



การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดี
ที่สุด แบบอัลตราโซนิก

โดย

นายชินฉันทน์ พิราบุณเฑียรกุล

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดี
ที่สุด แบบอัลตราโซนิก

โดย

นายชินธันย์ พิรบูรณ์ไกรกุล



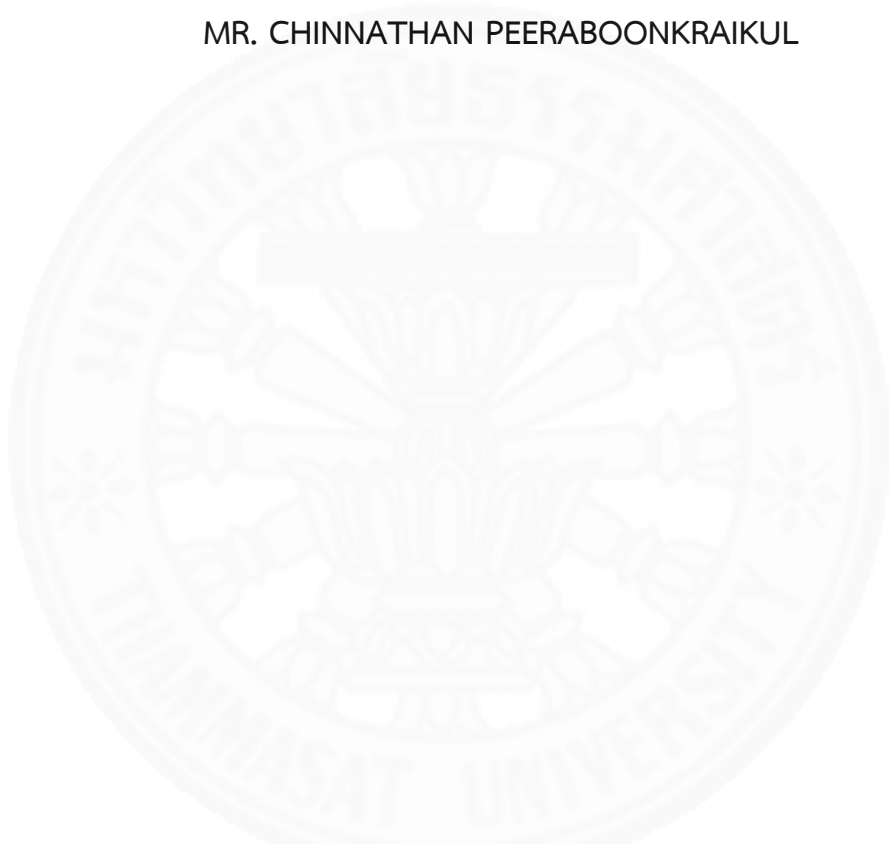
การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



OPTIMIZATION OF ULTRASONIC WELDING PARAMETERS FOR
COPPER TUBE JOINTS

BY

MR. CHINNATHAN PEERABOONKRAIKUL



AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN
INDUSTRIAL DEVELOPMENT
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

การค้นคว้าอิสระ

ของ

นายชินธันย์ พิรบูรณ์ไกรกุล

เรื่อง

การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุด แบบอัลตราโซนิก

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2558

ประธานกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นุชบา พงกษาพันธุ์รัตน์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสคุณธ์)

กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก
ชื่อผู้เขียน	นายชินธันย์ พิรบูรณ์ไกรกุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าของปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิกมีความสามารถในการทนแรงดันได้สูงที่สุด โดยตัวแปรที่ได้ศึกษามี 4 ตัวแปร ได้แก่ เวลาบิบบท่อทองแดง เวลาเชื่อมของท่อทองแดง แรงดันลมบิบบท่อทองแดง และระยะเวลาการสั้นของหัวโซนาโทรด โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง โดยการใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ซึ่งพบว่า เวลาบิบบท่อทองแดง แรงดันลมบิบบท่อทองแดง และระยะเวลาการสั้นของหัวโซนาโทรดนั้น มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงถูกนำมาทำการออกแบบการทดลองอีกครั้ง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ บ็อกซ์-เบนเกน โดยที่ค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุด คือ เวลาบิบบท่อทองแดงที่ 0.86 วินาที แรงดันลมบิบบท่อทองแดงที่ 4.35 บาร์ และค่าระยะเวลาการสั้นของหัวโซนาโทรดที่ 27 ไมโครเมตร เมื่อนำระดับที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิจัย พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงจะมีค่าระหว่าง 20.6–21.1 MPa และไม่พบปัญหาด้านคุณภาพของรอยเชื่อมท่อทองแดง

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง, ความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดง, การเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก

Independent Study Title	OPTIMIZATION OF ULTRASONIC WELDING PARAMETERS FOR COPPER TUBE JOINTS
Author	Mr. Chinnathan Peeraboonkraikul
Degree	Master of Engineering
Department/Faculty/University	Industrial Development Faculty of Engineering Thammasat University
Independent Study Advisor	Assoc. Prof. Dr. Samerjit Homrosukhon
Academic Years	2015

