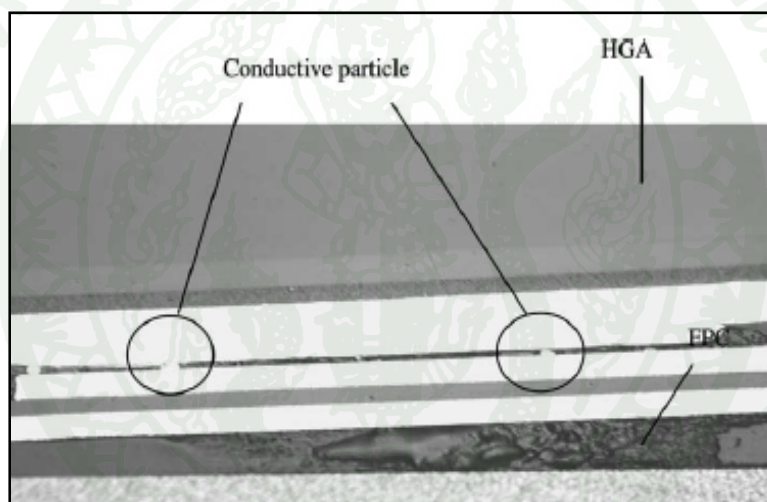


ภาพที่ 4 ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ที่มา: Brain (2011)

2. फिल्मนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก

ฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Conductive Film, ACF) คือ ฟิล์มอีพ็อกซี (Epoxy) ซึ่งผลิตมาจากเทอร์โมพลาสติกหรือสารผสม ตัวฟิล์มกาวจะเต็มไปด้วยอนุภาคของทองหรือทองเคลือบพอลิเมอร์ลักษณะทรงกลมในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้มีคุณสมบัติของฟิล์มเป็นฉนวนไฟฟ้าในทุกทิศทางก่อนการยึดติด แต่สมบัติการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป เหลือเพียงในแนวแกน Z หลังจากการยึดติด การยึดติดของแผ่นวงจรและฟิล์มกาวมีอิทธิพลอย่างมากสำหรับความน่าเชื่อถือของการนำไฟฟ้า เพราะว่าสมบัติการนำไฟฟ้าสามารถบ่งบอกถึงการจับยึดของอนุภาคระหว่างสองแผ่นวงจร การยึดติดที่ผ่านการยึดติด ACF แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การยึดติดของแผ่นวงจรหลังกระบวนการยึดติด ACF

ที่มา: Luk *et al.* (2002)

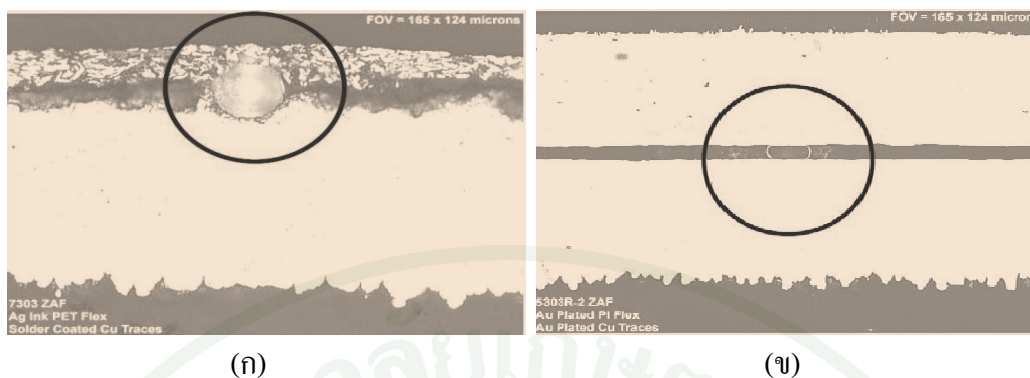
แผ่นวงจรสองแผ่นนั้น คือ ชุดหัวอ่านเขียน (HSA) และแผงวงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น (FPC) จะยึดติดกันด้วยแผ่นฟิล์มกาวกับอนุภาคเพียงเล็กน้อยระหว่างการยึดติดด้วยไฟฟ้า วิธีการยึดติด ACF มีประสิทธิภาพที่ดีในด้านความสะอาดและการยึดติดที่คงที่ เป็นผลมาจากการที่กระบวนการยึดติด ACF มีขั้นตอนที่น้อยกว่าการยึดติดแบบเดิม ต้นทุนในการผลิตโดยรวมค่อนข้างต่ำ และการควบคุมคุณภาพของกระบวนการยึดติด ACF ยังเป็นไปได้ง่าย

การยึดติด ACF มีคุณสมบัติเด่นในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถลดความต้านทานกระแสไฟฟ้า การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลและลดปัญหาการไม่ติดต่อกันของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น การยึดติดชิ้นงานออกมาค่อนข้างบาง ลดปัญหาการปนเปื้อนของดีบุก (Tin) และ Flux ซึ่งจะเกิดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการยึดติดแบบอัลตราโซนิก (USTB) นอกจากนี้ประสิทธิภาพด้านความแม่นยำยังดีกว่า ความแข็งแรงของการยึดติดสูงกว่า รอบเวลาที่ใช้ในการยึดติดต่ำกว่าเพราะการยึดติด 1 ครั้งสามารถยึดติดได้ทุกหัว และที่สำคัญสามารถปรับปรุงแก้ไขชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบได้หลายครั้ง ซึ่งสามารถยึดติดซ้ำตรงรอยเดิมได้อีกด้วย (Luk *et al.*, 2002)

การนำอนุภาคโลหะไปกระจายตัวอยู่ในฟิล์มกาว มีจุดประสงค์เพื่อให้ตัวฟิล์มกาวสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยอนุภาคนำไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มกาวเพื่อใช้ในกระบวนการยึดติด ACF สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนำไฟฟ้าได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ อนุภาคแข็ง และอนุภาคอ่อน ดังนี้

(ก) อนุภาคนำไฟฟ้าแบบแข็ง เป็นอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับวิธีเฟล็กซ์ทูเฟล็กซ์ (Flex-to-Flex) และเฟล็กซ์ทูบอร์ด (Flex-to-Board) ซึ่งจะถูกฝังอยู่ในเทรส (Traces) เพื่อให้มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูง ดังแสดงในภาพที่ 6 (ก)

(ข) อนุภาคนำไฟฟ้าแบบอ่อน เป็นอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในรูปแบบเฟล็กซ์ทูกลาส (Flex-to-Glass) ซึ่งอนุภาคลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการผิรูดที่พื้นผิวหน้าของชิ้นงานที่มีความแข็ง ป้องกันการเกิดรอยบุ๋มและไม่เรียบของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ลักษณะอนุภาคแสดงในภาพที่ 6 (ข)



(ก)

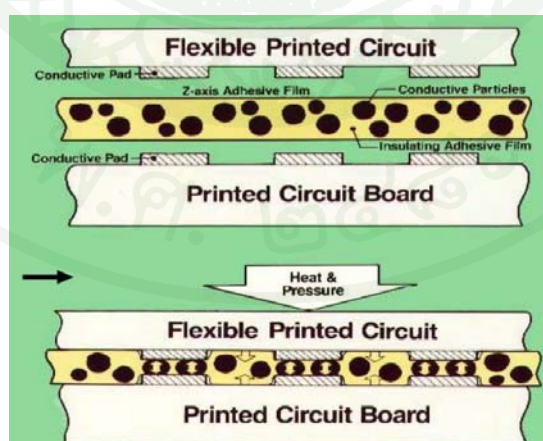
(ข)

ภาพที่ 6 ชนิดของอนุภาคนำไฟฟ้าที่ใช้ยึดติด ACF (ก) อนุภาคแข็งและ (ข) อนุภาคอ่อน

ที่มา: 3M Electronics (n.d.)

3. กระบวนการยึดติด ACF

กระบวนการยึดติด ACF (ACF Bonding Process) เป็นเทคโนโลยีการยึดติดใหม่ที่นิยมใช้ ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งช่วยลดรอบเวลาในการผลิตและช่วยลดความผิดพลาด ในการยึดติดอย่างมีนัยสำคัญ กลไกของกระบวนการยึดติด ACF ในการสร้างการนำไฟฟ้าและ ความเป็นฉนวน แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กลไกของกระบวนการยึดติด ACF

ที่มา: 3M Electronics (n.d.)

จากภาพที่ 7 เป็นภาพแสดงกลไกของกระบวนการยึดติด ACF โดยใช้ฟิล์มกาวที่มีอนุภาคนำไฟฟ้ากระจายตัวอยู่ภายใน เป็นตัวกลางในการยึดติดระหว่างแผงวงจรชนิดยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit) และ แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) โดยการใช้ความร้อนและแรงดันที่ใช้กดแผงวงจรที่เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้าที่ดี เงื่อนไขในการดำเนินงานของกระบวนการยึดติด ACF และข้อกำหนดของ ACF ในการใช้งานต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 1

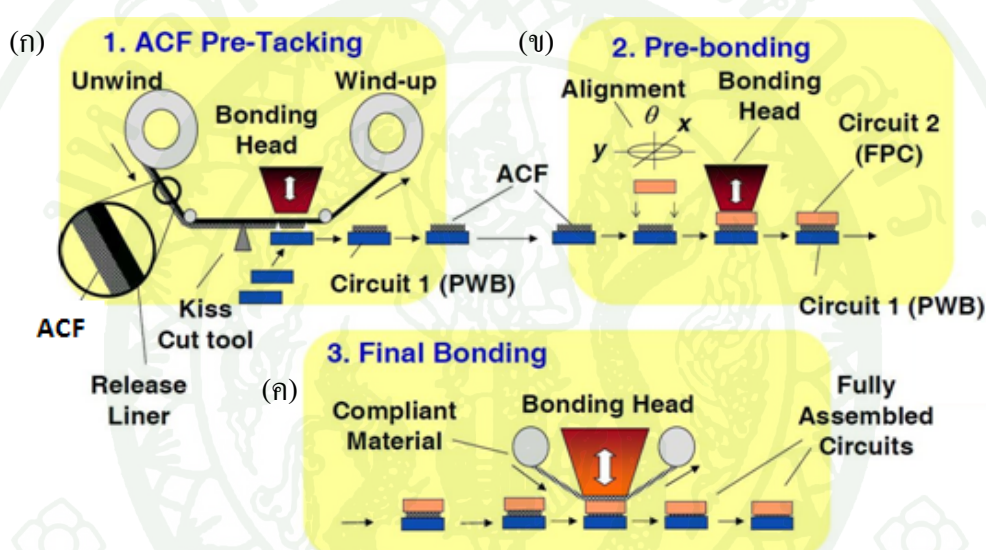
ตารางที่ 1 เงื่อนไขสภาวะการทำงานของกระบวนการยึดติด ACF และข้อกำหนดของฟิล์มที่ใช้ในการใช้งานต่างๆ

รายละเอียด	การประยุกต์ใช้		
	Flex-On-Board	Flex-On-Glass	Flex-On-Board
Bonding Temperature	200degC	170-190degC	135-150degC
Bonding Time	10 sec	20-30 Sec	25 sec
Bonding Pressure	3 MPa	2 to 4 MPa	2 MPa
Particle Diameter	10 micron	6 micron	43 micron
Adhesive Thickness	40 micron	19 micron	75 micron
Pitch (minimum)	200 micron	<100 micron	500 micron
Minimum Pad Area	0.15 sq. mm	0.015 sq. mm	0.75 sq. mm
Connection Resistance	<100 mOhms	<20 ohms	<200 mOhms
90-Degree Peel Adhesion	>700g/cm	>800g/cm	>500g/cm
Temp/Humidity Aging	85degC/85%r.h.	85degC/85%r.h.	70degC/90%r.h.
Temp Cycling	-40 to 100degC	-40 to 100degC	-40 to 80degC

ที่มา: 3M Electronics (n.d.)

3.1 ขั้นตอนการยึดติด ACF

ฟิล์มกาว ACF จะถูกจัดเก็บอยู่ในรูปของม้วนฟิล์มกาวที่มีความกว้างตามกำหนด ก่อนที่จะตัดตามความต้องการตามความกว้างของตัวแผ่นวงจร ฟิล์มกาวที่ออกมาจะถูกแยกชั้นกาว ซึ่งผ่านการผสมอนุภาคนำไฟฟ้าก่อนเข้ากระบวนการ โดยทั่วไปกระบวนการยึดติด ACF ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนก่อนการติดฟิล์มกาว ACF ขั้นตอนก่อนการยึดติด และ ขั้นตอนสุดท้ายของการยึดติด ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขั้นตอนของกระบวนการยึดติด ACF (ก) ก่อนการติดฟิล์มกาว ACF (ข) ก่อนการยึดติด และ (ค) การยึดติดขั้นสุดท้าย

ที่มา: 3M Electronics (n.d.)

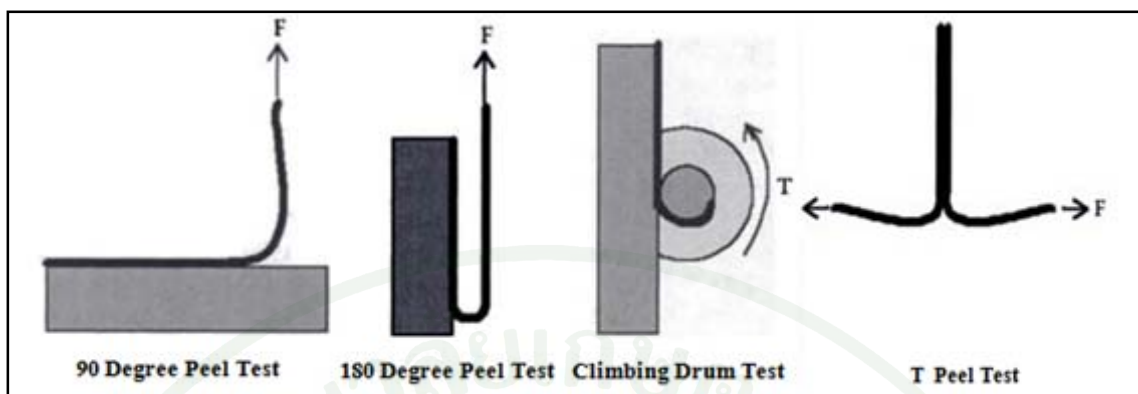
เครื่องจักรกึ่งอัตโนมัติในการเตรียมติดฟิล์มกาวได้แสดงในภาพที่ 8 (ก) ถูกใช้ในการตัดแผ่นฟิล์มกาวในระยะเวลาที่เหมาะสมและติดฟิล์มกาวในส่วนที่ต้องการจะยึดติดบนส่วนของ FPC ฟิล์มกาว ACF ถูกยึดติดลงบนพื้นผิวของ FPC ด้วยเทอร์โมด (Thermode) แสดงในภาพที่ 8 (ข) เงื่อนไขของกระบวนการก่อนติดฟิล์มกาวโดยใช้ฟิล์มกาวจากผู้จัดจำหน่ายซึ่งจะบอกรายละเอียดข้อมูลในยึดติด เช่น อุณหภูมิ ความดัน (หรือแรง) และเวลาที่ใช้ในการยึดติด กระบวนการสุดท้ายของการยึดติดระหว่างแผ่นวงจร HGA และ FPC ได้ถูกกระทำด้วยเครื่องมือที่ใช้ความดันและความร้อนในการยึดติด ตัวยึดติดจะมีลักษณะเป็นเทอร์โมดให้ความร้อน ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในช่วง

ที่กำหนด ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิเริ่มต้นของการตั้งค่าเทอร์โมคมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส เริ่มจากการอุ่นฟิล์มกาวที่อุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส และตั้งค่าอุณหภูมิของเทอร์โมค ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ลักษณะของเครื่องที่ใช้ในการยึดติด ACF แสดงในภาพที่ 8 (ค) ซึ่งประกอบไปด้วยช่วงเริ่มต้นของการให้ความร้อน การให้ความร้อนคงที่ และการระบายความร้อน การบ่มแรงของฟิล์มกาวอีพ็อกซี่จะเกิดขึ้นในช่วงการยึดติด โดยตัวเทอร์โมคต้องมีความสะอาดและขนานกับตัวแผ่นวงจร เพื่อให้ชิ้นงานหลังการยึดติดมีความเรียบสม่ำเสมอภายใต้การควบคุมของ ความดันที่กำหนด

4. การทดสอบแรงดึงลอกของฟิล์มกาว (Peel Force Test)

การทดสอบแรงดึงลอกของฟิล์มกาวจะถูกดำเนินการภายใต้เงื่อนไขโดยการดึงฟิล์มกาว ออกในแนวตั้งฉากของพื้นผิวแผ่นวงจร FPC หลังจากถูกยึดติด เพื่อสามารถวัดประสิทธิภาพของ กระบวนการยึดติด ACF การทดสอบแรงดึงลอกของฟิล์มกาวมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การดึงลอก ฟิล์มกาว 90 องศา (90 Degree Peel Test) การดึงลอกฟิล์มกาว 180 องศา (180 Degree Peel Test) การทดสอบแบบม้วน (Climbing Drum Test) และ การทดสอบแบบตัวที (T Peel Test) ดังแสดงใน ภาพที่ 9 รูปแบบการทดสอบที่นิยมที่สุด คือ การดึงลอกฟิล์มกาว 90 องศา โดยเป็นการทดสอบที่ ผ่านการยอมรับโดยหน่วยงานมาตรฐาน และใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ การยึดติดของฟิล์มกาว

การทดสอบเป็นไปได้อย่างไม่ยุ่งยาก สามารถนำชิ้นงานตัวอย่างวางในตำแหน่งที่กำหนดบน เครื่องทดสอบ ซึ่งเครื่องทดสอบจะออกแบบมาเฉพาะให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนที่ใช้ทดสอบ ใช้แขน จับยึดชิ้นงานเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ขณะทำการดึงลอกฟิล์มกาว จากนั้นกำหนดขอบเขตชิ้นส่วน ในการดึง หนีบปลายด้านใดด้านหนึ่งของแผ่นฟิล์มกาวที่ต้องการทดสอบ ใช้แรงในการดึงแผ่น ฟิล์มกาวออกจากชิ้นงานด้วยความเร็วคงที่ตามที่เครื่องทดสอบกำหนดไว้ และบันทึกค่าแรงที่ใช้ใน การดึงลอกฟิล์มกาว



ภาพที่ 9 รูปแบบการทดสอบแรงดึงลอกฟิล์มกาว

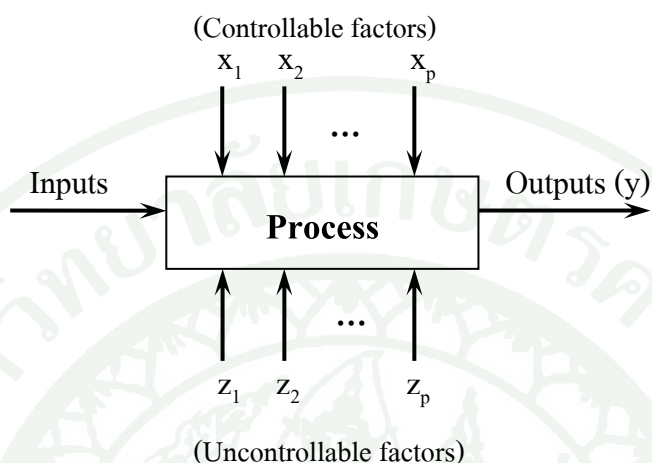
ที่มา: Robert (2006)

5. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นวิธีการวางแผนการทดลองที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษา เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด โดยการออกแบบการทดลองสามารถศึกษาความสัมพันธ์ของหลายปัจจัยพร้อมๆ กันในเวลาเดียวกันได้ ซึ่งเป็นการทดลองที่มีจำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

ประไพศรี และ พงษ์ชนัน (2551) ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบแบบครั้งเดียวหรือแบบต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้าในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อจะทำได้สามารถสังเกตและบ่งชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรหรือปัจจัยนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (หรือตัวแปรที่รบกวนระบบ)

การทดลองได้ถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการและระบบ ซึ่งกระบวนการหรือระบบนั้นสามารถแสดงแบบจำลองในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

ที่มา: Montgomery (2009)

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการทำงานร่วมกันของการดำเนินการ เครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ เพื่อเปลี่ยนตัวแปรนำเข้า (Inputs) ให้เป็นผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs) ที่มีตัวแปรตอบสนองออกมาในรูปหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว โดยตัวแปรของกระบวนการและคุณสมบัติของวัสดุบางตัว ($x_1, x_2, \dots, x_p$) สามารถควบคุมได้ ขณะที่ตัวแปรอื่นๆ ($z_1, z_2, \dots, z_q$) ไม่สามารถควบคุมได้ (Montgomery, 2009)