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the parameters providing the ultimate withstand pressure in a tube welded by ultrasonic copper welding process. The parameters of interest were the time of copper tube compression (t_1), time of welding (t_2), air pressure and amplitude of sonathode. 2^4 factorial experimental design was applied and found that time of copper tube compression (t_1), air pressure and amplitude of sonathode significantly affected at the α of 0.05. Such affecting factors were further investigated using a Response Surface Methodology in a Box-Behnken Design. It was found that the ultimate withstand pressure was achieved when (1) the time of copper tube compression was 0.86 Second, (2) the air pressure to compress was 4.35 Bar and (3) the amplitude of sonathode was 27 μm . The results were confirmed; the welding strengths of welded copper tube were average between 20.6 – 21.1 Mega Pascal (MPa) and there was no defects.

Keywords: Design of Experiments, Weld strength of copper tube joints, Ultrasonic Welding.

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพื่อมุ่งหวังให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณท่านคณะกรรมการสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร คณะกรรมการสอบ สำหรับคำแนะนำในการปรับปรุงงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวพีรบูรณ์ไกรกุล รวมทั้งญาติ พี่น้อง เพื่อนๆ ทุกคนของผู้วิจัย สำหรับความช่วยเหลือในด้านข้อมูล คำปรึกษา คำชี้แนะและที่สำคัญที่สุด คือ กำลังใจที่ให้กับเสมอมา

นายชินธันย์ พีรบูรณ์ไกรกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการ	4
1.5 ระยะเวลาดำเนินการ	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ระบบปรับอากาศ	6
2.1.1 หลักการของระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น	6
2.1.2 วัฏจักรของระบบทำความเย็น	7
2.1.2.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)	7
2.1.2.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser)	8
2.1.2.3 อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve)	8

2.1.2.4 อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)	9
2.2 สารทำความเย็น (Refrigerants)	9
2.2.1 Dichlorodifluoromethane (CCl ₂ F ₂)	10
2.2.2 R-22: Monochlorodifluoromethane (CHClF ₂)	11
2.2.3 R-502: Refrigerant (CHClF ₂ /CClF ₂ CF ₃)	11
2.2.4 R-134a: Tetrafluoroethane (CH ₂ FCF ₃)	11
2.2.5 R-717: Ammonia (NH ₃)	12
2.2.6 R-125: Pentafluoroethane (CHCF ₅)	12
2.2.7 สารทำความเย็นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	12
2.2.7.1 Ozone Depletion Potential: ODP	12
2.2.7.2 Global Warming Potential : GWP	12
2.2.8 สารทำความเย็นและระดับความปลอดภัย	13
2.3 ชนิดของเครื่องปรับอากาศ	14
2.3.1 เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก	15
2.3.2 เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่าง (Window)	15
2.3.3 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Spilt Type)	15
2.3.4 เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่	16
2.4 กระบวนการต่อวัสดุ	16
2.4.1 การเชื่อม (Welding)	16
2.4.1.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion)	17
2.4.1.2 การเชื่อมแบบไม่เปลี่ยนสถานะ (Solid state)	17
2.4.2 หลักของการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอุลตราโซนิก	17
2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง	19
2.5.1 หลักการออกแบบการทดลอง	19
2.5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง	21
2.5.3 คำจำกัดความ	21
2.5.4 หลักพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง	21
2.5.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	22
2.5.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง	23

2.5.7 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ	24
2.6 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing)	24
2.6.1 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว	25
2.6.2 การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง	25
2.6.3 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง	26
2.6.4 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน	27
2.6.5 ช่วงความเชื่อมั่น	27
2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)	28
2.7.1 ข้อสมมติของความเหมาะสมของการวิเคราะห์ความแปรปรวน	30
2.8 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล	31
2.8.1 การนิยามประชากร	31
2.8.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)	33
2.8.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Analyze Residuals) และตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองที่สร้างขึ้น	33
2.9 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)	35
2.9.1 การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design	36
2.9.2 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ	40
2.9.2.1 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง	44
2.9.3 ลักษณะคุณสมบัติของพื้นผิวผลตอบสนอง	48
2.9.3.1 ผลตอบสนองหลายตัว	50
2.9.4 การออกแบบการทดลองสำหรับฟิต (Fit) พื้นผิวผลตอบสนอง	50
2.9.5 การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับสอง	50
2.9.6 CCD รูปทรงกลม	51
2.9.6.1 จุดศูนย์กลางของการทดลองใน CCD	51
2.9.7 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)	51
2.9.7.1 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยด์ล (Cuboidal)	53
2.9.8 การออกแบบชนิดอื่น	54
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	55
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	58

3.1 การคัดเลือกปัจจัยและประเภทของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding)	58
3.2 การแบ่งส่วนการศึกษา	59
3.2.1 การศึกษาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม	59
3.2.2 การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุด	59
3.3 การกำหนดระดับปัจจัย ค่าตอบสนองที่ใช้ในการทดลองและสมมุติฐาน	59
3.3.1 การกำหนดระดับปัจจัย	59
3.3.2 ค่าตอบสนองที่ใช้ในการทดลอง	60
3.3.3 การกำหนดสมมุติฐานการวิจัย	61
3.4 การเลือกแบบการทดลอง	61
3.5 การดำเนินการทดลอง	63
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	63
3.5.2 การดำเนินการทดลอง	64
3.5.3 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก	64
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	65
3.7 การดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)	66
3.8 สรุปผลการทดลอง	66
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	67
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding)	67
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)	69

4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)	69
4.2.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของ Residuals	70
4.2.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่า Residual	70
4.2.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals	71
4.2.1.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน	73
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	74
4.4 การทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง	78
4.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น	80
4.5.1 การพิจารณาในการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์	81
4.5.1.1 ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression)	81
4.5.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	81
4.5.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj})	81
4.5.1.4 ค่า Lack-of-Fit	81
4.5.2 รูปแบบสมการพหุคูณควอดราติก (Full Quadratic)	82
4.5.3 รูปแบบสมการลิเนียร์ร่วมกับอินเตอร์แอคชั่น (Linear+Interaction)	83
4.5.4 รูปแบบสมการลิเนียร์กับสแควร์ (Linear+Squares)	84
4.5.5 รูปแบบสมการลิเนียร์ (Linear)	86
4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)	88
4.6.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของ Residuals	89
4.6.2 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals	89
4.6.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลการวิจัย	102

5.1.1 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบ อัลตราโซนิค	102
5.1.2 ผลการวิจัยหลังจากใช้การออกแบบทดลองแบบ Response Surface Methodology	102
5.1.3 ระดับในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด	103
5.1.4 ระดับที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ใช้เป็นมาตรฐานใน กระบวนการผลิต	104
5.2 ข้อเสนอแนะ	105
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	108
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติของสารทำความเย็น	1
1.2 ค่าปัจจัยในการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding)	3
1.3 ระยะเวลาดำเนินงาน	5
2.1 ค่า ODP และ GWP ของน้ำยาชนิดต่างๆ	13
2.2 การจัดกลุ่มของสารทำความเย็นตามระดับความปลอดภัย	14
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว	30
2.4 เครื่องหมายที่ใช้สำหรับคำนวณผลลัพธ์ของการออกแบบ 2 ²	40
2.5 การออกแบบการทดลองแบบสมมูล กลุ่มไม่สมบูรณ์สำหรับ 3 ทรีตเมนต์และ 3 บล็อก	52
2.6 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ที่มีสามตัวแปร	52
3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษา	60
3.2 การออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้น	62
4.1 ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure)	67
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง	75
4.3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนอง	78
4.4 การทดลอง Box-Behnken Design with 3 Center Point ที่มี 3 ตัวแปร	79
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบฟูลควอดราราทริก	82
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลิเนียกับอินเตอร์แอคชั่น	83
4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลิเนียกับสแควร์	85
4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลิเนีย	86
4.9 สรุปข้อมูลของสมการถดถอยในแต่ละรูปแบบ	87
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร	88
4.11 Output Optimization Point ที่ให้ค่า Withstand pressure สูงสุด	97
4.12 การปรับตั้งค่าปัจจัยที่ให้ค่า Withstand pressure สูงสุดและผลการทดสอบ	98
4.13 Output Optimization Point เพื่อใช้ในกระบวนการผลิต	99
4.14 การปรับตั้งค่าปัจจัยเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตและผลการทดสอบ	100

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 บริเวณที่ต้องการเชื่อมของชิ้นงาน	4
2.1 วัฏจักรของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ	7
2.2 ตัวอย่างของคอมเพรสเซอร์ (Compressor)	8
2.3 ตัวอย่างของคอนเดนเซอร์ (Condenser)	8
2.4 วาล์วลดแรงดันและท่อคูด	9
2.5 ตัวอย่างและวงจรของอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)	9
2.6 ส่วนประของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอุลตราโซนิก	18
2.7 การเชื่อมติดกันของวัสดุ	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ	20
2.9 อิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์	20
2.10 การพล็อตกราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง	34
2.11 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย	34
2.12 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง	35
2.13 การออกแบบส่วนประสมกลาง	36
2.14 การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design	37
2.15 อิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม	40
2.16 พื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ	42
2.17 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง	42
2.18 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง	43
2.19 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด)	45
2.20 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองต่ำสุด)	46
2.21 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสองเรียกว่า จุดอานม้า	47
2.22 รูปแบบบัญญัติของแบบจำลองกำลังสอง	49
2.23 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$	51
2.24 การออกแบบ แบบ Box-Behnken with a Center Point	53
2.25 การออกแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Centered) ส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$	54
2.26 การออกแบบรัศมีเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม, (b) ห้าเหลี่ยม	55