5.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการนำหลักการทางสถิติมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ การศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่จะต้องศึกษาดังแต่การเลือกข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ จนถึงสรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

5.1.1 การศึกษาและกำหนดปัญหาที่สนใจทำการทดลอง โดยการศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการหรือระบบที่ต้องการทำการทดลอง กำหนดปัญหาให้ชัดเจนสอดคล้องกับจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการหรือระบบ

5.1.2 การเลือกตัวแปรตอบสนองจากกระบวนการหรือระบบที่ทำการศึกษา โดยการศึกษาระบบเพื่อนำตัวแปรตอบสนองก่อนการปรับปรุงระบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับ ตัวแปรตอบสนองหลังการปรับปรุงระบบ อาจเลือกตัวแปรตอบสนองได้มากกว่าหนึ่งตัว (Multiple Responses)

5.1.3 การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการและระบบ ปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ตัวแปรควบคุมได้ (Controllable Factors) และตัวแปรควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) สามารถกำหนดระดับของปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง อาจจะเป็นช่วงที่กว้างออกไปจากกระบวนการหรือระบบเดิมก่อนการปรับปรุง หรือช่วงแนะนำจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1.4 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง จากการศึกษาและกำหนดตัวแปรในขั้นตอนข้างต้น ทำให้สามารถเลือกแผนการออกแบบการทดลองและตรงกับจุดประสงค์ที่ตั้งไว้มากยิ่งขึ้น โดยพิจารณาจากขนาดของตัวอย่าง หรือจำนวนทำซ้ำ (Replicates) การกำหนดลำดับการทดลองที่เหมาะสมกับการทดลอง สามารถกำหนดบล็อกหรือการสุ่มการทดลองได้ตามความเหมาะสมของกระบวนการหรือระบบ

5.1.5 การดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งต้องมีการควบคุมการใช้ปัจจัยและระดับตามแผนที่วางไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นไปตามเงื่อนไขและมีความแม่นยำสูง เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่อไป

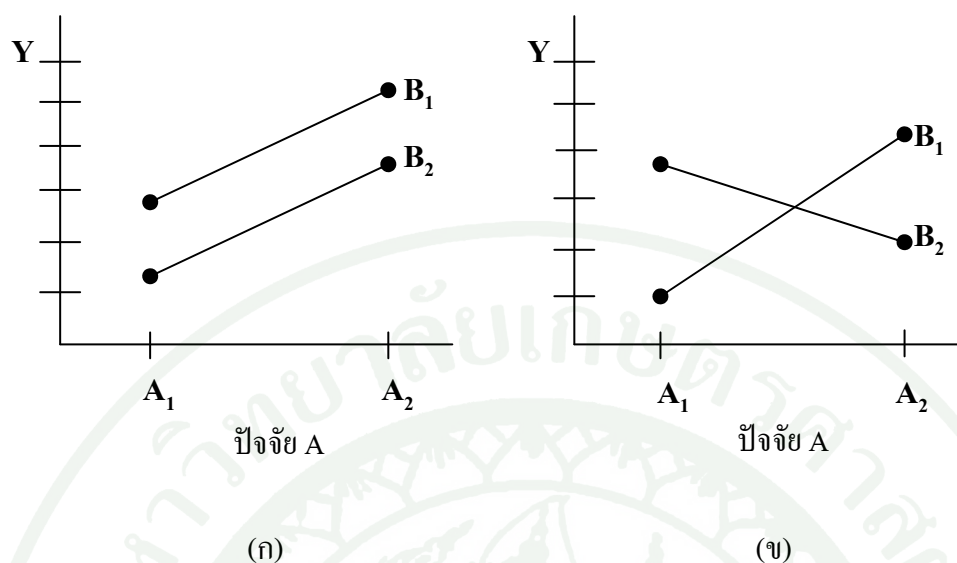
5.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำหลักการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำไปสู่การรายงานผลและสรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลองว่าเป็นไปตามจุดประสงค์ที่คาดไว้หรือไม่

5.1.7 การสรุปผลและข้อเสนอแนะ เป็นการนำผลจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง มาสรุปผลการทดลองของกระบวนการ จะได้ค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการ จากนั้นนำค่าระดับปัจจัย ที่ได้ไปยืนยันผลในกระบวนการหรือระบบจริง

6. การออกแบบแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล

การออกแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs) เป็นการออกแบบแผนการทดลองที่สามารถ ศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระทบหลัก (Main Effects) คือ สนใจ พิจารณาปัจจัยเดียว และผลกระทบร่วมของปัจจัย (Interaction) ได้พร้อมกัน ในกรณีที่มี 3 ปัจจัย จะเกิดผลกระทบร่วมของปัจจัย 3 ลักษณะด้วยกัน คือ ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดียว ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ทำให้สามารถทราบถึงรูปแบบ และอิทธิพลของผลกระทบนั้น เพื่อจะได้แนวทางในการควบคุมให้ได้จุดที่เหมาะสม กรณีไม่พบ ผลกระทบร่วมสามารถอธิบายผลการทดลองได้ว่า ผลจากการทดลองมีแต่ปัจจัยหลักเท่านั้นที่มีผล ต่อค่าตอบสนองที่ต้องการศึกษา

กราฟแสดงผลกระทบ (Interaction Plot) คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัย ส่งผลให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง เปลี่ยนแปลงระดับไป ตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B ซึ่งแต่ละ ปัจจัยมี 2 ระดับ แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม (No Interaction) แสดง ดังภาพที่ 11 (ก) และกรณีที่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Crossing Interaction) แสดงดังภาพที่ 11 (ข)



ภาพที่ 11 ผลกระทบการเกิดอิทธิพลระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B (ก) กรณีไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม และ (ข) กรณีที่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

6.1 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) เป็นการทดลองที่ใช้ศึกษาผลกระทบระหว่าง 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) สามารถกำหนดระดับปัจจัยให้เหมาะสมกับสำคัญของปัจจัยนั้นๆ เพื่อศึกษาผลกระทบหลักที่เป็นผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย สำหรับการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 2^k การทดลอง เช่น ถ้ามีการทดลองที่มีปัจจัย 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ทำการทดลองเพียงหนึ่งครั้งไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $2^5 = 32$ การทดลอง

ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551) ได้สรุปและอธิบายข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ข้อดีของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป คือ การทดลองมีความเป็นออร์โทกอนัล (Orthogonality) ไม่มีโครงสร้างซับซ้อน (No Aliased Structure) และ สามารถศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

ข้อเสียของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป คือ ในการทดลองมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง มีการใช้ทรัพยากรจำนวนมาก เนื่องจากการทดลองจะแปรผันตามจำนวนของปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ได้จากการศึกษากระบวนการหรือระบบ เช่น ในการทดลองที่มีจำนวนปัจจัย 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยไม่มีการทดลองซ้ำ จะมีการทดลองทั้งหมด 243 การทดลอง

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปสามารถกำหนดจุดประสงค์ของการทดลองได้ว่าจะ ทำการศึกษาในทิศทางใด เช่น การทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Factor Screening Experiments) หรือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear Model) สำหรับปัจจัยที่มี 2 ระดับ และการศึกษาความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Model) สำหรับปัจจัยที่มีตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป

การเขียนสมการตัวแทนของการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปในการทดลองที่มี 3 ปัจจัย คือ A, B และ C สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ i คือ ระดับของปัจจัย A ; ($i = 1, 2, \dots, a$)

j คือ ระดับของปัจจัย B ; ($j = 1, 2, \dots, b$)

k คือ ระดับของปัจจัย C ; ($k = 1, 2, \dots, c$)

l คือ จำนวนซ้ำ ; ($l = 1, 2, \dots, n$)

โดยที่ y_{ijkl}	คือ	ค่าตัวแปรตอบสนอง
μ	คือ	ค่าเฉลี่ยรวม
τ_i	คือ	ค่าผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับที่ i
β_j	คือ	ค่าผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j
γ_k	คือ	ค่าผลกระทบของปัจจัย C ที่ระดับที่ k
$(\tau\beta)_{ij}$	คือ	ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ	ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย C ที่ระดับ k
$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ	ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	คือ	ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
ϵ_{ijkl}	คือ	ค่าผิดพลาดของการทดลอง

7. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ประไพศรี และ พงษ์ชนัน (2551) ได้กล่าวไว้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง หรือลักษณะทางคุณภาพที่สนใจศึกษาหรือปรับปรุงจากกระบวนการหรือระบบ

จากการทดลอง สามารถวิเคราะห์แยกสาเหตุของความผันแปรออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้และความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ ดังนี้

(ก) ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือ ความผันแปรหรือความแตกต่างที่เกิดจากปัจจัยหรือวิธีการปฏิบัติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่า ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Between Groups Variation)

(ข) ความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation) คือ ความผันแปรหรือความแตกต่างที่เกิดจากการขาดความรู้ ซึ่งอาจเกิดจากผู้ทดลองทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผันแปร แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้กล่าวถึงความผันแปรในส่วนนี้ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ หากมีการควบคุมการทดลองมากขึ้นความผิดพลาดในส่วนนี้ก็จะลดลง

7.1 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

7.1.1 การตั้งสมมติฐาน

การตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับกระบวนการหรือระบบ โดยทั่วไปจะกำหนด H_1 ก่อน และส่วนกลับของข้อความใน H_1 จะระบุข้อความไว้ใน H_0 การตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีทดสอบปัจจัยหลักและวิธีทดสอบผลกระทบร่วม ดังนี้

(ก) วิธีทดสอบปัจจัยหลัก (Test of Main Factor) มีรูปแบบทั่วไปของการตั้งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ คือ

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าตอบสนอง

(ข) วิธีทดสอบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Test of Interaction Factor) มีรูปแบบทั่วไปของการตั้งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ คือ

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตอบสนอง

7.1.2 การกำหนดระดับนัยสำคัญ

การกำหนดระดับนัยสำคัญ (Significance Level, α) ในการทดลองโดยทั่วไปนิยมใช้ที่ 5% หรือ $\alpha = 0.05$ แต่ตามทางทฤษฎี ค่า α สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ถึง 99%

7.1.3 การระบุค่าทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบ

การระบุค่าทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบ (Test Statistics) เพื่อใช้ในการคำนวณข้อมูลจากตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งการทดสอบทางสถิติสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

(ก) การทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย (μ) แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) ให้ใช้ค่าการทดสอบ Z และกรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร แต่ทราบค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง (S^2) ให้ใช้การทดสอบ t

(ข) การทดสอบเกี่ยวกับค่าความแปรปรวน (σ^2) แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีศึกษาประชากรเดียวให้ใช้การทดสอบ χ^2 และกรณีศึกษาสองประชากรใช้การทดสอบ F

7.1.4 การกำหนดบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

การกำหนดบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก เป็นการกำหนดตำแหน่งตามเครื่องหมายในสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ H_0 และบริเวณที่ไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้ คือ ค่าวิกฤต (Critical Value) ซึ่งได้จากค่าการเปิดตารางของการทดสอบ ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณค่า P-Value เป็นค่าที่ช่วยในการตัดสินใจ

7.1.5 การสรุปผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลองสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การพิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ H_0 หรือไม่สามารถปฏิเสธ H_0 และการพิจารณาเปรียบเทียบค่า P-Value เปรียบเทียบกับพื้นที่บริเวณปฏิเสธ H_0 (α) จะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า P-Value $< \alpha$

7.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table) เป็นตารางวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง ในกรณีการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย เพื่อศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย สามารถออกแบบตาราง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 2 และได้แสดงสูตรการคำนวณค่าผลบวกกำลังสอง (Sum of Squares) ของแต่ละแหล่งความผันแปร (Source of Variation) ดังนี้

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณี 3 ปัจจัย

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (Sum of Squares)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Squares)	ค่าทางสถิติ (F ₀)
A	SS _A	a - 1	MS _A	MS _A /MS _E
B	SS _B	b - 1	MS _B	MS _B /MS _E
C	SS _C	c - 1	MS _C	MS _C /MS _E
AB	SS _{AB}	(a - 1)(b - 1)	MS _{AB}	MS _{AB} /MS _E
AC	SS _{AC}	(a - 1)(c - 1)	MS _{AC}	MS _{AC} /MS _E
BC	SS _{BC}	(b - 1)(c - 1)	MS _{BC}	MS _{BC} /MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	MS _{ABC}	MS _{ABC} /MS _E
ค่าความผิดพลาด (Error)	SS _E	abc(n - 1)	MS _E	
ทั้งหมด (Total)	SS _T	abcn - 1		

ที่มา: Montgomery (2009)

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y^2_{i...} - \frac{y^2_{....}}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y^2_{.j..} - \frac{y^2_{....}}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y^2_{..k.} - \frac{y^2_{....}}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y^2_{ij..} - \frac{y^2_{....}}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y^2_{i.k.} - \frac{y^2_{....}}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y^2_{.jk} - \frac{y^2_{....}}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y^2_{ijk} - \frac{y^2_{....}}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

8. การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

Montgomery (2009) ได้กล่าวไว้ว่า การแยกความผันแปรในการสังเกตออกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นความสัมพันธ์ทางพีชคณิต ใช้ในกรณีที่ไม่มี ความแตกต่างสำหรับค่าเฉลี่ยของระดับกับข้อสมมติฐานบางอย่างให้เป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะการสังเกตจากความเหมาะสม ซึ่งได้ถูกบรรยายในแบบจำลอง

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad (2)$$

ความผิดพลาดจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ และมีการกระจายตัวแบบอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ แต่ไม่ทราบค่าความแปรปรวน ถ้าสมมติฐานสมเหตุสมผลจะทำให้สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความถูกต้องแม่นยำของการทดสอบสมมติฐานที่ไม่มี ความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับ

ในทางปฏิบัติการทดสอบสมมติฐานจะไม่เกิดความแม่นยำ จะสามารถเชื่อในผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริง การที่ไม่ทำตามการตรวจสอบสมมติฐานและความถูกต้องของแบบจำลองจะทำให้เกิดความผิดพลาด (Residual) ได้ง่าย สามารถกำหนดค่าผิดพลาดจากค่าสังเกต j ของระดับที่ i สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (3)$$

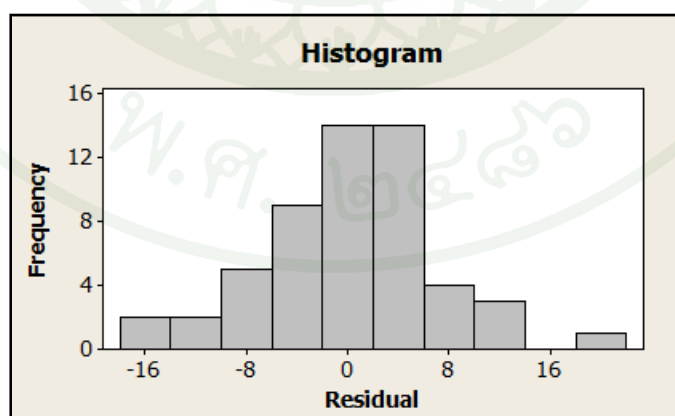
เมื่อค่า $\hat{y}_{ij}$ เป็นค่าประมาณที่ได้จากการเฉลี่ยของค่า y_{ij} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{t}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.}\end{aligned}\quad (4)$$

การตรวจสอบค่าผิดพลาดควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าตัวแบบจำลองมีความถูกต้อง ค่าผิดพลาดจะไม่มีรูปแบบ (Structureless) ซึ่งการวิเคราะห์ความผิดพลาดโดยใช้ความเหมาะสมของข้อสมมติฐานในการตรวจสอบมีหลายรูปแบบ ซึ่งมีหลักการและรายละเอียดดังนี้

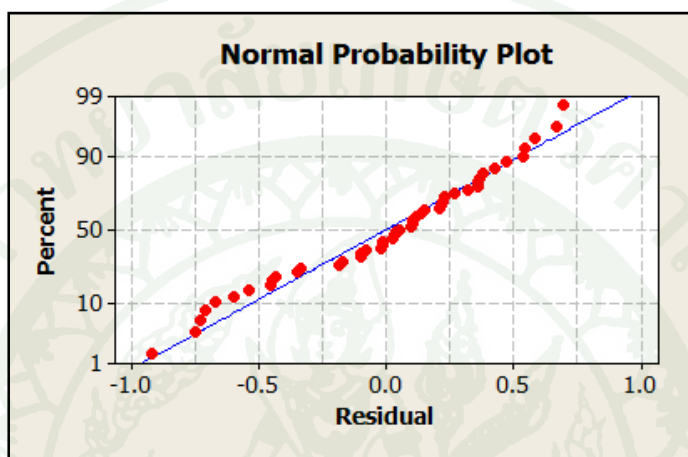
8.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบข้อสมมติฐานการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถทำได้โดยการเขียนกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) ของค่าผิดพลาด ถ้าข้อสมมติฐานของค่าผิดพลาดเป็นที่พึงพอใจ กราฟฮิสโตแกรมจะมีการกระจายตัวแบบปกติ มีกึ่งกลางอยู่ที่ศูนย์ แต่ในกรณีที่จำนวนตัวอย่างที่น้อยเกินไปจะเกิดความผันผวนของข้อมูลได้ ตัวอย่างภาพการพล็อตฮิสโตแกรมที่มีการแจกแจงแบบปกติแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟฮิสโตแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดและความถี่

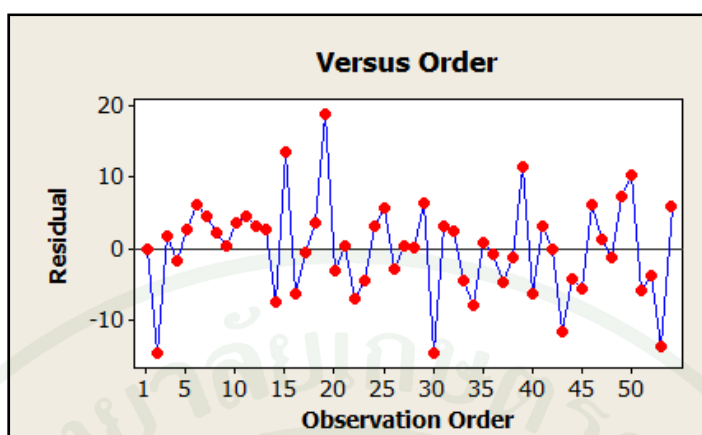
ในการตรวจสอบข้อสมมติฐานการกระจายแบบปกติของข้อมูลที่ได้รับจากการทดลอง สามารถทำได้โดยการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าความผิดพลาด ถ้าข้อกำหนดสมมติฐานมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีลักษณะของข้อมูลความผิดพลาดแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กราฟความน่าจะเป็นของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

8.2 การตรวจสอบค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

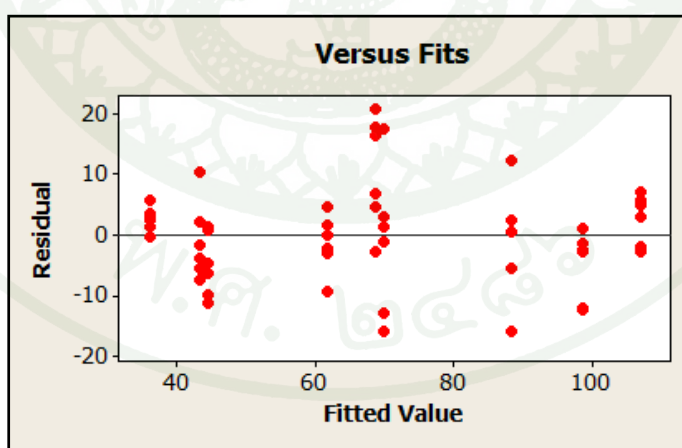
การพล็อตค่าผิดพลาดตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลหรือลำดับการทดลอง สามารถช่วยในการตรวจหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด โดยจะเห็นแนวโน้มที่จะพบค่าผิดพลาดเป็นไปตามสมมติฐานอิสระที่เป็นปัญหาสำคัญและยากที่จะทำการแก้ไข ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรอบคอบในการเก็บรวบรวมข้อมูล การทดลองแบบสุ่มจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อให้ข้อมูลที่เก็บมานั้นมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นค่าผิดพลาดดังกล่าวจะมีการกระจายแบบสุ่ม แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

8.3 การตรวจสอบค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง ทำได้โดยการพล็อตค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของตัวแปรตอบสนองนั้นๆ (Fitted Value) หรือ ค่าประมาณของค่าสังเกต ซึ่งกราฟจะมีความเหมาะสมเมื่อลักษณะของกราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ควรมีการกระจายแบบสุ่ม มีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