3.1 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม	60
3.2 ชิ้นงานทดสอบ	63
3.3 การเชื่อมต่อทองแดงกับเครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding machine)	64
3.4 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก	64
4.1 ชิ้นงานหลังการทดสอบ	69
4.2 การกระจายแบบปกติของค่า Residual	70
4.3 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order	71
4.4 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t1	71
4.5 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t2	72
4.6 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Air pressure	72
4.7 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Amplitude	73
4.8 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Fitted Value	73
4.9 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย	76
4.10 Normal Probability Plot of the Effects	76
4.11 กราฟของอิทธิพลหลัก 2 ระดับ	77
4.12 กราฟของอิทธิพลร่วม 2 ระดับ	77
4.13 การกระจายแบบปกติของค่า Residual (Box-Behnken)	89
4.14 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t1 (Box-Behnken)	90
4.15 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Air Pressure (Box-Behnken)	90
4.16 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Amplitude (Box-Behnken)	91
4.17 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order (Box-Behnken)	91
4.18 แสดงกราฟของอิทธิพลหลัก 3 ระดับ	93
4.19 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ t1	93
4.20 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Amplitude กับ t1	94
4.21 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ Amplitude	95
4.22 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ของระดับปัจจัยเทียบกับ Withstand pressure	95
4.23 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้มีค่า Withstand pressure สูงสุด	96
4.24 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้ได้ค่า Withstand pressure ประมาณ 18 MPa	99
4.25 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวแบบปกติของค่า Withstand pressure	101





บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกได้เพิ่มสูงขึ้นจากภาวะเรือนกระจก หรือที่เรารู้จักกันในชื่อว่า Green- House Effect สาเหตุหลักๆ ก็เกิดจากการปล่อยก๊าซพิษต่างๆ เข้าสู่ชั้นบรรยากาศจนทำให้โลกร้อนขึ้นและมีแนวโน้มที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นอีกเรื่อยๆ จนอาจจะส่งผลเสียต่อการดำรงชีวิตของเราในอนาคตได้ ด้วยเหตุนี้กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำความเย็นจึงมีแนวคิดที่จะเปลี่ยนมาเป็นน้ำยา R32 แทน เพื่อลดการปล่อยสาร CFC ที่จะทำลายชั้นบรรยากาศ ด้วยภาวะโลกร้อนที่สูงขึ้นอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุและหนึ่งในนั้นเราไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่ามีสาเหตุหลักมาจากสารทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศเพราะสารทำความเย็นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังคงมีค่า GWP (Global Warming Potential) ที่ค่อนข้างสูงอยู่พอสมควร ดังนั้น สารทำความเย็นที่เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดภาวะโลกร้อนนี้ได้ก็คือ R32 ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1

คุณสมบัติของสารทำความเย็น

	R32	R410A.	R22
สูตร	CH ₂ F ₂	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	CHCLF ₂
ส่วนประกอบ (สัดส่วนการผสม: wt%)	-----	R32/R125 (50/50 wt%)	-----
จุดเดือด (Celsius)	-51.7	-51.5	-40.8
แรงดัน (คุณสมบัติทางกายภาพ)	3.14	3.07	1.94
ความสามารถในการทำความเย็น (คุณสมบัติทางกายภาพ)	160	141	100
COP:อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (คุณสมบัติทางกายภาพ)	95	91	100
ODP:ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน	0	0	0.055
GWP:ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน	675	2090	1810

จากคุณสมบัติของสารทำความเย็นในตาราง จะเห็นว่าสารทำความเย็น R32 ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน (ODP) และมีค่าที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำกว่าสารทำความเย็นที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (R22, R410A)

อย่างไรก็ตาม น้ำยาเครื่องปรับอากาศ R32 มีข้อเสีย คือติดไฟเล็กน้อย จึงเป็นเหตุให้การผลิตเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำความเย็นต้องหลีกเลี่ยงการใช้ความร้อนในกระบวนการเชื่อมท่อทองแดงหลังจากบรรจุสารทำความเย็น R32 เข้าไปในระบบโดยในที่นี่จะใช้วิธีการเชื่อมแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding) ซึ่งเป็นการใช้คลื่นความถี่สูงสั่นให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน ที่ซึ่งเป็นการเริ่มนำมาใช้กับงานเชื่อมท่อทองแดงและยังไม่มีกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ทำให้การเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding) มีความแข็งแรงที่สุดได้แก่

1. Tube no. : หมายเลขท่อที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บประวัติการเชื่อมท่อทองแดง
2. Tube Diameter (mm.) : ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก
3. Wall Thickness (mm.) : ความหนาของผนังท่อทองแดง
4. t1 (sec) : ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดง จนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน
5. t2 (Sec) : ค่าระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่าง ผิวสัมผัสของท่อทองแดง
6. Air pressure (Bar) : เป็นค่าแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง
7. Amplitude (μm .): เป็นค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด
8. Switch-Height (mm.): ค่าความหนาของชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมตัด

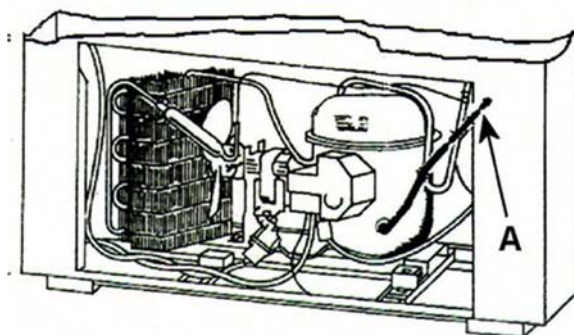
สำหรับค่าช่วงการใช้งานของแต่ละปัจจัย และการกำหนดประเภทของปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษาหาค่าปัจจัยที่ทำให้การเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค มีความแข็งแรงที่สุดดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2

ค่าปัจจัยในการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding)

ปัจจัย	ช่วงของปัจจัย	ชนิดของปัจจัย	หมายเหตุ (Reason)
Tube no.	no.1-no.20	คงที่	เป็นหมายเลขที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลการเชื่อม
Tube Diameter	2.0-12.0 mm.	คงที่	ใช้ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้วหรือ 9.525 มิลลิเมตร
Wall Thickness	0.460 mm.	คงที่	ในที่นี้ใช้ท่อทองแดงที่มีความหนาเฉลี่ย 0.018 นิ้วหรือ 0.460 มิลลิเมตร
t1	0.6-1.2 Sec	ผันแปร	ค่าระยะเวลาที่มีบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน
t2	0.2-0.8Sec	ผันแปร	ค่าระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง
Air pressure	4.0-5.5 Bar	ผันแปร	เป็นค่าแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง
Amplitude	20-30 μ m.	ผันแปร	เป็นค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด
Switch-Height	0.5-0.7 mm.	คงที่	ค่าความหนาของชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมตัดโดยกำหนดจากผู้ผลิตเครื่อง : 2 x wall thickness -((2 x wall thickness) x 25%) และ 2 x wall thickness -((2 x wall thickness) x 45%)

ดังนั้น ผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค มีความแข็งแรงที่สุด โดยดูความสามารถในการทนต่อแรงดันของรอยเชื่อมด้วยวิธีการอัดแรงดันเข้าไปที่ท่อทองแดงหลังจากผ่านการเชื่อมแล้ว ซึ่งบริเวณที่ต้องการเชื่อมของชิ้นงานนั้นจะแสดงดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 บริเวณที่ต้องการเชื่อมของชิ้นงาน (ตามที่ลูกครีซี)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก
2. ศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. เครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก : Kobra EX2
2. ท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้วหรือ 9.525 มิลลิเมตร (Tube diameter) และมีความหนาเฉลี่ย 0.018 นิ้วหรือ 0.460 มิลลิเมตร (Wall thickness)
3. ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก วัดจากความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดงหลังจากเชื่อมแล้ว

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการ

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะแบบอัลตราโซนิก
2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการออกแบบการทดลอง
3. ออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
4. ดำเนินการทดลอง, เก็บผลการทดลอง, ทำการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์จากการทดลอง
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ในอนาคต

1.5 ระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.3

ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะแบบอัลตราโซนิก						
2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการออกแบบการทดลอง						
3. ออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้						
4. ดำเนินการทดลอง เก็บผลการทดลอง ทำการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง						
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ในอนาคต						
6. จัดทำรายงานพร้อมส่งรูปเล่ม						

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก
- ทราบค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก
- เป็นแนวทางในการเลือกค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง
- ได้ ความ รู้ ฐา น ใน การ เชื่อม โลหะ แบบ อัล ต ร้า โซ นิ ค