อย่างไรก็ตามหากแนวโน้มของกราฟมีรูปทรงที่เห็นได้ชัดเจน เช่น เป็นลักษณะลำโพง ปลายเปิดหรือปลายปิด และเป็นรูปทรงกรวยปลายเปิดหรือปลายปิด แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนไม่คงที่

9. การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

แนวความคิดการหาค่าที่ดีที่สุดเป็นการหาค่าที่มีเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุดจะเกิดขึ้น ณ จุดที่มีความชันมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเส้นที่ลากสัมผัส ณ จุดที่ให้ค่าสูงสุดต้องเป็นเส้นตรงขนานกับแกน x ตัวอย่างเช่น สมมติว่าต้องการหาค่า x เพื่อให้ได้ค่า y สูงสุด โดย $y = f(x)$

$$y = -x^2 + 4x + 2 \quad (5)$$

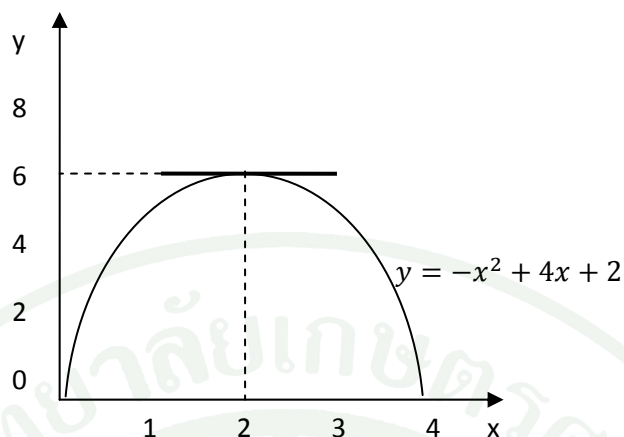
จากนั้นหาค่าความชันของ y ซึ่งค่าความชันก็คือ ค่าอนุพันธ์ (Derivative) ของ y ต่อ x ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$\frac{dy}{dx} = -2x + 4 \quad (6)$$

ณ จุดที่ y มีค่าสูงสุด ความชันของ y ณ จุดนั้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงกำหนดให้สมการดังกล่าวเท่ากับศูนย์

$$-2x + 4 = 0 \quad (7)$$

จะได้ค่า x^* เท่ากับ 2 เมื่อแทนค่าลงไปในค่า y ทำให้ได้ค่า y^* เท่ากับ 6 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดสำหรับทุกๆ ค่าของ x ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 กราฟแสดงค่าสูงสุดของ y เมื่อค่า $x^* = 2$

นอกจากนี้ยังสามารถใช้แนวคิดค่าความชันเท่ากับศูนย์ ไปใช้ในการหาค่าต่ำสุดได้ โดยกำหนดให้ ค่า y จะต่ำสุด เมื่อค่าอนุพันธ์ของ y มีค่าเป็นศูนย์ จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้ค่าความชันเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่า x ที่ทำให้ y มีค่าต่ำสุดหรือสูงสุด เป็นเงื่อนไขเดียวกัน ดังนั้น จำเป็นจะต้องหาอนุพันธ์ลำดับที่สองเพื่อมาแยกความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด สามารถสังเกตลักษณะของค่าความชันในกรณีที่ y เป็นค่าสูงสุด จะเห็นค่าความชันจะมีค่าลดลงหรือมีความชันเป็นลบ หรือมีค่าเปลี่ยนจากค่าบวกเป็นค่าลบเมื่อ x เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่หาค่า y เป็นค่าต่ำสุด ที่ค่าความชันจะลาดขึ้นหรือมีความชันเป็นบวก ค่าความชันที่หาได้จะมีค่าจากลบไปหาบวกเมื่อ x เพิ่มขึ้น

10. ตัวแปรตอบสนองหลายตัวแปร (Multiple Responses)

การปรับปรุงการออกแบบการทดลองและปัญหาการหาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับตัวแปรตอบสนองที่มากกว่าหนึ่งตัวแปร เพื่อต้องการหาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการที่มีประสิทธิภาพหรือความพึงพอใจสูงสุด โดยใช้หลักการของทฤษฎีที่เรียกว่า การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับหลายจุดประสงค์ (Multiobjective Optimization) ซึ่งแต่ละตัวแปรตอบสนองจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกัน สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จาก 3 วิธีการ ได้แก่

- (ก) วิธีการใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming Method)
- (ข) วิธีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function Method)
- (ค) วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยกราฟ (Graphical Optimization Method)

วิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด ใช้ในกรณีที่ต้องวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองหลายตัว (Multiple Responses) ในการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เมื่อกำหนดให้มีปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เป็นไปตามสมการ

$$y_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (8)$$

ค่าความพึงพอใจจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าที่เป็นไปได้ของค่า y_i โดยที่ถ้าค่า d_i มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า ผลของตัวแปรตอบสนอง (y_i) นั้นมีความพึงพอใจมากที่สุด เมื่อคำตอบสนองอยู่ในช่วงเป้าหมายหรือจุดมุ่งหมาย แต่ถ้าค่า d_i มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ผลของตัวแปรตอบสนอง (y_i) นั้นไม่มีความพึงพอใจเลย เมื่อคำตอบสนองอยู่นอกขอบเขตที่ตั้งเป้าหมายไว้ (Montgomery, 2009)

$$0 \leq d_i \leq 1$$

การระบุค่าน้ำหนักความสำคัญตัวแปรตอบสนอง เป็นการประเมินความสำคัญของตัวแปรตอบสนอง เพื่อกำหนดค่าความสำคัญในการคำนวณความพึงพอใจ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 ถ้าผลตอบสนองทุกตัวมีความสำคัญเท่ากันจะใช้ค่าเท่ากับ 1 ทุกตัวแปรตอบสนอง แต่ถ้าผลตอบสนองมีความสำคัญที่ไม่เท่ากัน สามารถกำหนดในฟังก์ชันเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability, D) เป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometrics Mean) ของค่าความพึงพอใจในแต่ละตัวแปรตอบสนอง ใช้ในกรณีที่มิได้แปรตอบสนองหลายตัว กำหนดให้ค่า m แทนจำนวนของตัวแปรตอบสนอง สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Yang and El-Haik, 2009)

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

หลักการประเมินฟังก์ชันความพึงพอใจของตัวแปรตอบสนอง ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับแต่ละค่าตอบสนอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ค่ายิ่งมามากยิ่งดี ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ค่ากลางดีที่สุด และค่าตอบสนองอยู่ในขอบเขตข้อจำกัด มีรายละเอียดดังนี้

เมื่อกำหนดให้ T คือ ค่าจุดประสงค์หรือค่าเป้าหมาย

L คือ ค่าขอบเขตล่างสำหรับค่าตอบสนอง

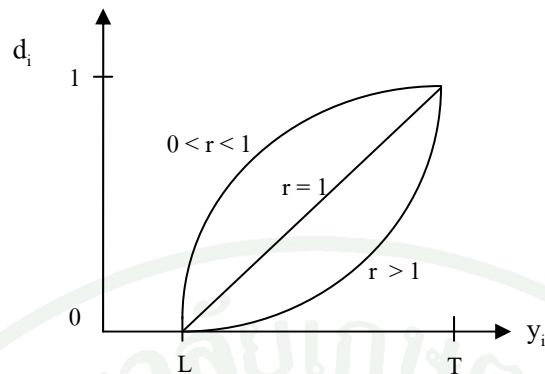
U คือ ค่าขอบเขตบนสำหรับค่าตอบสนอง

r คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญ

(ก) ค่าตอบสนองยิ่งมามากยิ่งดี (The larger, the better) ในกรณีนี้ต้องการให้ค่าตอบสนองมากที่สุด (Maximum Value) เพื่อให้ได้ค่าความพึงพอใจมากที่สุดสามารถพิจารณาได้จาก

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L \\ \left(\frac{y_i - L}{T - L}\right)^r & L \leq y_i \leq T \\ 1 & y_i > T \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 1 ฟังก์ชันความพึงพอใจจะเป็นเส้นตรง การเลือกค่า r มากกว่า 1 ($r > 1$) แสดงว่าตัวแปรตอบสนองนั้นมีบทบาทความสำคัญต่อความพึงพอใจมาก และถ้าเลือก $0 < r < 1$ แสดงว่ามิจะมีบทบาทความสำคัญต่อความพึงพอใจน้อยลงมา รูปร่างฟังก์ชันสำหรับค่าน้ำหนักความสำคัญ r ที่แตกต่างกัน ทำให้รูปร่างเส้นโค้งของฟังก์ชันจะแตกต่างกัน ในกรณีนี้ต้องการให้ค่าตอบสนองมากที่สุด แสดงในภาพที่ 17 (ก)



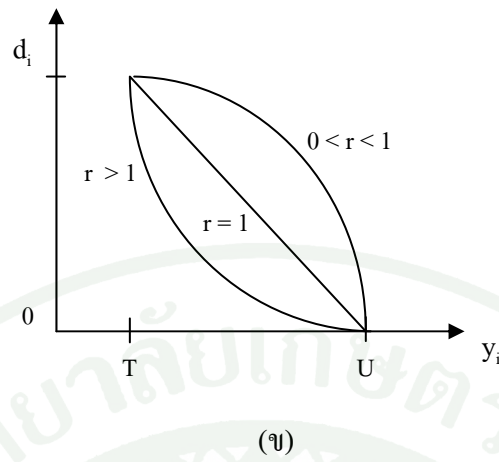
(ก)

ภาพที่ 17 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าตอบสนองยิ่งมากยิ่งดี (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าตอบสนองยิ่งน้อยยิ่งดี (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง มีเป้าหมายให้ค่าความพึงพอใจสองด้านอยู่ในช่วงเป้าหมายดีที่สุด และ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพึงพอใจและค่าตอบสนอง ค่าความพึงพอใจจะดีที่สุดเมื่อค่าตอบสนองอยู่ในขอบเขตข้อจำกัด

(ข) ค่าตอบสนองยิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller, the better) ในกรณีนี้ต้องการให้ค่าตอบสนองน้อยที่สุด (Minimum Value) เพื่อจะได้ค่าความพึงพอใจมากที่สุดสามารถพิจารณาได้จาก

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i > U \\ \left(\frac{U-y_i}{U-T}\right)^r & T \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i < T \end{cases} \quad (11)$$

รูปร่างฟังก์ชันสำหรับค่าน้ำหนักความสำคัญ r ที่แตกต่างกัน ทำให้รูปร่างเส้นโค้งของฟังก์ชันจะแตกต่างกันในกรณีนี้ต้องการให้ค่าตอบสนองน้อยที่สุด แสดงในภาพที่ 17 (ข)

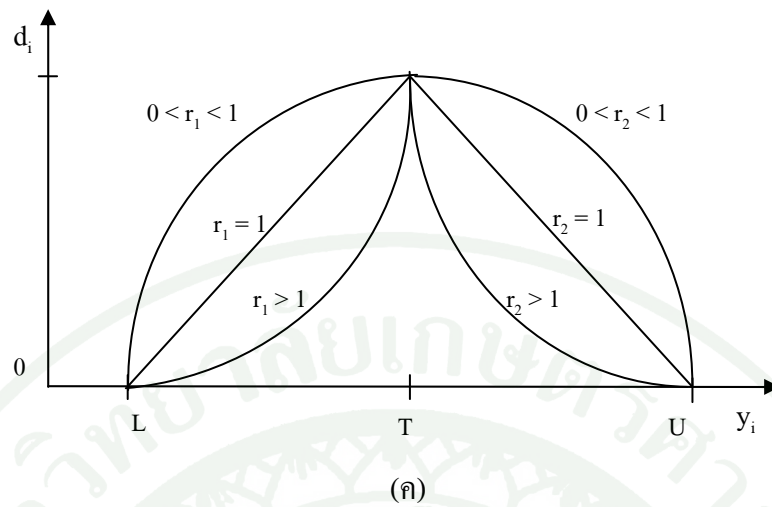


ภาพที่ 17 (ต่อ)

(ค) ค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด (Nominal-the-best) ในกรณีที่มีค่าความพึงพอใจสองด้าน โดยกำหนดค่าเป้าหมายในช่วงขอบเขตล่าง (L) และขอบเขตบน (U) ซึ่งต้องการให้ค่าตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ($y_i = T_i$) เพื่อให้ได้ค่าความพึงพอใจมากที่สุดสามารถพิจารณาได้จาก

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L \\ \left(\frac{y_i - L}{T - L}\right)^{r_1} & L \leq y_i \leq T \\ \left(\frac{U - y_i}{U - T}\right)^{r_2} & T \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i > U \end{cases} \quad (12)$$

รูปร่างฟังก์ชันสำหรับค่าน้ำหนักความสำคัญ r ที่แตกต่างกัน ทำให้รูปร่างเส้นโค้งของฟังก์ชันแตกต่างกันในกรณีที่มีค่าความพึงพอใจสองด้าน แสดงในภาพที่ 17 (ค)

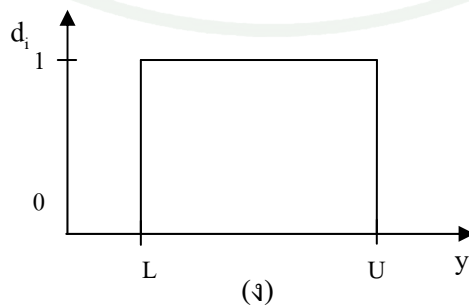


ภาพที่ 17 (ต่อ)

(ง) ค่าตอบสนองแบบมีข้อจำกัด (Constraint) ในกรณีนี้จะมีความพึงพอใจเมื่อค่าตอบสนอง (y_i) อยู่ภายในข้อจำกัดหรือขอบเขตข้อจำกัด ($L \leq y_i \leq U$) เพื่อจะได้ค่าความพึงพอใจมากที่สุดสามารถพิจารณาได้จาก

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i \leq L \\ 1 & L \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i \geq U \end{cases} \quad (13)$$

เมื่อค่าตอบสนองอยู่ในขอบเขตข้อจำกัด ทำให้ค่าความพึงพอใจรูปร่างของฟังก์ชันสามารถแสดงในภาพที่ 17 (ง)



ภาพที่ 17 (ต่อ)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิราภรณ์ (2554) ได้ทำการศึกษาการประกอบชุดหัวอ่านเขียน อาศัยกระบวนการอัลตราโซนิกแท็บบอนด์ในการยึดติดชิ้นงานกับแผ่นทองแดง (Trace) ให้ติดกันด้วยการลั่นด้วยคลื่นความถี่สูง ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ได้แก่ แรงกดที่ใช้ในกระบวนการอัลตราโซนิกแท็บบอนด์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของตัวแปรดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อทำนายพฤติกรรมการเกิดความเค้นในชิ้นงานขณะประกอบด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกแท็บบอนด์ จากการศึกษาพบว่า แรงกดมีผลต่อการประกอบชุดหัวอ่านเขียน โดยเมื่อแรงกดมากขึ้นค่าความเค้นจะมากขึ้นด้วย ซึ่งแรงที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80 กรัมแรง

ศิริศักดิ์ (2554) ได้ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้เคลือบแผ่นเคลือบวงจรไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงลอก (Peel Strength) ที่เกิดขึ้นในแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตาม เมื่ออุณหภูมิและเวลามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลอกสูงขึ้นเช่นกัน จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอนการเคลือบแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า คือ 160 องศาเซลเซียส และ 1 วินาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงลอก เท่ากับ 1.33 kg/cm. (≥ 0.5 kg/cm) และทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ผลจากการทดลองนี้ถูกนำไปใช้ในสายการผลิตจริง พบว่า สามารถลดเวลาในการทำงานเฉลี่ยลดลง 5.77% โดยสามารถลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตลง 87.1 %

สิริสุดา (2552) ได้ทำการศึกษาการลดอัตราของเสียของหัวอ่านกับแขนยึดในชุดประกอบหัวอ่านเขียนที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งพบในกระบวนการผลิตชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ การวิเคราะห์ข้อมูล และการกำหนดสภาวะการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งใช้การออกแบบ 2^k แฟกทอเรียล พบว่า มี 4 ปัจจัย คือ (1) เวลาที่ใช้ในการสะสมอุณหภูมิ (2) เวลาขณะทำการยึดติด (3) น้ำหนักกดขณะทำการยึดติด และ (4) อุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติด ที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานต่อแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และเมื่อนำปัจจัยมาทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิ พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 81.18 กรัมแรง โดยกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุงมีสมรรถภาพของกระบวนการ (Cpk) เท่ากับ 0.395 และ 2.185 ตามลำดับ และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขชิ้นงานลง 84,384 บาท/เดือน

Chan (2002) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการยึดติดที่มีผลต่อกระบวนการประกอบ Flip-Chip-on-Flex โดยทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ เดิมใช้อุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส ต้องการให้อุณหภูมิในการยึดติด ACF ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ระดับของการยึดติด $< 80\%$ และการไหลของอนุภาคนำไฟฟ้าในฟิล์มกาว ACF กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระหว่างชุดหัวอ่านเขียน ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิในการยึดติด > 200 องศาเซลเซียส ที่การยึดติด 95% ACF จะยึดติดได้ดีที่สุด และใช้เวลาน้อย จากงานวิจัยสรุปได้ว่า ผลการดำเนินงานของการยึดติด ACF ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากอุณหภูมิในการยึดติด ส่งผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ทั้งนี้จึงจะทำการศึกษาอิทธิพลจากความดันในการยึดติด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ในการยึดติด ACF

Chen (2006) ได้ศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการยึดติด ACF เช่น อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการยึดติด ซึ่งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความแข็งแรงของโครงสร้างฟิล์มกาว ACF ได้ถูกนำมาศึกษา โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ความแข็งแรงของกาวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการยึดติด ส่งผลต่อแรงยึดเกาะของ ACF และประสิทธิภาพจะดียิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน แต่ความแข็งแรงของกาวจะลดลงถ้าความดันมากกว่า 0.25 MPa อุณหภูมิที่ 180-200 องศาเซลเซียส ความดัน 0.15-0.2 MPa และเวลา 18-25 วินาที ตามลำดับ ผลกระทบจากการทดสอบตามเงื่อนไขเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด รอบอุณหภูมิอยู่ที่ 40-125 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ/ความชื้น (85 องศาเซลเซียส, 85 % RH) การทดสอบสามารถประเมินความน่าเชื่อถือของชิ้นงาน

Gao (2009) ทำการศึกษากการทดลองในการตรวจสอบผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของ ACF แสดงให้เห็นว่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของ ACF มีการลดลงของขอบเขตที่แตกต่างกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยเฉพาะคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลงในระหว่าง 80 ถึง 120 °C นอกจากนี้ทำการทดสอบการคลายเพื่อศึกษาคุณสมบัติความเหนียวของฟิล์มกาว ACF การคลายของกาวมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบเชิงเส้น อัตราการคลายจะมีขนาดใหญ่และเส้นโค้งการคลายความเครียดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ วิวัฒนาการการคลายความเครียดของ ACF สามารถอธิบายแบบจำลองโดยสมการแบบไม่เป็นเส้นตรง เพื่อให้ได้ความเหนียวของฟิล์มกาวตรงตามกำหนด

Hwang (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการยึดติด ที่มีผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพความนำเชื่อถือของ Anisotropic Conductive Films (ACFs) ในการศึกษาการประกอบ Flip-Chip ในขณะที่อุณหภูมิลดลง คุณสมบัติของ ACF ที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพแก้ว ค่ายืดหยุ่นมอดูลัส และค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น เนื่องจากความแตกต่างในด้านการเชื่อมโยงของโครงสร้างภายใน ACF ซึ่งได้รับการยึดติดที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการทดสอบ พบว่า ACF ที่ถูกยึดติดที่อุณหภูมิต่ำ จะมีโครงสร้างภายในหนาแน่นแสดงถึงประสิทธิภาพความนำเชื่อถือของฟิล์มกาว ACF จากการตรวจสอบฟังก์ชันของอุณหภูมิในการยึดติด ผลลัพธ์ที่ได้ คือ การทดสอบรอบการทำงาน (-55 องศาเซลเซียส/150 องศาเซลเซียส จำนวน 1000 รอบ) และ PCT (121 องศาเซลเซียส, 100 % RH, 96 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิในการยึดติดที่ต่ำ จะส่งผลให้ความนำเชื่อถือของการยึดติดดีขึ้น ดังนั้นคุณสมบัติการยึดติดของ ACF และความนำเชื่อถือของกระบวนการ จะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิในการยึดติด