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบปรับอากาศ

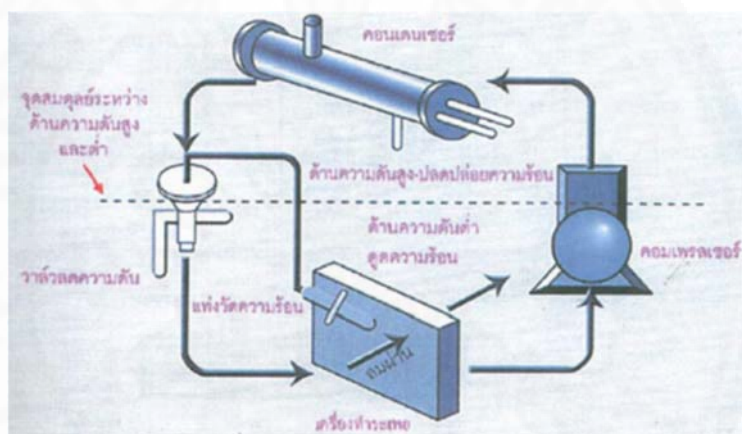
ระบบปรับอากาศหรือบางคนเรียกว่า ระบบปรับอากาศ (Air-conditioning System) ในอดีตระบบนี้ถูกมองว่าเป็นระบบที่ฟุ่มเฟือย อาคารราชการทั่วไปจะมีเฉพาะห้องระดับผู้อำนวยการขึ้นไปเท่านั้นที่จะติดตั้งเครื่องปรับอากาศหรือที่ชาวบ้านเรียกว่า แอร์ หรือเครื่องปรับอากาศ (Air - conditioner) ในอาคารสำนักงานในปัจจุบันเกือบจะทุกแห่งจะติดตั้งเครื่องปรับอากาศกันหมดแล้ว โรงแรมก็มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องปรับอากาศเนื่องจากต้องใช้ต้อนรับชาวต่างประเทศ และมีอิทธิพลทำให้ร้านอาหาร คลับต่างๆ มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศโรงพยาบาลต้องใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการรักษาและป้องกันฝุ่นศูนย์การค้า โรงภาพยนตร์ใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อดึงดูดลูกค้าให้เข้ามาใช้บริการแม้แต่บ้าน คอนโดมิเนียมก็หันมาใช้เครื่องปรับอากาศกันมากเพราะเดี๋ยวนี้เราอยู่กันหนาแน่นกว่าแต่ก่อนซึ่งลมธรรมชาติพึ่งพาไม่ได้ แล้วยังมีเรื่องเสียงและฝุ่นละอองอีก ดังนั้นตลาดเครื่องปรับอากาศจึงขยายตัวเร็วมากและกลายเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญสำหรับอาคารสมัยใหม่ไปแล้ว

2.1.1 หลักการของระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น

ระบบทำความเย็นส่วนมากใช้ในการปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น การไหลเวียนคุณภาพ และความสะอาดของอากาศ รวมถึงการควบคุมเสียงรบกวนเพื่อให้เกิดความสบายและเป็นผลดีต่อสุขภาพของผู้ที่ต้องทำงานในพื้นที่นั้นๆ นอกจากนี้ระบบทำความเย็นยังเข้ามามีความสำคัญในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งที่ต้องการความเย็นสำหรับเก็บรักษาอาหาร ให้มีความสดเป็นเวลานาน การจะสร้างระบบทำความเย็นได้นั้นต้องอาศัยหลักการ 2 อย่าง คือ การเดือดกลายเป็นไอของของเหลว และการถ่ายเทความร้อนออกจากไอของของเหลว ซึ่งของเหลวที่รับความร้อนแล้วเดือดกลายเป็นไอ และถ่ายเทความร้อนออกจากไอให้กลายเป็นของเหลว ของเหลวกลุ่มนี้เรียกว่าสารทำความเย็น (Refrigerant) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับ ในปัจจุบันมีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม

2.1.2 วัฏจักรของระบบทำความเย็น

วัฏจักรการทำความเย็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ ระบบการทำความเย็นแบบกดดันไอหรือแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration Unit) และระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption Refrigeration Unit) ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบการทำความเย็นแบบกดดันไอหรือแบบอัดไอ (Vapor -Compression Refrigeration Unit) ระบบการอัดไอโดยทั่วไปใช้หลักการอัดไอสารทำความเย็นให้มีอุณหภูมิและความดันสูง ก่อนถ่ายโอนความร้อนออก เพื่อให้เกิดการกลั่นตัวแล้วลดความดันให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะอีกครั้งแล้วใช้คอมเพรสเซอร์อัดเพื่อป้อนงานให้กับระบบสำหรับกระบวนการและการนำไปใช้งานกับระบบเครื่องปรับอากาศโดยการนำสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำไปรับความร้อนออกมาจากพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็นดังภาพที่ 2.1

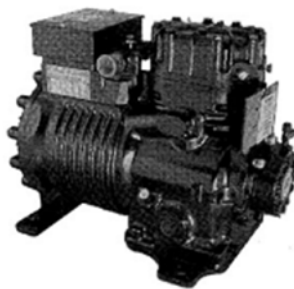


ภาพที่ 2.1 วัฏจักรของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

โดยที่องค์ประกอบหลักของระบบทำความเย็นคือ

2.1.2.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

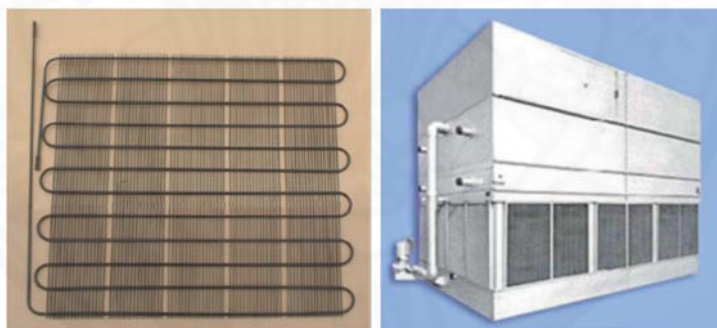
หน้าที่ดูดสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นไอซึ่งสารทำความเย็นจะดูดความร้อนในขณะที่ระเหยในอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) และสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์ให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น ไอของสารทำความเย็นจะอยู่ในสภาพความร้อนยิ่งยวด (Super-Heated Compress Gas) จากนั้นคอมเพรสเซอร์จะส่งจ่ายไอสารทำความเย็นเข้าไปในคอนเดนเซอร์ (Condenser) ต่อไป



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างของคอมเพรสเซอร์ (Compressor)

2.1.2.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

คอนเดนเซอร์ดังภาพที่ 2.3 มีหลักการพื้นฐานการแลกเปลี่ยนความร้อนของ คือ การลดปริมาณไอของสารทำความเย็นลงแล้วทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว นั่นคือ การถ่ายโอนความร้อนออกจากระบบสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นไอและถูกอัดให้มีความร้อนสูงขึ้นในคอมเพรสเซอร์จนมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น สารทำความเย็นจะถูกระบายความร้อนออกที่คอนเดนเซอร์ ความร้อนจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศและสารทำความเย็นที่เป็นไอซูเปอร์ฮีทจะค่อยๆ เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างของคอนเดนเซอร์ (Condenser)

2.1.2.3 อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve)

อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น (Expansion Valve) ดังภาพที่ 2.4 เป็นอุปกรณ์ลดความดันโดยจะทำหน้าที่ควบคุมสารทำความเย็นให้ไหลผ่านไปในอัตราที่เหมาะสม สารทำความเย็นจะกลายเป็นแก๊สในอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) อุปกรณ์ลดความดันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความดัน เพื่อมิให้สารทำความเย็นซึ่งเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นไอมีความดันมากเกินไป เพื่อป้องกันการระเบิด ในทางทฤษฎีอุปกรณ์นี้จะไม่มีการถ่ายเทความร้อนเลย อุปกรณ์ลดความดัน

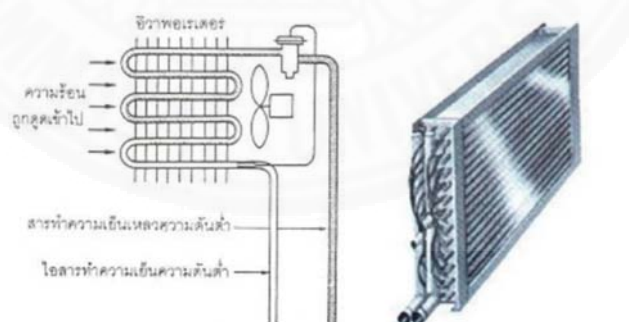
สามารถแบ่งตามวิธีการปรับความดันเป็น 2 แบบ คือ แบบอัตราการไหลไม่คงที่โดยจะใช้ท่อทองแดงขนาดเล็กและแบบอัตราการไหลแปรเปลี่ยน ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลเพื่อให้เหมาะสมกับความดันและการลดอุณหภูมิของสารทำความเย็น



ภาพที่ 2.4 วาล์วลดแรงดันและท่ออุด

2.1.2.4 อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

อีวาพอเรเตอร์หรือที่เรียกกันอีกชื่อว่า เครื่องทำระเหยดังภาพที่ 2.5 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างสารทำความเย็นกับภาระความร้อนในระบบ โดยความร้อนในระบบจะทำให้สารทำความเย็นในสถานะของเหลวเดือดกลายเป็นไอที่ความดันต่ำ แล้วส่งผ่านไปยังด้านดูดของคอมเพรสเซอร์ต่อไป



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างและวงจรของอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

2.2 สารทำความเย็น (Refrigerants)

สารทำความเย็นคือ ของไหลที่สามารถเปลี่ยนสถานะไปตามการใช้งานหรือเมื่อมีการรับความร้อนภายในระบบด้วยการดูดซับหรือการถ่ายความร้อนไปให้หรือออกจากพื้นที่หนึ่งหรือสาร

หนึ่งของไหลหลายชนิดถูกใช้เป็นการทำความเย็นในระยะหลังมานี้ สารใช้กันมากได้แก่ อากาศ น้ำ แอมโมเนีย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และเมทิลคลอไรด์

สารทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้มีอยู่ 3 ประเภท

1. คลอโรฟลูออโรคาร์บอน หรือ CFCS เช่น R-11, R-12 และ R-114
2. ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน หรือ HCFCs เช่น R-22 หรือ R-123
3. ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน หรือ HFCS เช่น R-134a สารทำความเย็นเหล่านี้อยู่ในกลุ่ม

ของฮาโลเจน ซึ่งคือ สารที่ประกอบไปด้วย คลอรีน ฟลูออรีน โบรมีน แอสทาทีน หรือไอโอดีน

สารทำความเย็น เช่น ไดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (R-12), โมโนคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (R-22) และ R-502 ถูกเรียกว่า สารทำความเย็นปฐมภูมิ เนื่องจากในแต่ละขั้นของการเปลี่ยนแปลงสถานะจะมีการดูดซับ หรือคายความร้อนออกจากเนื้อของสาร