Kim (2013) ได้ทำการศึกษาหลักการเทคโนโลยีการยึดติด Flip-Chip ในกระบวนการประกอบที่ต้องใช้กาวยึดติด โดยกาวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามการปรากฏตัวของอนุภาคนำไฟฟ้า ได้แก่ ฟิล์มกาวนำไฟฟ้า (ACF) และฟิล์มกาวที่ไม่นำไฟฟ้า (NCA) ACF เป็นฟิล์มกาวพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนำไฟฟ้าและ NCA เป็นเพียงฟิล์มกาวซึ่งไม่มีอนุภาคนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในการยึดติด ACF มีการสร้างไฟฟ้าในระยะสั้น ได้มีการแก้ปัญหาเทคโนโลยีการยึดติด ACF เช่น ACF สองชั้น และ ACF มีอนุภาคนำไฟฟ้าชั้นฉนวนเคลือบ เป็นต้น แต่เทคโนโลยีเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัด ส่วนเทคโนโลยีการยึดติด NCA มีการแก้ปัญหาพื้นฐานตั้งแต่การกระจายบน Chip ที่ต่อโดยตรงกับแผ่นรองโดยไม่มีอนุภาคนำไฟฟ้าและได้รับการพัฒนาให้ประสบความสำเร็จต่อไป

Lin (2006) ได้นำเสนอการคาดการณ์ความนำเชื่อถือในเวลาของกระบวนการผลิตจริง สารประกอบใน ACF ซึ่งระบบที่นำเสนอประกอบด้วยสามส่วน คือ ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์/ซอฟต์แวร์ที่สำคัญ อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ที่จะระบุการกระจายตัวของอนุภาคในกาวเรซิน โดยใช้ FEM ในการคำนวณเพื่อทำนายการกระจายของอนุภาค เช่น การบีบอัด และการวิเคราะห์ความนำเชื่อถืออยู่บนพื้นฐานของวิธีเส้นโค้งรูปตัววี ในการทำนายความนำจะเป็นของสารประกอบ ACF เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงและผลกระทบ ระบบพยากรณ์แบบจำลองในการศึกษารุ่นนี้มีความเหมาะสมสำหรับการดำเนินงานในกระบวนการผลิตสารประกอบ ACF เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และเพิ่มความนำเชื่อถือที่มีคุณภาพของฟังก์ชันการควบคุม

Luk (2002a) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการยึดติด ACF เพื่อให้ Flex-to-Flex ยึดติดระหว่าง HGA และ FPC สำหรับการประกอบหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ด้วยโปรแกรม ANSYS ในการทำนายความเค้นภายในของการยึดติด ACF และผลจากการคำนวณความเค้นเท่ากับ 2760 N/m^2 ด้วยเหตุนี้จึงพัฒนาการออกแบบให้มีความเค้นต่ำลงเท่ากับ 633 N/m^2 ซึ่งได้จากการคำนวณผลด้วย FEA ทำให้กระบวนการยึดติด ACF มีขั้นตอนที่น้อยลงประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การประมวลผล ACF ก่อนการติดและการยึดติด ACF ขั้นสุดท้าย การประมาณค่าใช้จ่ายทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคการยึดติด ACF มีต้นทุนการผลิตลดลง นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของแรงดึงลอกฟิล์มกาวในการยึดติด ACF เท่ากับ 155 กรัมแรง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 15 กรัมแรง หลังการทดสอบอายุการใช้งานและทดสอบการหยุดกะทันหันทางความร้อนเท่ากับ 1,000 ชั่วโมง น้อยกว่า 0.1Ω .

Rizvi (2005) ได้ทำการศึกษาการทดลองระบบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการยึดติด ACFs หลังจากบ่มด้วยความร้อน จากการศึกษา พบว่า อุณหภูมิในการยึดติดที่สูงจะทำให้การยึดติดของกาวดีกว่า กาวมีความแข็งแรง และช่วยลดการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการยึดติดขณะให้ความร้อน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 160, 180, 200, 220 และ 240 องศาเซลเซียส ความดัน 80 N และเวลา 10 วินาที ซึ่งการยึดติดที่ 28% จะเกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และในความต้องการยึดติดที่ 95% จะเกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานจะมีผลกับการยึดติดชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถสรุปได้ว่าการยึดติดที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ ACFs ยึดติดดีกว่า และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าหลังบ่มด้วยความร้อนดีกว่า กาวจะมีความแข็งแรงได้มาตรฐานเมื่อใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไป

Tan (2004) ได้ทำการวิจัยผลกระทบของอุณหภูมิในการยึดติดที่แตกต่างกันในการยึดติดด้วยความร้อนของ ACF ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ Thermogravimetric (TGA) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการสลายตัวของอุณหภูมิใน ACF ผลการทดลอง พบว่า ผลการเพิ่มอุณหภูมิในการยึดติดที่ได้จาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ซึ่งถูกใช้ในการตรวจสอบระดับการบ่มและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ใน ACF เพื่อหาเหตุผลว่าทำไม ACF จะยึดติดดีที่สุดที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดประสิทธิภาพความต้านทานในการยึดติดก่อนและหลังการบ่มความร้อน ที่ 260 และ 300°C ทำให้ทราบว่า เวลา 10 วินาทีและอุณหภูมิ 205 องศาเซลเซียส ทำให้ยึดติด 85 % เป็นพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่ทำให้ความต้านทานต่ำลง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- | | |
|--|-----------------|
| 1. เครื่อง ACF Laminator | จำนวน 1 เครื่อง |
| 2. เครื่อง Final Bonder | จำนวน 1 เครื่อง |
| 3. เครื่องทดสอบ Peel Force | จำนวน 1 เครื่อง |
| 4. ฟิล์มกาว ACF | จำนวน 58 ชิ้น |
| 5. ชุดหัวอ่านเขียน | จำนวน 58 ชุด |
| 6. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล | จำนวน 1 เครื่อง |
| 7. เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี | จำนวน 1 เครื่อง |
| 8. โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ (Microsoft Excel) | จำนวน 1 ชุด |
| 9. โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เวิร์ด (Microsoft Word) | จำนวน 1 ชุด |
| 10. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab | จำนวน 1 ชุด |

วิธีการ

1. การวางแผนการทดลอง

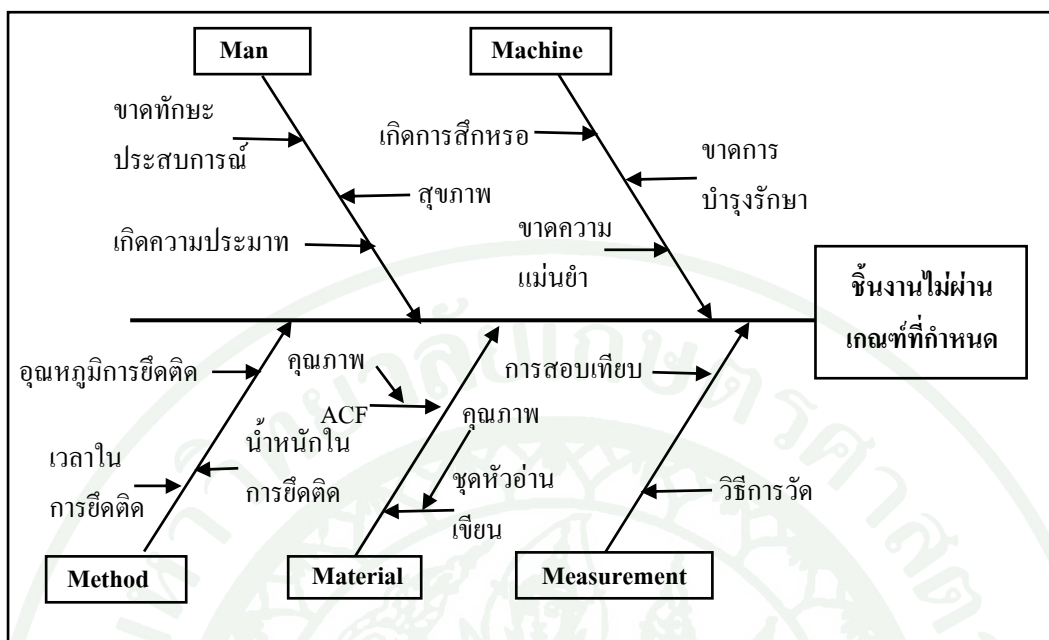
1.1 ศึกษากระบวนการยัดคิด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษากระบวนการยัดคิด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ของกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เก็บรายละเอียดข้อมูลการผลิต และวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพของชุดหัวอ่านเขียน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะทางคุณภาพที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่สนใจ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัย

1.2 ระบุปัญหาที่จะทำการวิจัย

จากจุดประสงค์ของโรงงานกรณีศึกษาที่ต้องการปรับปรุงและพัฒนาขั้นตอนการยัดคิด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ให้มีประสิทธิภาพและมีความสามารถในการผลิตมากยิ่งขึ้น ซึ่งในกระบวนการผลิตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังไม่มี การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สุดของการยัดคิด ACF เป็นเหตุให้เกิดชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ จึงต้องนำชิ้นงานไปทำการแก้ไขเพื่อยัดคิดซ้ำอีกครั้ง ทำให้ต้องเสียทรัพยากรและเวลาในกระบวนการผลิตมากกว่าเป้าหมายที่กำหนด

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาที่ส่งผลต่อกระบวนการยัดคิด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งสาเหตุของปัญหาสามารถพิจารณาได้จากผังแสดงเหตุและผลแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ปัจจัยและผลของปัญหาที่เกิดจากการยึดติด ACF

จากภาพที่ 18 เป็นภาพแสดงปัจจัยและผลของปัญหาที่เกิดจากการยึดติด ACF ที่ได้จากการระดมสมองกับพนักงานที่มีความเชี่ยวชาญในกระบวนการและจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด โดยศึกษาสาเหตุที่ส่งผลต่อการผ่านเกณฑ์กำหนดของชิ้นงาน 5 ส่วน ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) วัตถุดิบ (Material) และการวัด (Measurement) พบว่า ในส่วนของวิธีการ (Method) เป็นส่วนที่มีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการยึดติด ACF และสามารถควบคุมพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ ที่สำคัญในส่วนนี้ยังไม่มีค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด จึงสนใจที่จะทำการศึกษาและทดลองพารามิเตอร์ในส่วนนี้

1.3 กำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ศึกษาและรวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่เป็นผลลัพธ์ที่ต้องการให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยใช้สัญลักษณ์ Y แทนค่าผลตอบสนอง จากการศึกษา พบว่าค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาว (Peel Force) ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีความสำคัญต่อคุณลักษณะทางคุณภาพ

ของชิ้นงานมาก ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิตให้มากยิ่งขึ้น

1.3.2 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองร่วมกับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการยึดติด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน สามารถสรุปปัจจัยได้เป็น 3 ปัจจัย ได้แก่

(ก) อุณหภูมิในการยึดติด (Bonding Temperature) ของกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน หน่วยที่ใช้เป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

(ข) เวลาในการยึดติด (Bonding Time) ของกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน หน่วยที่ใช้เป็น วินาที (seconds)

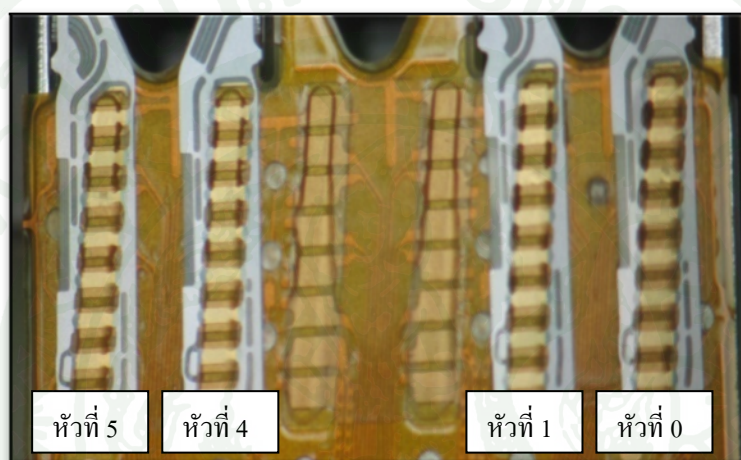
(ค) น้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด (Bonding Weight) ของกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน หน่วยที่ใช้เป็น กิโลกรัม (kg)

1.4 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

จากการระบุปัญหาของงานวิจัยผ่านผ้งเหตุและผล นำไปสู่การกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ สำหรับตัวแปรตอบสนองหลายตัว (Multiple Response Full Factorial Design) เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ส่งผลให้ลักษณะคุณภาพของแรงดึงลอกฟิล์มกาวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยขั้นตอนการออกแบบทดลอง มีดังนี้

1.4.1 จากการกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการทดลอง คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด ACF แต่ละปัจจัยทำการทดลองที่ 2 ระดับ ที่ระดับต่ำและระดับสูง โดยระดับปัจจัยที่กำหนดใช้ในการทดลองเป็นช่วงของแต่ละปัจจัยที่ทำให้เกิดของ

เสียในกระบวนการยัดติด ACF น้อยที่สุด ในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง ครั้งละ 1 ชิ้นงาน แต่ละชิ้นงานทดสอบ 4 หัว ได้แก่ หัวที่ 0 (HD_0) หัวที่ 1 (HD_1) หัว 4 (HD_4) และหัวที่ 5 (HD_5) เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเกิดปัญหาชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดมากที่สุด ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้มาจากพนักงานที่มีความเชี่ยวชาญในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ตัวอย่างหัวชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแสดงในภาพที่ 19 ดังนั้นการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 48 การทดลอง ใช้ชิ้นงานทั้งหมด 48 ชิ้น (192 หัว) โดยทำการทดลองตามลำดับการสุ่มในโปรแกรม Minitab



ภาพที่ 19 ตัวอย่างหัวชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ที่มา: โรงงานตัวอย่าง (2014)

1.4.2 ทำการทดลองจริงตามแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่ตั้งไว้ และเก็บบันทึกข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หาผลกระทบของปัจจัยหลักและผลกระทบของปัจจัยร่วม เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการกระบวนการยัดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ให้มีค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนด

1.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำระดับพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตจริง ซึ่งใช้ขึ้นตัวอย่างในการยืนยันผล 10 ขึ้น (40 หัว) จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูล คำนวณค่าต่างๆ ทางสถิติ และทดสอบความแม่นยำของกระบวนการด้วยการทดสอบ t (t-test) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ว่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้หรือไม่

1.6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต

2. สถานที่ทำการทดลอง

บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด 140 ม.2 ถ.อุดมสรยุทธ ต.คลองจิก อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13160

3. ระยะเวลาทำการวิจัย

ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2557

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการปรับปรุงการยัดตัก ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิต และเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการต่อไปในอนาคต

5. แหล่งทุนสนับสนุน

จากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ในส่วนของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และทุนส่วนตัว

ผลและวิจารณ์

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป การวิเคราะห์ความแปรปรวน การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด และผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

1. ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ สำหรับตัวแปรตอบสนอง 5 ตัวแปร คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการกระบวนการยึดติด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการยึดติด ACF 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด ACF จากการศึกษากระบวนการผลิต พบว่า พารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวของกระบวนการยึดติด ACF ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่านเขียน โดยกำหนดระดับพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ระดับคือ ระดับต่ำและระดับสูง ซึ่งพารามิเตอร์และระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ระดับของพารามิเตอร์	
		ระดับต่ำ	ระดับสูง
A: อุณหภูมิที่ใช้ในการยึดติด	องศาเซลเซียส	170	210
B: เวลาที่ใช้ในการยึดติด	วินาที	5	10
C: น้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด	กิโลกรัม	2	6

จากนั้นนำพารามิเตอร์และระดับพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ โดยมีรายละเอียดและลำดับการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก ก ซึ่งเป็นการทดลองแบบสุ่ม ทำการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง มีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 48 การทดลอง ผลการทดลองแต่ละหัวแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองแรงดึงลอกฟิล์มกาวของ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)			
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅
1	210	5	6	73.9	57.8	90.0	98.2
2	170	10	6	53.6	45.1	62.8	53.7
3	210	5	6	82.7	85.8	83.3	103.0
4	210	5	2	66.2	60.3	50.2	57.2
5	210	10	2	101.8	94.7	90.9	96.5
6	210	5	2	70.2	64.8	63.4	66.3
7	210	10	6	117.0	126.6	98.9	114.0
8	210	10	6	105.6	107.4	106.4	127.9
9	170	10	6	67.6	74.2	61.3	71.1
10	210	10	2	124.2	92.7	81.2	89.3
11	170	10	6	76.7	75.6	61.1	77.9
12	170	5	2	51.0	37.4	40.4	37.4
13	170	10	6	68.6	58.8	64.0	92.6
14	210	10	2	96.4	85.9	77.2	84.4
15	210	5	6	96.7	94.1	103.2	107.5
16	170	10	2	36.5	39.2	33.1	34.0
17	170	10	2	50.6	32.9	40.5	41.5
18	210	5	6	85.1	83.6	86.6	107
19	170	10	6	100.2	77.8	87.5	82.9
20	170	5	2	36.9	34.4	38.9	31.5
21	210	10	6	109.3	91.8	119.1	119.4
22	210	10	2	95.2	85.0	74.0	91.4

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)			
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅
23	210	10	6	112.1	100.2	103.2	104.9
24	210	5	2	59.3	68.3	60.7	64.5
25	170	5	6	48.5	47.8	42.4	41.2
26	170	10	2	39.6	36.1	41.1	40.0
27	170	5	6	35.0	40.5	40.5	42.3
28	170	5	2	38.6	37.3	36.8	41.5
29	170	5	6	48.8	40.1	50.6	42.9
30	210	5	6	62.1	58.7	77.2	91.3
31	170	10	2	48.3	43.5	36.6	52.3
32	210	10	2	96.3	99.5	82.3	105.0
33	170	10	2	35.6	37.3	33.1	44.2
34	210	5	2	65.9	60.7	38.5	43.3
35	170	5	2	43.9	41.2	40.2	31.9
36	210	5	2	68.4	60.7	64.2	43.9
37	170	5	6	35.4	31.8	34.2	36.6
38	170	5	2	42.1	32.3	32.5	42
39	170	10	2	58.2	53.5	48	53.7
40	170	5	6	38.4	28.8	30.7	34.1
41	210	10	6	128.6	107.8	95.6	118.9
42	170	5	2	46.7	39.8	34.1	32.6
43	170	10	6	49.9	51.4	54.5	70.9
44	210	5	6	68.7	79.9	99.9	82.4

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _r)			
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅
45	210	10	6	114.2	111.5	99.3	91.4
46	210	10	2	110.2	84.2	96.7	106.7
47	210	5	2	65.1	80.0	48.1	52.2
48	170	5	6	35.5	38.1	40.9	37.0

จากข้อมูลผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัวขึ้นงาน (HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅) ตามลำดับแผนการทดลองที่กำหนดไว้ข้างต้น จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล ดังนี้

1.1 สมมติฐานการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ผู้วิจัยได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 90% หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.1 ($\alpha = 0.10$) และตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการทดสอบ คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว โดยจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H₀) เมื่อค่า P-value < 0.10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

1.1.1 การทดสอบสมมติฐานของพารามิเตอร์หลัก (Test of Main Factors) รูปแบบทั่วไปของสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ

H₀ : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

H₁ : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

1.1.2 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม (Test of Interaction Factors) รูปแบบทั่วไปของสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

1.2 การกำหนดรูปแบบสมการ (Model)

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

เมื่อกำหนดให้ i คือ ระดับของพารามิเตอร์ A; ($i = 1$ และ 2)
 j คือ ระดับของพารามิเตอร์ B; ($j = 1$ และ 2)
 k คือ ระดับของพารามิเตอร์ C; ($k = 1$ และ 2)
 l คือ จำนวนการทำการทดลองซ้ำ; ($l = 1, 2, 3, 4, 5$ และ 6)

โดยที่ y_{ijkl} คือ ค่าตัวแปรตอบสนอง (ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว) ของการทดลองที่ปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ปัจจัย C ที่ระดับ k

μ คือ ค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)
 τ_i คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับที่ i
 β_j คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j
 γ_k คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย C ที่ระดับที่ k
 $(\tau\beta)_{ij}$ คือ ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j
 $(\tau\gamma)_{ik}$ คือ ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย C ที่ระดับ k
 $(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
 $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
 ϵ_{ijkl} คือ ค่าผิดพลาดของการทดลอง

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว มีรายละเอียด ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 0 (HD₀)

2.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀) สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀)

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
A	20377.5	1	20377.5	193.81	0.000
B	8300.3	1	8300.3	78.94	0.000
C	1485.2	1	1485.2	14.13	0.001
A*B	1430.1	1	1430.1	13.60	0.001
A*C	0.9	1	0.9	0.01	0.926
B*C	494.1	1	494.1	4.70	0.036
A*B*C	651.2	1	651.2	6.19	0.017
Error	4205.6	40	105.1		
Total	36944.9	47			
S = 10.2538		PRESS = 6056.10			
R-Sq = 88.62%		R-Sq (pred) = 83.61%		R-Sq (adj) = 86.62%	

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) ในตารางที่ 5 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 บางเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*B, B*C และ A*B*C คัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก ได้แก่ เทอม A*C จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0)
หลังจากคัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	20377.5	1	20377.5	198.61	0.000
B	8300.3	1	8300.3	80.90	0.000
C	1485.2	1	1485.2	14.48	0.000
A*B	1430.1	1	1430.1	13.94	0.001
B*C	494.1	1	494.1	4.82	0.034
A*B*C	651.2	1	651.2	6.35	0.016
Lack of Fit	0.9	1	0.9	0.01	0.926
Error	4205.6	40	105.1		
Total	36944.9	47			
S = 10.1291		PRESS = 5765.52			
R-Sq = 88.61%		R-Sq (pred) = 84.39%		R-Sq (adj) = 86.95%	

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) หลังจากคัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกในตารางที่ 6 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 ทุกเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*B, B*C และ A*B*C

จากตารางที่ 6 ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 86.95% หมายความว่า ความผันแปรของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองถดถอยนี้ได้ถึง 86.95% และตั้งข้อสมมติฐานในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยได้ ดังนี้

H_0 : แบบจำลองถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : แบบจำลองถดถอยขาดความเหมาะสม

จากตารางที่ 6 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.926 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่าแบบจำลองถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

จากนั้นนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) แบบจำลองถดถอยที่ใช้ค่า Coded Unit มีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y_{HD_0} = 70.029 + 20.604*Temp + 13.150*Time + 5.563*Weight + 5.458*Temp*Time + 3.208*Time*Weight - 3.683*Temp*Time*Weight \quad (14)$$

กำหนดให้ค่า Temp, Time และ Weight ใช้แทนค่า อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนักที่ใช้ในการยึดติด โดยใช้ค่า Coded Unit เท่ากับ +1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับสูง และ -1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับต่ำ

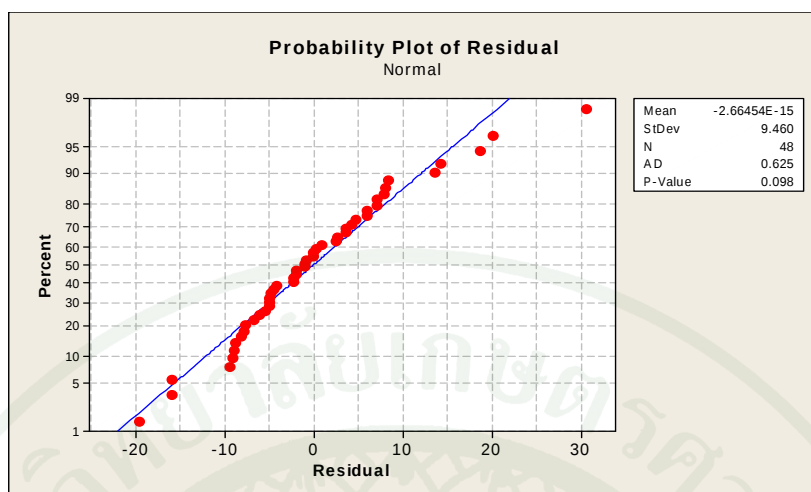
2.1.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติฐาน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าผิดพลาด (Residual Plots) ว่าเป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การทดสอบข้อสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 20 พบว่า ถ้ากราฟความน่าจะเป็นแบบปกติมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กำหนดให้สามารถปฏิเสธ H_0 ได้เมื่อ ค่า P-value < 0.05 โดยมี การทดสอบสมมติฐานว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ

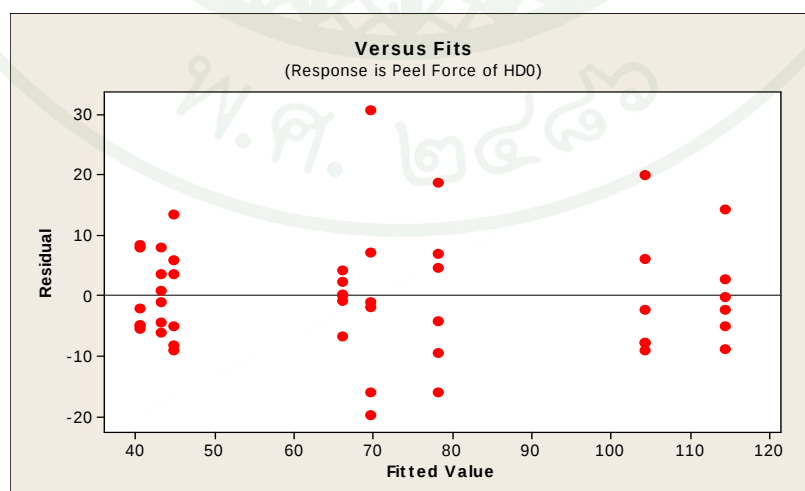
H_1 : ค่าผิดพลาด (Residual) ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 20 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติที่แสดงในภาพที่ 20 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.098 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

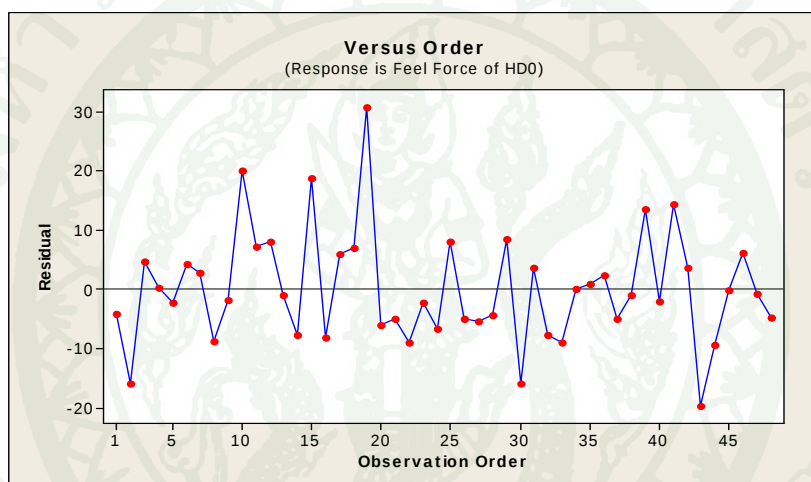
(ข) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองที่แสดงดังภาพที่ 21 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ กระจายตัวอย่างสมดุลง (ไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์)



ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองในภาพที่ 21 กราฟมีลักษณะการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นแบบสุ่มอย่างสมดุลและไม่มีลักษณะแบบลำโพงปลายเปิด ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่

(ค) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองแสดงในภาพที่ 22 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาดและการกระจายตัวแบบสุ่ม



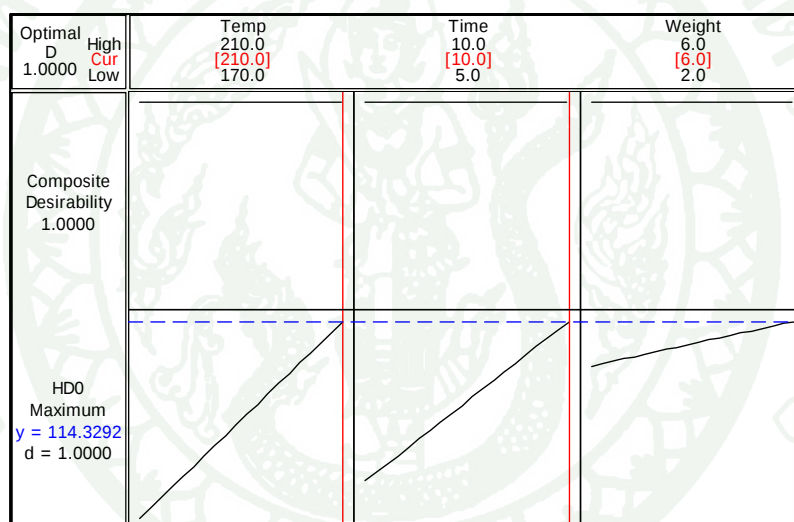
ภาพที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองในภาพที่ 22 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งกระจายตัวเป็นแบบสุ่มไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์

จากการทดสอบข้อสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองมีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความพอเพียง

2.1.3 การกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการบวกรีดอัด ACF ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 0 (HD₀) โดยใช้แบบจำลองถดถอยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองยิ่งมามากยิ่งดี (Maximize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 50 กรัมแรง และค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 11 กรัมแรง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀) จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀) ในภาพที่ 23 สามารถอธิบายถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 10 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม สำหรับกระบวนการรีดอัด ACF ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุด เท่ากับ 114.33 กรัมแรง และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1 (100%) ซึ่งค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้มากกว่าค่าเป้าหมาย

2.2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 1 (HD₁)

2.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁)

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
A	19485.1	1	19485.1	204.36	0.000
B	5386.9	1	5386.9	56.50	0.000
C	2047.5	1	2047.5	21.47	0.000
A*B	511.6	1	511.6	5.37	0.026
A*C	11.3	1	11.3	0.12	0.732
B*C	630.0	1	630.0	6.61	0.014
A*B*C	198.0	1	198.0	2.08	0.157
Error	3813.9	40	95.3		
Total	32084.4	47			
S = 9.76464		PRESS = 5492.06			
R-Sq = 88.11%		R-Sq (pred) = 82.88%		R-Sq (adj) = 86.03%	

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) ในตารางที่ 7 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 บางเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*B และ B*C ตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก ได้แก่ เทอม A*C และ A*B*C จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁)
หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	19485.1	1	19485.1	203.41	0.000
B	5386.9	1	5386.9	56.24	0.000
C	2047.5	1	2047.5	21.37	0.000
A*B	511.6	1	511.6	5.34	0.026
B*C	630.0	1	630.0	6.58	0.014
Lack of Fit	209.4	2	104.7	1.10	0.343
Error	3813.9	40	95.3		
Total	32084.4	47			
S = 9.78736	PRESS = 5254.90				
R-Sq = 87.46%	R-Sq (pred) = 83.62%		R-Sq (adj) = 85.97%		

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกในตารางที่ 8 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 ทุกเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*B และ B*C

จากตารางที่ 8 ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 85.97% หมายความว่า ความผันแปรของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองถดถอยนี้ได้ถึง 85.97% และตั้งข้อสมมติฐานในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยได้ ดังนี้

H_0 : แบบจำลองถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : แบบจำลองถดถอยขาดความเหมาะสม

จากตารางที่ 8 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.343 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่าแบบจำลองถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

จากนั้นนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอก फिल्मกาวหัวที่ 1 (HD₁) แบบจำลองถดถอยที่ใช้ค่า Coded Unit มีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y_{HD1} = 64.935 + 20.148*Temp + 10.594*Time + 6.531*Weight + 3.265*Temp*Time + 3.623*Time*Weight \quad (15)$$

กำหนดให้ค่า Temp, Time และ Weight ใช้แทนค่า อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนัก ที่ใช้ในการยึดติด โดยใช้ค่า Coded Unit เท่ากับ +1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับสูง และ -1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับต่ำ

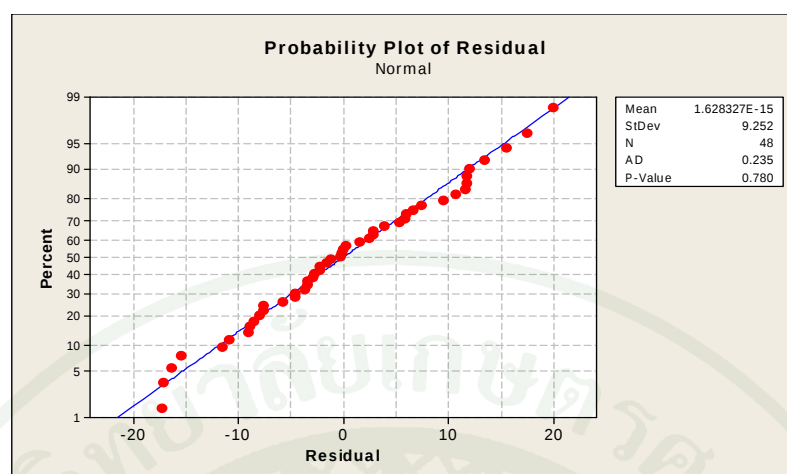
2.2.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อสมมติฐาน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าผิดพลาด (Residual Plots) ว่า เป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การทดสอบข้อสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 24 พบว่า ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กำหนดให้สามารถปฏิเสธ H_0 ได้เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$ โดยมีการทดสอบสมมติฐานว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ

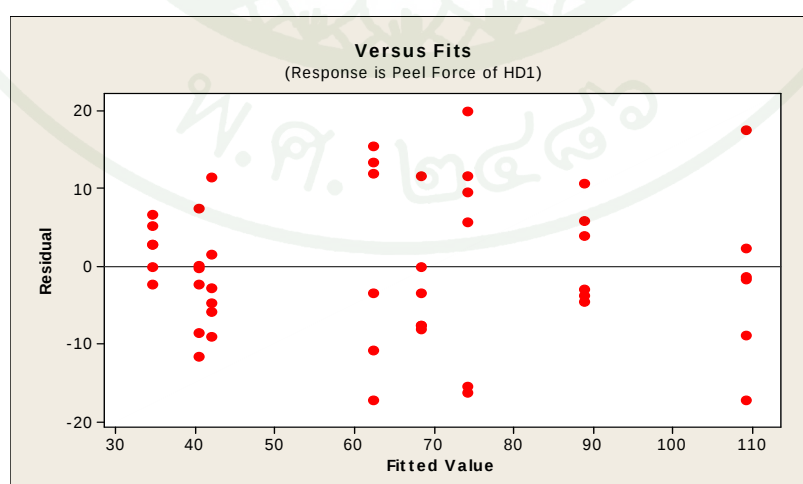
H_1 : ค่าผิดพลาด (Residual) ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 24 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติที่แสดงในภาพที่ 24 กราฟข้อมูลมีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.780 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

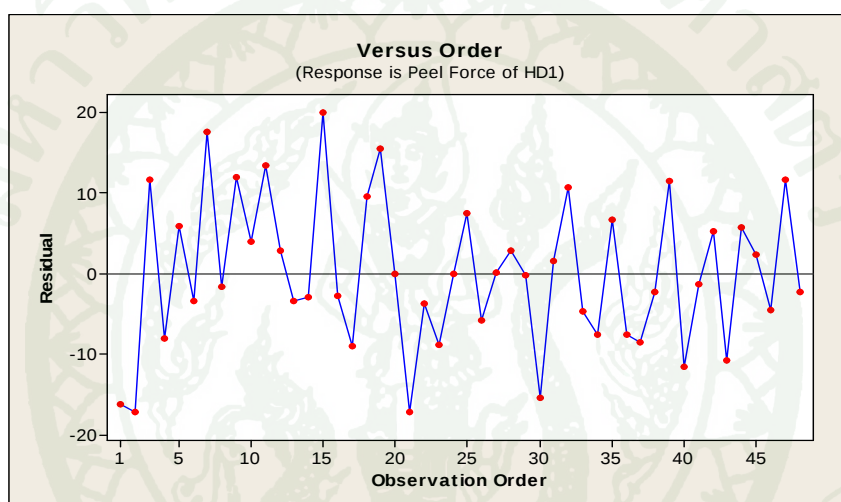
(ข) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองที่แสดงดังภาพที่ 25 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ กระจายตัวต้องไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง ในภาพที่ 25 กราฟมีลักษณะการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นแบบสุ่มอย่างสมดุลและไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่

(ค) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองแสดงในภาพที่ 26 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาดและการกระจายตัวแบบสุ่ม



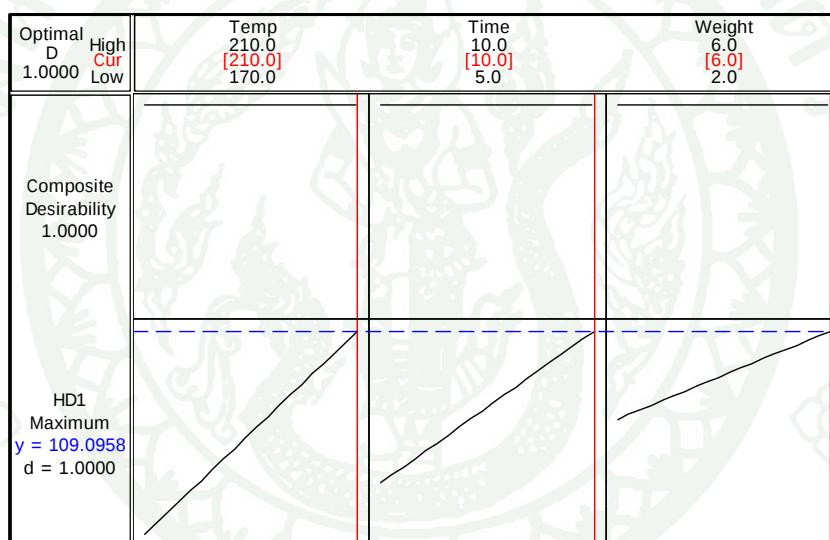
ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองในภาพที่ 26 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มไม่มีรูปแบบแนวโน้ม

จากการทดสอบข้อสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองมีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความพอเพียง

2.2.3 การกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการบวนการยัดตีด ACF ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 1 (HD₁) โดยใช้แบบจำลองถดถอยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองยิ่งมกยิ่งดี (Maximize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 50 กรัมแรง และค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 11 กรัมแรง จากนั้นทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁)

จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) ในภาพที่ 27 สามารถอธิบายถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 10 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม สำหรับกระบวนการยัดตีด ACF ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุด เท่ากับ 109.10 กรัมแรง และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1 (100%) ซึ่งค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้มากกว่าค่าเป้าหมาย

2.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 4 (HD₄)

2.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	17036.6	1	17036.6	239.61	0.000
B	3690.8	1	3690.8	51.91	0.000
C	5429.4	1	5429.4	76.36	0.000
A*B	200.5	1	200.5	2.82	0.101
A*C	534.0	1	534.0	7.51	0.009
B*C	47.0	1	47.0	0.66	0.421
A*B*C	1173.2	1	1173.2	16.50	0.000
Error	2844.0	40	71.1		
Total	30955.5	47			
S = 8.43211	PRESS = 4095.39				
R-Sq = 90.81%	R-Sq (pred) = 86.77%		R-Sq (adj) = 89.20%		

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) ในตารางที่ 9 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 บางเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*C และ A*B*C คัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก ได้แก่ เทอม B*C จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄)
หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	17036.6	1	17036.6	231.45	0.000
B	3690.8	1	3690.8	50.14	0.000
C	5429.4	1	5429.4	73.76	0.000
B*C	534.0	1	534.0	7.25	0.010
A*B*C	1173.2	1	1173.2	15.94	0.000
Lack of Fit	247.5	2	123.7	1.74	0.188
Error	2844.0	40	71.1		
Total	30955.5	47			
S = 8.57949	PRESS = 4037.90				
R-Sq = 90.01%	R-Sq (pred) = 86.96%		R-Sq (adj) = 88.82%		

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกในตารางที่ 6 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 ทุกเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, B*C และ A*B*C

จากตารางที่ 10 ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 88.82% หมายความว่า ความผันแปรของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองถดถอยนี้ได้ถึง 88.82% และตั้งข้อสมมติฐานในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยได้ ดังนี้

H_0 : แบบจำลองถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : แบบจำลองถดถอยขาดความเหมาะสม

จากตารางที่ 10 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.188 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่าแบบจำลองถดถอยนี้มีความเหมาะสม

จากนั้นนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอก फिल्मกาวหัวที่ 4 (HD₄) แบบจำลองถดถอยที่ใช้ค่า Coded Unit มีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y_{HD4} = 64.081 + 18.840*Temp + 8.769*Time + 10.635*Weight + 3.335*Time*Weight - 4.944*Temp*Time*Weight \quad (16)$$

กำหนดให้ค่า Temp, Time และ Weight ใช้แทนค่า อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนัก ที่ใช้ในการยึดติด โดยใช้ค่า Coded Unit เท่ากับ +1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับสูง และ -1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับต่ำ

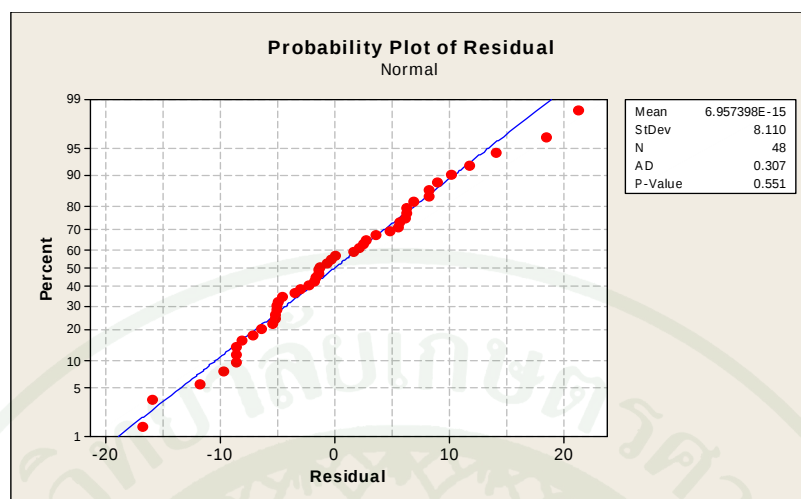
2.3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อสมมติฐาน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าผิดพลาด (Residual Plots) ว่า เป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การทดสอบข้อสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 28 พบว่า ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กำหนดให้สามารถปฏิเสธ H_0 ได้เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$ โดยมีการทดสอบสมมติฐานว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ

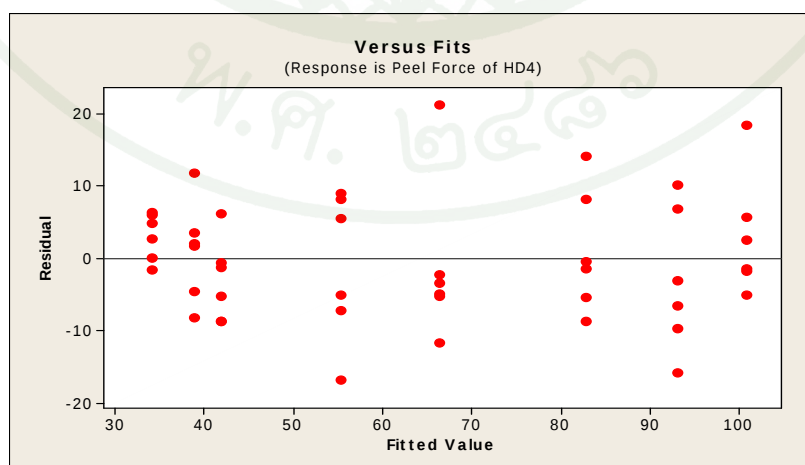
H_1 : ค่าผิดพลาด (Residual) ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 28 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติที่แสดงในภาพที่ 28 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.551 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

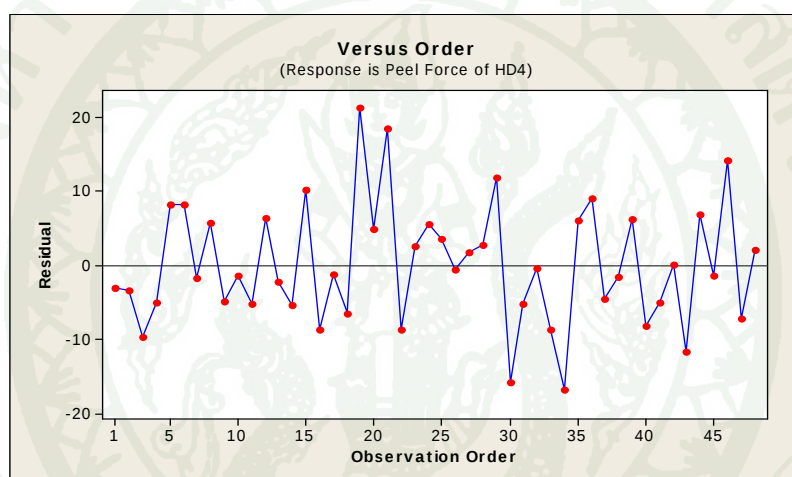
(ข) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองที่แสดงดังภาพที่ 29 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ กระจายตัวอย่างสมดุลไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์



ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง ในภาพที่ 29 กราฟมีลักษณะการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นแบบสุ่มอย่างสมดุลและไม่มี ลักษณะรูปแบบความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูล คงที่

(ค) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับ ลำดับการทดลองแสดงในภาพที่ 30 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาดและการ กระจายตัวแบบสุ่ม



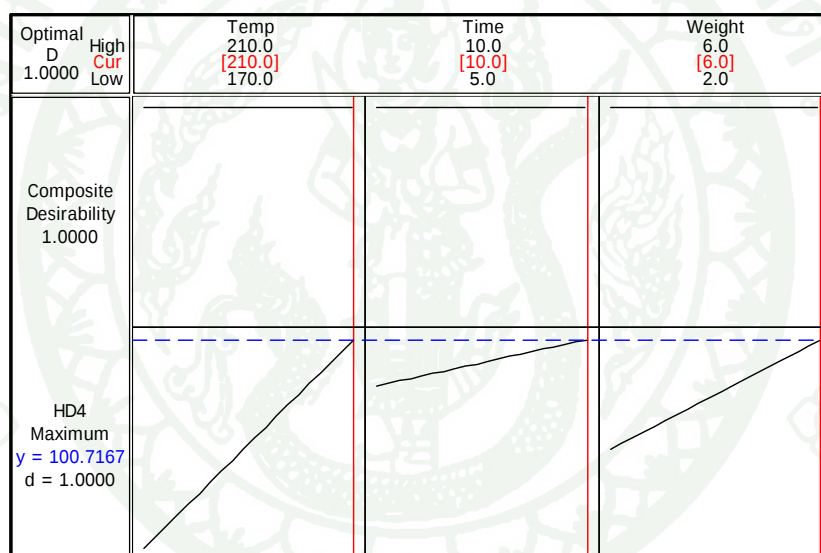
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองในภาพที่ 30 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งกระจายตัว เป็นแบบสุ่มไม่มีรูปแบบแนวโน้ม

จากการทดสอบข้อสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า กราฟความน่าจะเป็น แบบปกติของค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่า พยากรณ์ตัวแปรตอบสนองมีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูล คงที่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวเป็น อิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความพอเพียง

2.3.3 การกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยัดตีด ACF ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 4 (HD₄) โดยใช้แบบจำลองถดถอยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองยิ่งมายิ่งดี (Maximize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 50 กรัมแรง และค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 11 กรัมแรง จากนั้นทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄)

จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) ในภาพที่ 31 สามารถอธิบายถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 10 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม สำหรับกระบวนการยัดตีด ACF ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุด เท่ากับ 100.72 กรัมแรง และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1 (100%) ซึ่งค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้มากกว่าค่าเป้าหมาย

2.4 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 5 (HD₅)

2.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅)

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
A	20866.7	1	20866.7	236.32	0.000
B	7420.2	1	7420.2	84.04	0.000
C	6669.4	1	6669.4	75.53	0.000
A*B	99.8	1	99.8	1.13	0.294
A*C	564.4	1	564.4	6.39	0.016
B*C	1.1	1	1.1	0.01	0.910
A*B*C	2200.5	1	2200.5	24.92	0.000
Error	3531.9	40	88.3		
Total	41354.0	47			
S = 9.39663	PRESS = 5085.88				
R-Sq = 91.46%	R-Sq (pred) = 87.70%		R-Sq (adj) = 89.96%		

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) ในตารางที่ 11 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 บางเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*C และ A*B*C ตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก ได้แก่ เทอม A*B และ B*C จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ แสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅)
หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	20866.7	1	20866.7	241.25	0.000
B	7420.2	1	7420.2	85.79	0.000
C	6669.4	1	6669.4	77.11	0.000
A*C	564.4	1	564.4	6.53	0.014
A*B*C	2200.5	1	2200.5	25.44	0.000
Lack of Fit	100.9	2	50.5	0.57	0.569
Error	3531.9	40	88.3		
Total	41354.0	47			
S = 9.30024	PRESS = 4744.84				
R-Sq = 91.22%	R-Sq (pred) = 88.53%		R-Sq (adj) = 90.17%		

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกในตารางที่ 12 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 ทุกเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, A*C และ A*B*C

จากตารางที่ 12 ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 90.17% หมายความว่า ความผันแปรของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองถดถอยนี้ได้ถึง 90.17% และตั้งข้อสมมติฐานในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยได้ ดังนี้

H_0 : แบบจำลองถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : แบบจำลองถดถอยขาดความเหมาะสม

จากตารางที่ 12 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.569 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่าแบบจำลองถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

จากนั้นนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอก फिल्मกาวหัวที่ 5 (HD₅) แบบจำลองถดถอยที่ใช้ค่า Coded Unit มีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y_{HD5} = 69.425 + 20.850*Temp + 12.433*Time + 11.788*Weight + 3.429*Temp*Weight - 6.771*Temp*Time*Weight \quad (17)$$

กำหนดให้ค่า Temp, Time และ Weight ใช้แทนค่า อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนัก ที่ใช้ในการยึดติด โดยใช้ค่า Coded Unit เท่ากับ +1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับสูง และ -1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับต่ำ

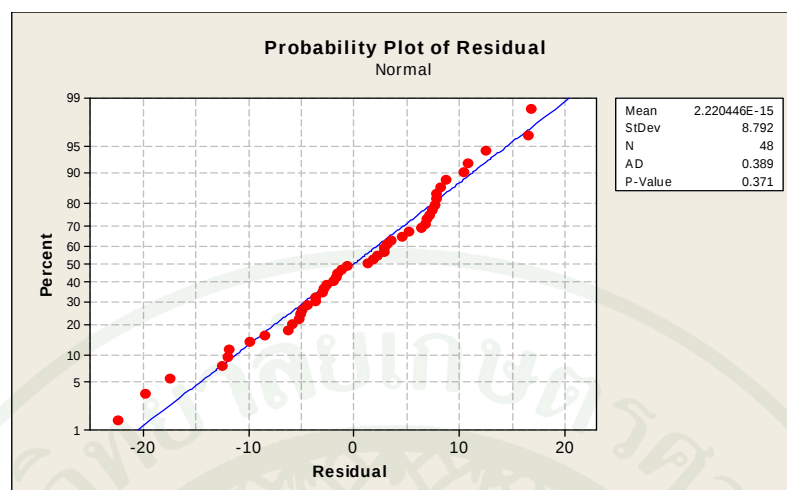
2.4.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อสมมติฐาน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าผิดพลาด (Residual Plots) ว่า เป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การทดสอบข้อสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 32 พบว่า ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กำหนดให้สามารถปฏิเสธ H_0 ได้เมื่อ ค่า $P\text{-value} < 0.05$ โดยมีการทดสอบสมมติฐานว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ

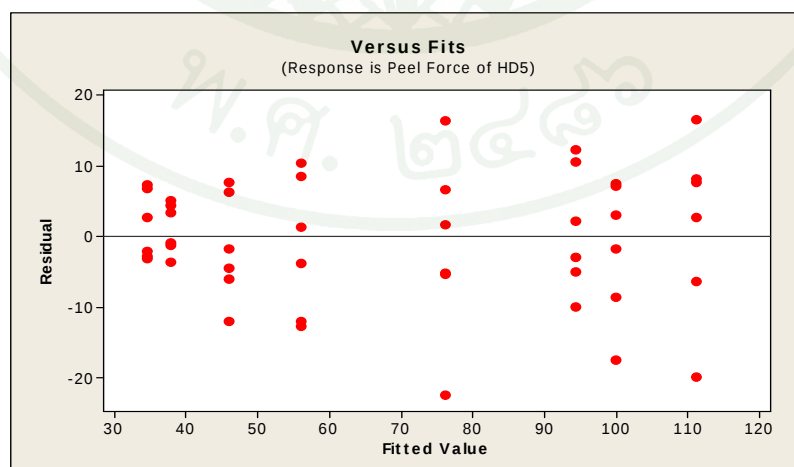
H_1 : ค่าผิดพลาด (Residual) ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 32 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติที่แสดงในภาพที่ 32 กราฟมีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติพบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.371 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

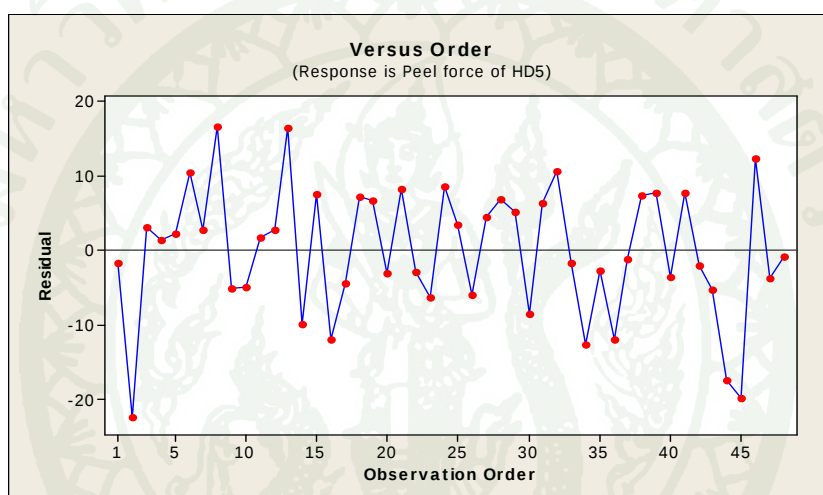
(ข) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองแสดงดังภาพที่ 33 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสมดุล



ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง ในภาพที่ 33 กราฟมีลักษณะการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นแบบสุ่มอย่างสมดุลและไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ ซึ่งค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่

(ค) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองแสดงในภาพที่ 34 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาดและการกระจายตัวแบบสุ่ม



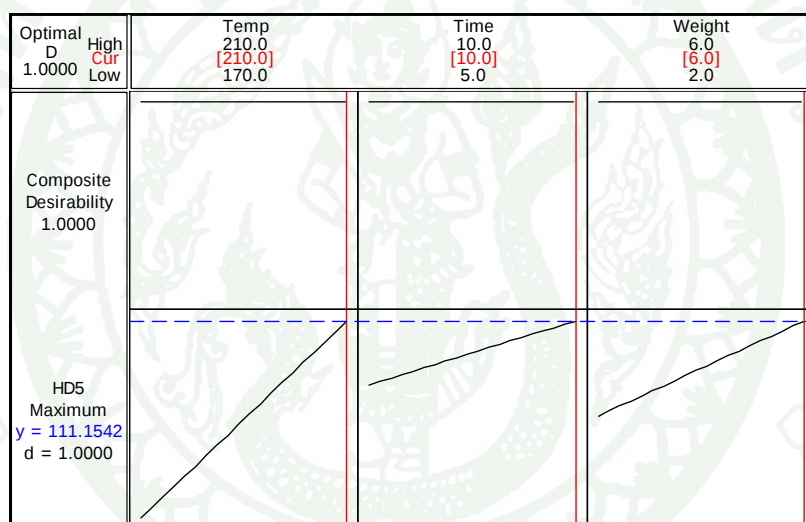
ภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองในภาพที่ 34 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าผิดพลาดที่มีการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มไม่มีแนวโน้ม

จากการทดสอบข้อสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองมีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความพอเพียง

2.4.3 การกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการกระบวนการยัดตีด ACF ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของหัวที่ 5 (HD₅) โดยใช้แบบจำลองถดถอยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองยิ่งมกยิ่งดี (Maximize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 50 กรัมแรง และค่าขอบเขตล่าง (Lower) ของค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 11 กรัมแรง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅)

จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) ในภาพที่ 35 สามารถอธิบายถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 10 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม สำหรับกระบวนการยัดตีด ACF ทำให้ได้ค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุด เท่ากับ 111.15 กรัมแรง และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1 (100%) ซึ่งค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้มากกว่าค่าเป้าหมาย

2.5 การวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว

2.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ที่แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) ของแรงดึงลอกฟิล์มกาว สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (18)$$

เมื่อกำหนดให้ S.D. คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล i

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

X_i คือ ข้อมูล ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสูตรดังกล่าวแสดงดังตารางภาคผนวก ก สังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง จึงต้องแปลงข้อมูลโดยใช้ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm, $\ln$) มาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร (James, 2010)

$$\ln S.D. = \log_e S.D. \quad (19)$$

$$\ln S.D. = a \quad (20)$$

$$S.D. = e^a \quad (21)$$

เมื่อกำหนดให้ S.D. คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล i

e คือ จำนวนอตรรกยะ มีค่าประมาณเท่ากับ 2.71828...

a คือ ค่า $\ln$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการคำนวณตามสูตรดังกล่าวแสดงใน

ตารางที่ 13 ค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการคำนวณ

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)				ln S.D. (g _p)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅	
1	210	5	6	73.9	57.8	90.0	98.2	2.88483
2	170	10	6	53.6	45.1	62.8	53.7	1.97799
3	210	5	6	82.7	85.8	83.3	103.0	2.26461
4	210	5	2	66.2	60.3	50.2	57.2	1.89627
5	210	10	2	101.8	94.7	90.9	96.5	1.51092
6	210	5	2	70.2	64.8	63.4	66.3	1.07603
7	210	10	6	117.0	126.6	98.9	114.0	2.44103
8	210	10	6	105.6	107.4	106.4	127.9	2.37416
9	170	10	6	67.6	74.2	61.3	71.1	1.71099
10	210	10	2	124.2	92.7	81.2	89.3	2.93708
11	170	10	6	76.7	75.6	61.1	77.9	2.06343
12	170	5	2	51.0	37.4	40.4	37.4	1.86513
13	170	10	6	68.6	58.8	64.0	92.6	2.70445
14	210	10	2	96.4	85.9	77.2	84.4	2.06936
15	210	5	6	96.7	94.1	103.2	107.5	1.80828
16	170	10	2	36.5	39.2	33.1	34.0	1.00834
17	170	10	2	50.6	32.9	40.5	41.5	1.98106
18	210	5	6	85.1	83.6	86.6	107	2.39956
19	170	10	6	100.2	77.8	87.5	82.9	2.26071
20	170	5	2	36.9	34.4	38.9	31.5	1.16295
21	210	10	6	109.3	91.8	119.1	119.4	2.56085
22	210	10	2	95.2	85.0	74.0	91.4	2.22748

ตารางที่ 13 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)				ln S.D. (g _p)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅	
23	210	10	6	112.1	100.2	103.2	104.9	1.62038
24	210	5	2	59.3	68.3	60.7	64.5	1.39823
25	170	5	6	48.5	47.8	42.4	41.2	1.31097
26	170	10	2	39.6	36.1	41.1	40.0	0.77094
27	170	5	6	35.0	40.5	40.5	42.3	1.15242
28	170	5	2	38.6	37.3	36.8	41.5	0.74570
29	170	5	6	48.8	40.1	50.6	42.9	1.59441
30	210	5	6	62.1	58.7	77.2	91.3	2.70731
31	170	10	2	48.3	43.5	36.6	52.3	1.91020
32	210	10	2	96.3	99.5	82.3	105.0	2.26956
33	170	10	2	35.6	37.3	33.1	44.2	1.55964
34	210	5	2	65.9	60.7	38.5	43.3	2.58410
35	170	5	2	43.9	41.2	40.2	31.9	1.64383
36	210	5	2	68.4	60.7	64.2	43.9	2.37383
37	170	5	6	35.4	31.8	34.2	36.6	0.71754
38	170	5	2	42.1	32.3	32.5	42	1.71779
39	170	10	2	58.2	53.5	48	53.7	1.42910
40	170	5	6	38.4	28.8	30.7	34.1	1.43866
41	210	10	6	128.6	107.8	95.6	118.9	2.65551
42	170	5	2	46.7	39.8	34.1	32.6	1.85654
43	170	10	6	49.9	51.4	54.5	70.9	2.26953
44	210	5	6	68.7	79.9	99.9	82.4	2.55777

ตารางที่ 13 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)				ln S.D. (g _p)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅	
45	210	10	6	114.2	111.5	99.3	91.4	2.36678
46	210	10	2	110.2	84.2	96.7	106.7	2.45663
47	210	5	2	65.1	80.0	48.1	52.2	2.66650
48	170	5	6	35.5	38.1	40.9	37.0	0.82457

จากนั้นนำค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการคำนวณมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งแสดงตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว

แหล่งความผันแปร (Source)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก (MS)	อัตราส่วน F (F)	ค่า P-value
A	5.6240	1	5.6240	28.22	0.000
B	0.8770	1	0.8770	4.40	0.042
C	0.6416	1	0.6416	3.22	0.080
A*B	0.4688	1	0.4688	2.35	0.133
A*C	0.0134	1	0.0134	0.07	0.797
B*C	0.3678	1	0.3678	1.85	0.182
A*B*C	1.4563	1	1.4563	7.31	0.010
Error	7.9712	40	0.1993		
Total	17.4201	47			
S = 0.446408		PRESS = 11.4786			
R-Sq = 54.24%		R-Sq (pred) = 34.11%		R-Sq (adj) = 46.23%	

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า $\ln S.D.$ แรงดึงดูดฟิล์มกาวใน ตารางที่ 14 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 บางเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C และ $A*B*C$ ตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก ได้แก่ เทอม $A*B$, $A*C$ และ $B*C$ จากนั้นทำการวิเคราะห์ ความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ แสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า $\ln S.D.$ แรงดึงดูดฟิล์มกาว หลังจากตัด เทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออก

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ยผลบวก	อัตราส่วน F	ค่า
(Source)	(SS)	(df.)	(MS)	(F)	P-value
A	5.6240	1	5.6240	27.42	0.000
B	0.8770	1	0.8770	4.28	0.045
C	0.6416	1	0.6416	3.13	0.084
$A*B*C$	1.4563	1	1.4563	7.10	0.011
Lack of Fit	0.8499	3	0.2833	1.42	0.251
Error	7.9712	40	0.1993		
Total	17.4201	47			
S = 0.452925		PRESS = 10.9918			
R-Sq = 49.36%		R-Sq (pred) = 36.90%		R-Sq (adj) = 44.65%	

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า $\ln S.D.$ แรงดึงดูดฟิล์มกาวใน ตารางที่ 15 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 ทุกเทอมมีนัยสำคัญ ได้แก่ เทอม A, B, C, และ $A*B*C$

จากตารางที่ 15 ค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 44.65% หมายความว่า ความผันแปรของ ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงดูดฟิล์มกาวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองถดถอยนี้ได้ถึง 44.65% และตั้งข้อ สมมติฐานในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยได้ ดังนี้

H_0 : แบบจำลองถดถอยมีความเหมาะสม

H_1 : แบบจำลองถดถอยขาดความเหมาะสม

จากตารางที่ 15 ค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.251 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่าแบบจำลองถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

จากนั้นนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว แบบจำลองถดถอยที่ใช้ค่า Coded Unit มีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y_{\ln S.D.} = 1.9122 - 0.3423*Temp - 0.1352*Time + 0.1156*Weight - 0.1742*Temp*Time*Weight \quad (22)$$

กำหนดให้ค่า Temp, Time และ Weight ใช้แทนค่า อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนักที่ใช้ในการยัดติด โดยใช้ค่า Coded Unit เท่ากับ +1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับสูง และ -1 แทนพารามิเตอร์ที่ระดับต่ำ

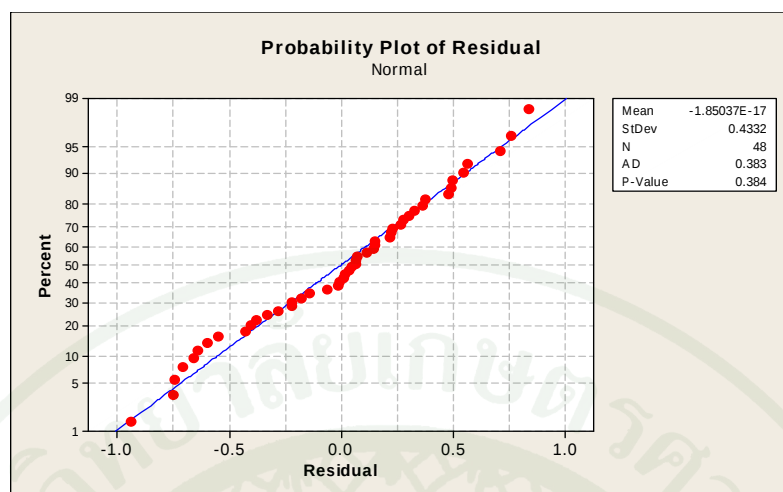
2.5.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติฐาน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าผิดพลาด (Residual Plots) ว่าเป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) การทดสอบข้อสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 36 พบว่า ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ แสดงว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กำหนดให้สามารถปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่า P-value < 0.05 โดยมีการทดสอบสมมติฐานว่าค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ดังนี้

H_0 : ค่าผิดพลาด (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ

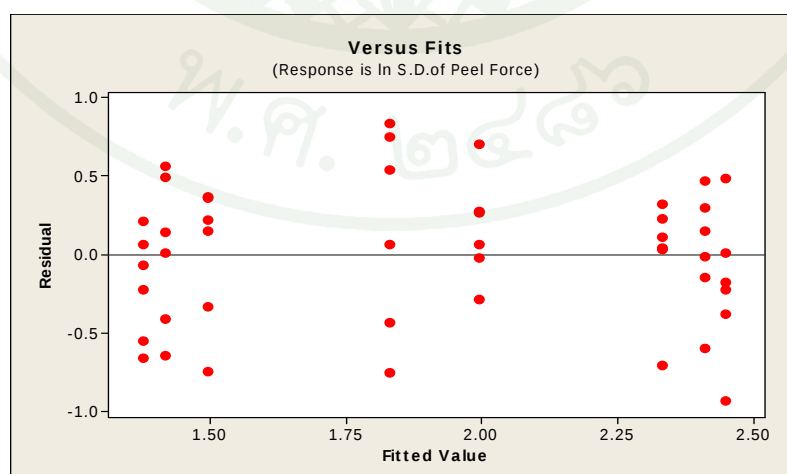
H_1 : ค่าผิดพลาด (Residual) ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 36 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติที่แสดงในภาพที่ 36 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่า P-value ที่ได้เท่ากับ 0.384 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

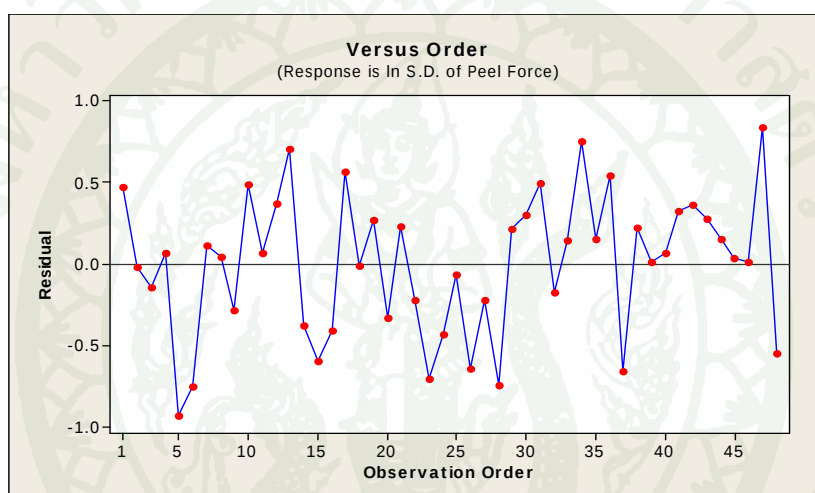
(ข) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง แสดงดังภาพที่ 37 โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสมดุล



ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองในภาพที่ 37 มีลักษณะการกระจายตัวของค่าผิดพลาดเป็นแบบสุ่มอย่างสมดุลและไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนของข้อมูลคงที่

(ค) การทดสอบข้อสมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองแสดงดังภาพที่ 38 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเป็นอิสระของค่าผิดพลาดและการกระจายตัวแบบสุ่มของข้อมูล



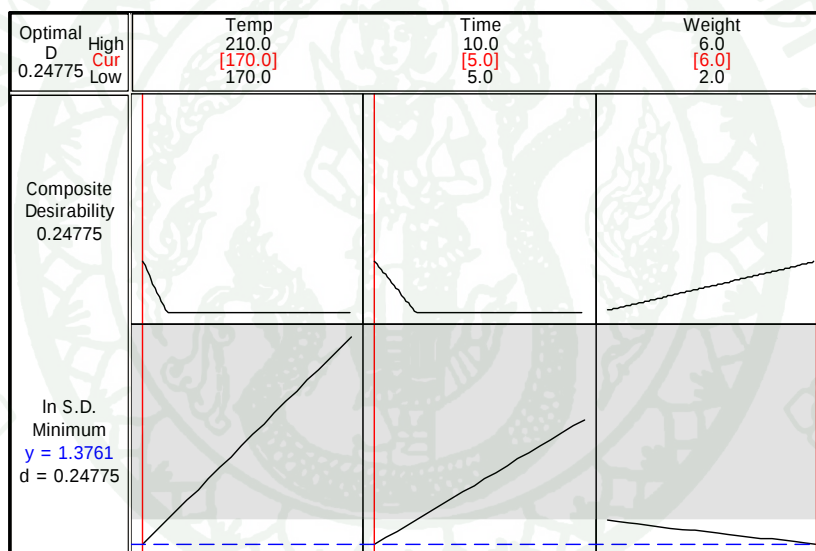
ภาพที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองที่แสดงในภาพที่ 38 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าผิดพลาดที่มีการกระจายตัวแบบอิสระต่อกัน ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม

จากการทดสอบข้อสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองมีความแปรปรวนคงที่และมีค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความพอเพียง

2.5.3 การกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการบวกรีดอัด ACF ที่ส่งผลต่อค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว โดยใช้แบบจำลองถดถอยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองยิ่งน้อยยิ่งดี (Minimize) ซึ่งกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 1 กรัมแรง และ ค่าขอบเขตบน (Upper) ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 1.5 กรัมแรง จากนั้นทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาว ในภาพที่ 39 สามารถอธิบายถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการบวกรีดอัด ACF สำหรับชุดหัวอ่านเขียน คือ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ทำให้ได้ค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.376 กรัมแรง และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 0.2478 (24.78%) ซึ่งค่า $\ln S.D.$ แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้น้อยกว่าค่าเป้าหมาย

3. การกำหนดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

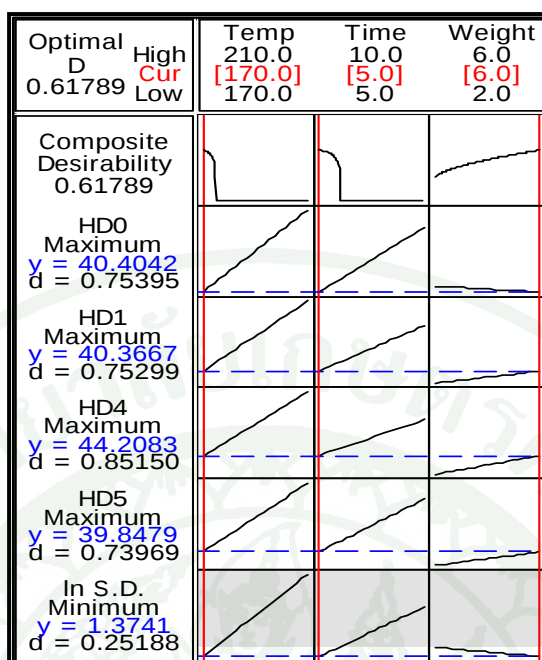
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ซึ่งได้ศึกษา 5 ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยึดติด ACF ของการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

กำหนดให้น้ำหนักและความสำคัญของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว (HD_0 , HD_1 , HD_4 และ HD_5) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับ 1 เนื่องจากทั้ง 5 ค่าตัวแปรตอบสนอง มีความสำคัญต่อกระบวนการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียนเท่ากัน ดังแสดงรายละเอียดข้อกำหนดในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ข้อกำหนดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

ตัวแปรตอบสนอง	เป้าหมาย	ขอบเขต ล่าง	ค่า เป้าหมาย	ขอบเขต บน	น้ำหนัก	ความ สำคัญ
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์ม กาวหัวที่ 0 (HD_0)	Maximize	11	50	-	1	1
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์ม กาวหัวที่ 1 (HD_1)	Maximize	11	50	-	1	1
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์ม กาวหัวที่ 4 (HD_4)	Maximize	11	50	-	1	1
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์ม กาวหัวที่ 5 (HD_5)	Maximize	11	50	-	1	1
ค่า ln S.D. แรงดึงลอก ฟิล์มกาว	Minimize	-	1	1.5	1	1

นำค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 16 ใช้เป็นข้อกำหนดในฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยึดติด ACF ของการประกอบชุดหัวอ่านเขียน ซึ่งทำให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่สุดภายใต้ข้อกำหนด ค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 การพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว (HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅) และค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวจากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab

จากภาพการพล็อตค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ และค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการยึดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน จากการวิเคราะห์ พบว่า พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ซึ่งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀) มากที่สุดเท่ากับ 40.40 กรัมแรง ได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.7540 (75.40%) ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD₁) มากที่สุดเท่ากับ 40.37 กรัมแรง ได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.7530 (75.30%) ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) มากที่สุดเท่ากับ 44.21 กรัมแรง ได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.8515 (85.15%) ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) มากที่สุดเท่ากับ 39.85 กรัมแรง ได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.7397 (73.97%) และได้ค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวน้อยที่สุดเท่ากับ 1.374 กรัมแรง ได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.2519 (25.19%) เมื่อคิดค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) ของทั้ง 5 ตัวแปรตอบสนอง เท่ากับ 0.6179 (61.79%)

จากการวิเคราะห์แยกตัวแปรตอบสนองทีละตัวแปร (Single Response Optimization) พบว่า ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุดที่หัว HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ เท่ากับ 114.31, 109.10, 100.72 และ 111.15 กรัมแรง ตามลำดับ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว เท่ากับ 3.959 กรัมแรง เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าที่ดีที่สุดของตัวแปรตอบสนองทั้ง 5 ตัวแปร (Multiple Responses Optimization) จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุดที่หัว HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ เท่ากับ 40.40, 40.37, 44.21 และ 39.85 กรัมแรง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์ม เท่ากับ 3.952 กรัมแรง ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าความแตกต่างของแรงดึงลอกฟิล์มกาวระหว่างหัว ทั้ง 4 มีน้อยที่สุดจึงเลือกการวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดของหลายตัวแปรตอบสนอง จากนั้นนำ ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดมาทดลองเพื่อยืนยันผลต่อไป

4. การทดลองเพื่อยืนยันผล

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ โดยมีตัวแปรตอบสนอง 5 ตัวแปร คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ได้แก่ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว นำไปทดลองกับ กระบวนการผลิตจริง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในการยึดติด ACF ของกระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน เขียน คือ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ใช้ชิ้นงานทั้งหมด 10 ชิ้น แต่ละชิ้นทดสอบ 4 หัว คือ HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ รวมทั้งหมด 40 หัว ค่าที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลแสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

Run Order	Parameters			Peel Force (g _r)				ln S.D. (g _r)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅	
1	170	5	6	49.5	43.7	46.2	44.2	0.9677
2	170	5	6	44.2	47.5	41.3	42.5	0.9909
3	170	5	6	31.6	38.2	46.2	43.7	1.8685
4	170	5	6	39.9	38.6	37.6	43.7	0.9826
5	170	5	6	36.1	39.5	45.8	52	1.9500

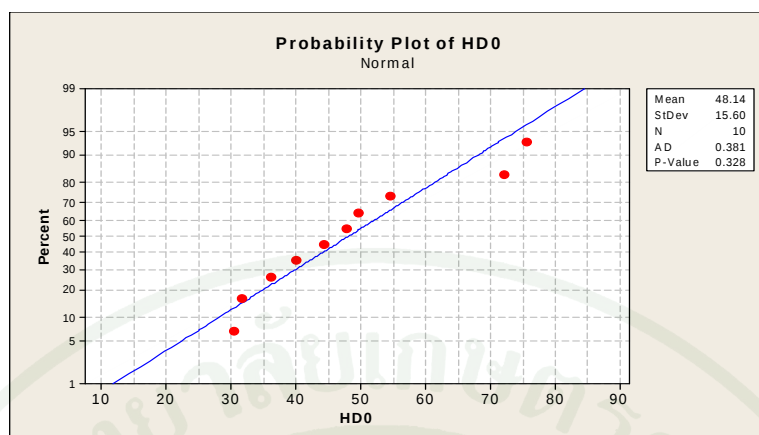
ตารางที่ 17 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _f)				ln S.D. (g _f)
	Temp	Time	Weight	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅	
	(°C)	(sec)	(kg)					
6	170	5	6	75.6	41.1	43.6	45.9	2.7821
7	170	5	6	72.1	43.3	39	43	2.7274
8	170	5	6	30.3	46	33.9	47.5	2.1525
9	170	5	6	47.7	41.8	43.1	44.8	2.0568
10	170	5	6	54.4	41.1	42.8	40.4	1.8812

จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่หัว HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ มากที่สุดเท่ากับ 40.40, 40.37, 44.21 และ 39.85 กรัมแรง ตามลำดับ และค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวน้อยที่สุดเท่ากับ 1.374 กรัมแรง (หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวน้อยที่สุดเท่ากับ 3.952 กรัมแรง)

4.1 การวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀)

จากข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD₀) มาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0)

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลแสดงในภาพที่ 41 มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.328 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การทดสอบ t (t-test) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) สามารถตั้งสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \mu_{HD0} = 40.40 \text{ กรัมแรง}$$

$$H_1: \mu_{HD0} \neq 40.40 \text{ กรัมแรง}$$

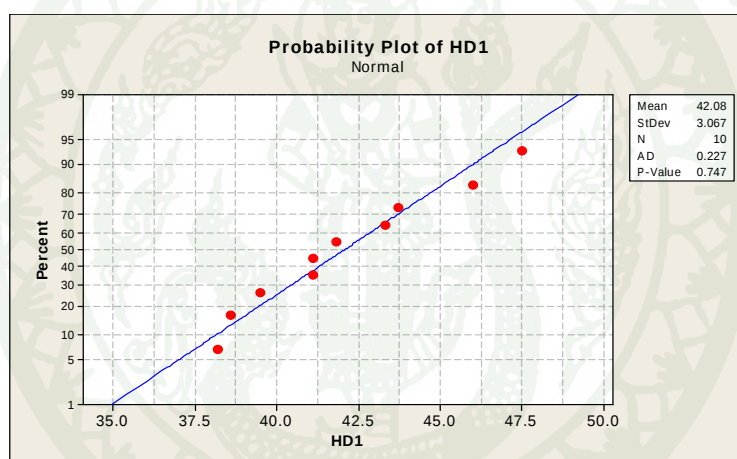
ตารางที่ 18 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่า T	ค่า P-value
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาว HD_0	10	48.14	15.60	4.93	1.57	0.151
องศาเสรี = 9						
ช่วงความเชื่อมั่น 95% = (36.98, 50.30)						

จากการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) ในตารางที่ 18 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value เท่ากับ 0.151 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0) เท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 40.40 กรัมแรง พบว่า ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 36.98 - 50.30 กรัมแรง ซึ่งไม่ต่างจากค่าพยากรณ์

4.2 การวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1)

จากข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) มาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1)

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลแสดงในภาพที่ 42 มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.747 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การทดสอบ t (t-test) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) สามารถตั้งสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \mu_{HD1} = 40.37 \text{ กรัมแรง}$$

$$H_1: \mu_{HD1} \neq 40.37 \text{ กรัมแรง}$$

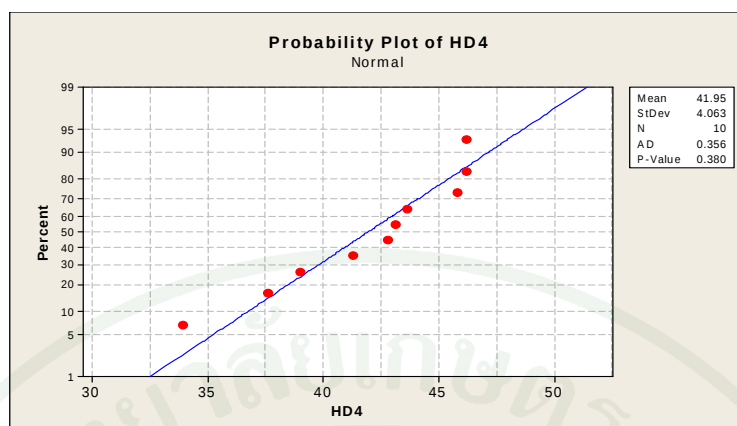
ตารางที่ 19 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่า T	ค่า P-value
ค่าเฉลี่ยแรงดึง ลอกฟิล์มกาว HD_1 องศาเสรี = 9 ช่วงความเชื่อมั่น 95% = (39.89, 44.27)	10	42.08	3.07	0.97	1.76	0.112

จากการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) ในตารางที่ 19 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value เท่ากับ 0.112 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1) เท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 40.37 กรัมแรง พบว่า ที่ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 39.89 - 44.27 กรัมแรง ซึ่งไม่ต่างจากค่าพยากรณ์

4.3 การวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4)

จากข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4) มาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄)

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลแสดงในภาพที่ 43 มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.380 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การทดสอบ t (t-test) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) สามารถตั้งสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \mu_{HD4} = 44.21 \text{ กรัมแรง}$$

$$H_1: \mu_{HD4} \neq 44.21 \text{ กรัมแรง}$$

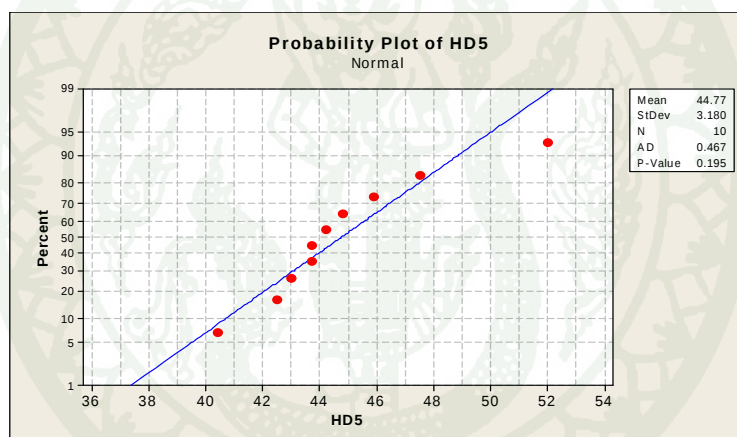
ตารางที่ 20 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD₄) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่า T	ค่า P-value
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาว HD ₄	10	41.95	4.06	1.28	-1.76	0.112
องศาเสรี = 9						
ช่วงความเชื่อมั่น 95% = (39.04, 44.86)						

จากการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) ในตารางที่ 20 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value เท่ากับ 0.112 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4) เท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 44.21 กรัมแรง พบว่า ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 39.04 - 44.86 กรัมแรง ซึ่งไม่ต่างจากค่าพยากรณ์

4.4 การวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5)

จากข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5) มาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5)

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลแสดงในภาพที่ 44 มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.195 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5) ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การทดสอบ t (t-test) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) สามารถตั้งสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \mu_{HD5} = 39.85 \text{ กรัมแรง}$$

$$H_1: \mu_{HD05} \neq 39.85 \text{ กรัมแรง}$$

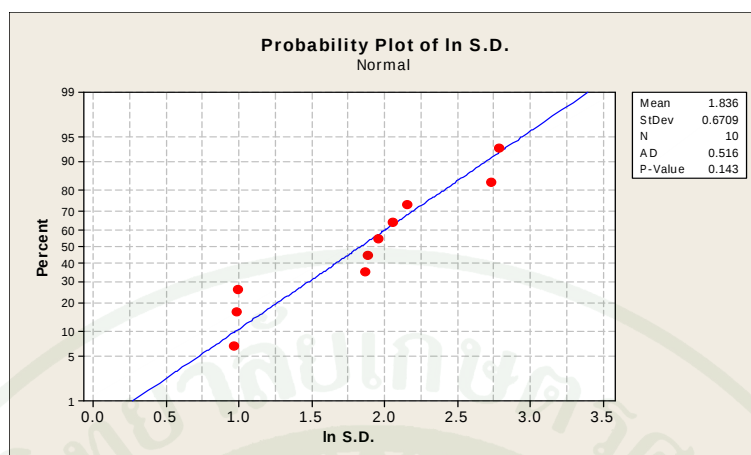
ตารางที่ 21 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอคฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅)ที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผล

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่า T	ค่า P-value
ค่าเฉลี่ยแรงดึง ลอคฟิล์มกาว HD ₅ องศาเสรี = 9 ช่วงความเชื่อมั่น 95% = (42.50, 47.04)	10	44.77	3.18	1.01	4.89	0.001

จากการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) ในตารางที่ 21 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงลอคฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD₅) ไม่เท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 39.85 กรัมแรง พบว่า ที่ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 42.50 - 47.04 กรัมแรง ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพยากรณ์

4.5 การวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่า ln S.D. แรงดึงลอคฟิล์มกาว

จากข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่แสดงในตารางที่ 17 นำค่า ln S.D. แรงดึงลอคฟิล์มกาวมาพล็อตกราฟการแจกแจงแบบปกติ เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ ที่มีการแจกแจงแบบปกติของการทดลองเพื่อยืนยันผลค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่แสดงในภาพที่ 45 มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.143 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การทดสอบ t (t-test) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) โดยตั้งสมมติฐาน คือ

$$H_0: \mu_{\ln S.D.} = 1.374 \text{ กรัมแรง}$$

$$H_1: \mu_{\ln S.D.} \neq 1.374 \text{ กรัมแรง}$$

ตารางที่ 22 การวิเคราะห์ค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่า T	ค่า P-value
ค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาว	10	1.836	0.671	0.212	2.18	0.057
องศาเสรี = 9						
ช่วงความเชื่อมั่น 95% = (1.356, 2.316)						

จากการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) ในตารางที่ 22 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ค่า P-value เท่ากับ 0.057 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าค่า ln S.D. แรงดึงลอกฟิล์มกาวเท่ากับค่าพยากรณ์ที่ 1.374 กรัมแรง พบว่า ที่ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ได้ช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 1.356 - 2.316 กรัมแรง ซึ่งไม่แตกต่างจากค่าพยากรณ์



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการบวนการยัดติดฟิล์มนำไฟฟ้าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Conductive Film, ACF) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการประกอบชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางคุณภาพที่สำคัญ คือ ค่าแรงดึงลอกฟิล์มกาว ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการที่ทำการศึกษาได้แก่ (1) อุณหภูมิ (2) เวลา และ (3) น้ำหนักที่ใช้ในขั้นตอนสุดท้ายของการยัดติด ACF

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ที่ศึกษาตัวแปรตอบสนอง 5 ตัวแปร ได้แก่ ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวของแต่ละหัว ที่หัว HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว ทั้งนี้เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการยัดติด ACF ในการประกอบชุดหัวอ่านเขียน จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าพารามิเตอร์ทั้งสามมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตัวแปรตอบสนอง โดยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ซึ่งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่มากที่สุดที่หัว HD₀, HD₁, HD₄ และ HD₅ เท่ากับ 40.40, 40.37, 44.21 และ 39.85 กรัมแรง ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่น้อยที่สุด เท่ากับ 3.952 กรัมแรง ทั้งนี้ค่าเป้าหมายของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่โรงงานกรณีศึกษากำหนดอยู่ในช่วง 11 ถึง 50 กรัมแรง

จากการวิเคราะห์การทดลองเพื่อยืนยันผลโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการยัดติด ชิ้นงาน จำนวน 10 ชิ้น พบว่า เมื่อทดสอบ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะได้ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ยของแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่หัวต่างๆ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการพยากรณ์และช่วงความเชื่อมั่น 95% จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าพยากรณ์ ($\bar{g}_p$)	ช่วงความเชื่อมั่น 95% ($\bar{g}_p$)
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 0 (HD_0)	40.40	36.98 - 50.30
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 1 (HD_1)	40.37	39.89 - 44.27
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 4 (HD_4)	44.21	39.04 - 44.86
ค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวหัวที่ 5 (HD_5)	39.85	42.50 - 47.04
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว	3.951	3.881 - 10.135

จากตารางที่ 23 พบว่า ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่หัว HD_0 , HD_1 , HD_4 , HD_5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดึงลอกฟิล์มกาว มีค่าสอดคล้องกับค่าพยากรณ์ และค่าเป้าหมายของค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวที่โรงงานกรณีศึกษากำหนด ดังนั้น ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ จึงตอบสนองวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการประกอบชุดหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของโรงงานกรณีศึกษา

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะกระบวนการผลิตที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ทักษะการยัดคิดของพนักงาน และความเสถียรภาพของเครื่องจักร เป็นต้น เพื่อเป็นการพัฒนาคุณลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามเป้าหมายมากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2550. **เกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรม**

อิเล็กทรอนิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.

จิราภรณ์ โอนพิมาย. 2554. **การศึกษาค่าแรงกดที่มีผลต่อการประกอบชุดประกอบหัวอ่าน/เขียน**

สำเร็จ เนื่องจากกระบวนการอัลตราโซนิกแท็บบอนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

โซลูชั่น เซนเตอร์ จำกัด. 2551. **คู่มือการใช้ Minitab: Design of Experiments**. Available Source:

<http://www.solutioncenterminitab.com/files/exampledoebook.pdf>, 18 มกราคม 2557.

ทีมบรรณาธิการ. 2546. **รู้ลึก รู้จริง HARDDISK**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์สวัสดี ไอที, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและการวิเคราะห์การ**

ทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

ประเสริฐศักดิ์ นาคสกุล, จุฬาลักษณ์ คำไม้ และอัญชลี มโนกุล. 2554. **การศึกษาวิเคราะห์**

พารามิเตอร์ในการออกแบบชุดจับยึดชิ้นงานสำหรับกระบวนการประกอบหัวอ่าน-เขียน
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-
พระนครเหนือ.

พรทิพา วังคาม. 2554. **การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการเชื่อมต่อไอซีด้วยฟิล์มตัวนำ ในการ**

ประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดยืดหยุ่นได้. สารนิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศิริศักดิ์ รังกลาง, ปภากร พิทยชาวล และ จิระพล ศรีเสริฐผล. 2554. **ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลือบผิว**

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าขึ้นอ่อนภายใต้ค่า Peeling Strength. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิริสุดา สุริยะ. 2552. การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพความต้านทานต่อแรงดึงของ
จุดเชื่อมต่อของหัวอ่านกับแขนยึดในกระบวนการผลิตชุดประกอบหัวอ่าน: กรณีศึกษา
โรงงานผลิตอุปกรณ์เก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์. สารนิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Brain M., 2000. **How Hard Disks Work**. Available Source: <http://computer.howstuffworks.com/hard-disk.htm>, January 18, 2014.

Chan, Y.C. and D.Y. Luk. 2002a. Effects of bonding parameters on the reliability performance of anisotropic conductive adhesive interconnects for flip-chip-on-flex packages assembly I. Different bonding temperature. **Microelectronics Reliability**. 42: 1185-1194.

_____. 2002b. Effects of bonding parameters on the reliability performance of anisotropic conductive adhesive interconnects for flip-chip-on-flex packages assembly II. Different bonding pressure. **Microelectronics Reliability**. 42: 1195-1204.

Chang, S.M., J.H. Jou, A. Hsieh, T.H. Chen, C.Y. Chang, Y.H. Wang, and C.M. Huang. 2001. Characteristic study of anisotropic-conductive film for chip-on-film packaging. **Microelectronics Reliability**. 41: 2001-2009.

Chen, X., J. Zhang, C. Jiao and Y. Liu. 2006. Effects of different bonding parameters on the electrical performance and peeling strengths of ACF interconnection. **Microelectronics Reliability**. 46: 774-785.

Fjelstad, J. 2006. **Flexible Circuit Technology**. 3rd ed. BR Publishing, Inc., USA.

Gao, L.L., X. Chena, S.B. Zhang and H. Gao. 2009. Mechanical properties of anisotropic conductive film with strain rate and temperature. **Materials Science and Engineering A**. 513-514: 216-221.

- Huang, Y.W., Y.M. Lin, and J.H. Lau. 2013. Assembly of 3D Chip Stack with 30 m-Pitch Micro Interconnects Using Novel Arrayed-Particles Anisotropic Conductive Film. **ETCT**. 71-75.
- Hwang, J.S., M.J. Yim and K.W. Paik 2008. Effects of bonding temperature on the properties and reliabilities of anisotropic conductive films (ACFs) for flip chip on organic substrate application. **Microelectronics Reliability**. 48: 293-299.
- Kim, J.W. and S.B. Jung. 2007. Effect of bonding force on the reliability of the flip chip packages employing anisotropic conductive film with reflow process. **Materials Science and Engineering A**. 452-453: 267-272.
- Kim, S.C. and Y.H. Kim. 2013. Flip chip bonding with anisotropic conductive film (ACF) and nonconductive adhesive (NCA). **Current Applied Physics**. 13: 14-25.
- Lacombe, B. 2006. **Adhesion Measurement Methods: Theory and Practice**. Taylor & Francis Group, Florida.
- Lee, S.H., K.L. Suk and K.W. Paik. 2013. Fine Pitch Flex-on-Flex (FOF) Assembly using Nanofiber Solder Anisotropic Conductive Films (ACFs) and Ultrasonic Bonding Method. **ETCT**. 1709-1712.
- Lin, C.M., Y.L. Chen and H.M. Chu. 2006. Modeling of real-time reliability prediction system for anisotropic conductive film (ACF) processing. **Materials Science and Engineering A**. 432: 239-244.
- Luk, C.F., Y.C. Chan and K.C. Hung. 2002. Application of adhesive bonding techniques in hard disk drive head assembly. **Microelectronics Reliability**. 42: 767-777.

- 3M Electronics markets materials division. 2008. **3M™ Anisotropic Conductive Film (ACF) Adhesive Rework Process**. Technical Bulletin. Bolton and Ford design Inc., Minnesota.
- _____. n.d. **3M™ Anisotropic Conductive Film Adhesive**. Technical data. Bolton and Ford design Inc., Minnesota.
- Montgomery, D.C. 2009. **Design and Analysis of Experiment**. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ostrowicki, G.T. and S.K. Sitaraman. 2012. Magnetically actuated peel test for thin films. **Thin Solid Films**. 520: 3987-3993.
- Pai, R.S. 2003. **Flip Chip Bonding using Sony Anisotropic Conductive Film (ACF)**. Available Source: <http://mitghmr.spd.louisville.edu/lutz/resources/sops/flipchip/>, January 12, 2014.
- Puthenparambil, A. 2006. **Effect of bonding pressure on reliability of anisotropic conductive adhesives joints in a silicon-to-flex-substrate interconnection**. M.E. Thesis, Binghamton University.
- Rizvi, M.J., Y.C. Chan, C. Bailey, H. Lu and A. Sharif. 2005. The effect of curing on the performance of ACF bonded chip-on-flex assemblies after thermal ageing. **Soldering & Surface Mount Technology**. 17: 40-48.
- Stewart, J. 2010. **Single Variable Calculus: Concepts and Contexts**. Cengage Learning, Canada.
- Tan, S.C., Y.C. Chan, Y.W. Chiu and C.W. Tan. 2004. Thermal stability performance of anisotropic conductive film at different bonding temperatures. **Microelectronics Reliability**. 44: 495-503.

Unitek Eapro, 2010. **Heat seal and ACF technology**. Available Source: [http://emax-sales.com/downloads/ACFBondingPresentation\[CompatibilityMode\].pdf](http://emax-sales.com/downloads/ACFBondingPresentation[CompatibilityMode].pdf), December 3, 2013.

Yang, K. and B.S. El-Haik. 2009. Response Surface Methodology. **Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development**, 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

Zhang, J.H., Y.C. Chan, M.O. Alam and S. Fu. 2003. Contact resistance and adhesion performance of ACF interconnections to aluminum metallization. **Microelectronics Reliability**. 43: 1303-1310.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลองเฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลผลการทดลองแฟลททอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ

Run Order	Parameters			Peel Force (g _f)				S.D. (g _f)	ln S.D. (g _f)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅		
1	210	5	6	73.9	57.8	90.0*	98.2*	17.9005	2.88483
2	170	10	6	53.6	45.1	62.8	53.7	7.2282	1.97799
3	210	5	6	82.7	85.8	83.3	103.0	9.6274	2.26461
4	210	5	2	66.2	60.3	50.2	57.2	6.6610	1.89627
5	210	10	2	101.8	94.7	90.9	96.5	4.5309	1.51092
6	210	5	2	70.2	64.8	63.4	66.3	2.9330	1.07603
7	210	10	6	117.0	126.6	98.9	114.0	11.4849	2.44103
8	210	10	6	105.6	107.4	106.4	127.9	10.7419	2.37416
9	170	10	6	67.6	74.2	61.3	71.1	5.5344	1.71099
10	210	10	2	124.2	92.7	81.2	89.3	18.8606	2.93708
11	170	10	6	76.7	75.6	61.1	77.9	7.8729	2.06343
12	170	5	2	51.0	37.4	40.4	37.4	6.4568	1.86513
13	170	10	6	68.6	58.8	64.0	92.6	14.9461	2.70445
14	210	10	2	96.4	85.9	77.2	84.4	7.9198	2.06936
15	210	5	6	96.7	94.1	103.2	107.5	6.0999	1.80828
16	170	10	2	36.5	39.2	33.1	34.0	2.7410	1.00834
17	170	10	2	50.6	32.9	40.5	41.5	7.2505	1.98106
18	210	5	6	85.1	83.6	86.6	107	11.0183	2.39956
19	170	10	6	100.2	77.8	87.5	82.9	9.5899	2.26071
20	170	5	2	36.9	34.4	38.9	31.5	3.1993	1.16295
21	210	10	6	109.3	91.8	119.1	119.4	12.9468	2.56085
22	210	10	2	95.2	85.0	74.0	91.4	9.2765	2.22748

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g _p)				S.D. (g _p)	ln S.D. (g _p)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅		
23	210	10	6	112.1	100.2	103.2	104.9	5.0550	1.62038
24	210	5	2	59.3	68.3	60.7	64.5	4.0480	1.39823
25	170	5	6	48.5	47.8	42.4	41.2	3.7098	1.31097
26	170	10	2	39.6	36.1	41.1	40.0	2.1618	0.77094
27	170	5	6	35.0	40.5	40.5	42.3	3.1658	1.15242
28	170	5	2	38.6	37.3	36.8	41.5	2.1079	0.74570
29	170	5	6	48.8	40.1	50.6	42.9	4.9254	1.59441
30	210	5	6	62.1	58.7	77.2	91.3	14.9890	2.70731
31	170	10	2	48.3	43.5	36.6	52.3	6.7544	1.91020
32	210	10	2	96.3	99.5	82.3	105.0	9.6752	2.26956
33	170	10	2	35.6	37.3	33.1	44.2	4.7571	1.55964
34	210	5	2	65.9	60.7	38.5	43.3	13.2514	2.58410
35	170	5	2	43.9	41.2	40.2	31.9	5.1749	1.64383
36	210	5	2	68.4	60.7	64.2	43.9	10.7384	2.37383
37	170	5	6	35.4	31.8	34.2	36.6	2.0494	0.71754
38	170	5	2	42.1	32.3	32.5	42	5.5722	1.71779
39	170	10	2	58.2	53.5	48	53.7	4.1749	1.42910
40	170	5	6	38.4	28.8	30.7	34.1	4.2151	1.43866
41	210	10	6	128.6	107.8	95.6	118.9	14.2322	2.65551
42	170	5	2	46.7	39.8	34.1	32.6	6.4016	1.85654
43	170	10	6	49.9	51.4	54.5	70.9	9.6748	2.26953
44	210	5	6	68.7	79.9	99.9	82.4	12.9069	2.55777

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Run Order	Parameters			Peel Force (g)				S.D. (g)	ln S.D. (g)
	Temp (°C)	Time (sec)	Weight (kg)	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅		
45	210	10	6	114.2	111.5	99.3	91.4	10.6630	2.36678
46	210	10	2	110.2	84.2	96.7	106.7	11.6655	2.45663
47	210	5	2	65.1	80.0	48.1	52.2	14.3895	2.66650
48	170	5	6	35.5	38.1	40.9	37.0	2.2809	0.82457

* หมายเหตุ แทนค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวในลำดับการทดลองที่ 1 ด้วยค่าเฉลี่ยของ 5 replicate ของตำแหน่งหัวที่ 4 (HD₄) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 90.0 กรัมแรง และตำแหน่งหัวที่ 5 (HD₅) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.2 กรัมแรง



ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันผล

Run Order	Parameters			Peel Force (g _r)				S.D. (g _r)	ln S.D. (g _r)
	Temp	Time	Weight	HD ₀	HD ₁	HD ₄	HD ₅		
	(°C)	(sec)	(kg)						
1	170	5	6	49.5	43.7	46.2	44.2	2.6319	0.9677
2	170	5	6	44.2	47.5	41.3	42.5	2.6937	0.9909
3	170	5	6	31.6	38.2	46.2	43.7	6.4784	1.8685
4	170	5	6	39.9	38.6	37.6	43.7	2.6715	0.9826
5	170	5	6	36.1	39.5	45.8	52	7.0288	1.9500
6	170	5	6	75.6	41.1	43.6	45.9	16.1527	2.7821
7	170	5	6	72.1	43.3	39	43	15.2928	2.7274
8	170	5	6	30.3	46	33.9	47.5	8.6067	2.1525
9	170	5	6	47.7	41.8	43.1	44.8*	7.8209	2.0568
10	170	5	6	54.4	41.1	42.8	40.4	6.5612	1.8812

* หมายเหตุ แทนค่าเฉลี่ยแรงดึงลอกฟิล์มกาวในลำดับการทดลองที่ 9 ของตำแหน่งหัวที่ 5 (HD₅) ด้วยค่าเฉลี่ยจาก 9 การทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.8 กรัมแรง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวอัจฉรีญา เนตรพุกคณะ
เกิดวันที่	8 มีนาคม พ.ศ.2533
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-