สารทำความเย็นปฐมภูมิ เป็นค่าที่ถูกตั้งขึ้นเนื่องจากมีพฤติกรรมที่ตอบสนองโดยตรงต่อพื้นที่หรือสารแม้ว่าจะอยู่ภายในระบบปิด สารทำความเย็นสามารถเย็นตัวลงได้ในระบบปิดโดยอาศัยการควบคุมแรงดัน จากนั้นสารทำความเย็นจะดูดซับความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิ ณ จุดที่ต้องการแต่ถ้าให้สารทำความเย็นดูดซับความร้อนต่อไป ไม่มีการควบคุมแรงดัน แรงดันจะต่ำลงๆ จนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็ง

สารทำความเย็นทุติยภูมิ คือสารซึ่งได้แก่ อากาศ น้ำ หรือน้ำเกลือ ซึ่งถูกทำให้เย็นลงจากระบบสารทำความเย็นปฐมภูมิ สารทำความเย็นถูกแบ่งออกได้หลายกลุ่มโดยที่ The National Refrigeration Safety Code แบ่งสารทำความเย็นออกเป็นสามกลุ่ม

กลุ่ม 1 – สารทำความเย็นที่ปลอดภัยที่สุด ได้แก่ R-12, R-22 และ R-502

กลุ่ม 2 – สารทำความเย็นที่เป็นพิษและบางส่วนติดไฟได้ เช่น R-40 (Methyl Chloride) และ R764(Sulfur Dioxide)

กลุ่ม 3 – สารทำความเย็นที่ติดไฟได้ เช่น R-170 (Ethane) และ R-290 (Propane) R-

12

2.2.1 Dichlorodifluoromethane (CCl₂ F₂)

ไดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (Dichlorodifluoromethane) มีคุณสมบัติ ไม่มีสีและไม่มีกลิ่นที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในความเข้มข้นที่มากขึ้น จะมีกลิ่นคล้ายกับ Carbon Tetrachloride นอกจากนี้ยังไม่เป็นพิษไม่กัดกร่อน ไม่ติดไฟ และมีจุดเดือดที่ -21.7 องศาฟาเรนไฮต์ (-29 องศาเซลเซียส) ที่ความดันบรรยากาศ และรหัสสีของ R-12 คือ สีขาว

2.2.2 R-22: Monochlorodifluoromethane (CHClF₂)

โมโนคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (Monochlorodifluoromethane) คือ สารทำความเย็นสังเคราะห์ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับระบบทำความเย็นที่ต้องการ Evaporating Temperature ต่ำๆ โดยสามารถใช้กับตู้เย็นภายในครัวเรือนและระบบปรับอากาศ R-22 มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน ไม่ติดไฟ และมีจุดเดือดเท่ากับ -41 องศาฟาเรนไฮต์ ที่ความดันบรรยากาศ

R-22 สามารถใช้ได้กับคอมเพรสเซอร์ชนิด โรตารี ลูกสูบ ก้านหอย สกรู หรือชนิดหอยโข่ง โดย R-22 นั้นมักจะมีน้ำหรือความชื้นผสมอยู่ด้วย จำนวนหนึ่งดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ Filter drier ในระบบเพื่อขจัดน้ำออกจากสารทำความเย็นและรหัสสีของ R-22 คือ สีเขียว

2.2.3 R-502: Refrigerant (CHClF₂/CClF₂CF₃)

R-502 คือ สารผสมระหว่าง R-22 และ R-115 ในสัดส่วนร้อยละ 48.8 : 51.2 สารทำความเย็นชนิดนี้เป็นสารทำความเย็นผสม (Blend) ซึ่งมีจุดเดือดที่คงที่สูงสุดและจุดเดือดที่คงที่ต่ำสุดแต่จะแสดงพฤติกรรมเป็นสารผสมเนื้อเดียวโดยที่ R-502 มีคุณสมบัติไม่กัดกร่อน, ไม่ติดไฟ, ไม่เป็นพิษในการใช้งานและมีจุดเดือดเท่ากับ -50 องศาฟาเรนไฮต์ที่ความดันบรรยากาศ สารทำความเย็นชนิดนี้สามารถใช้ได้กับคอมเพรสเซอร์ชนิดลูกสูบเท่านั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการแช่แข็งอาหารเช่น ตู้แช่แบบ walk-in, โรงงานแช่แข็งและแปรรูปอาหารทะเล จะมีรหัสสีของ R-502 คือ สีม่วงอ่อน

2.2.4 R-134a: Tetrafluoroethane (CH₂FCF₃)

R-134a มีความคล้ายคลึงกับ R-22 มากแต่จะแตกต่างกันที่ R-134a ไม่เป็นอันตรายต่อชั้นโอโซนจึงสามารถใช้แทน R-22 ได้ มีคุณสมบัติ คือ ไม่กัดกร่อน ไม่ติดไฟและไม่เป็นพิษ มีจุดเดือดเท่ากับ -15 องศาฟาเรนไฮต์ ที่ความดันบรรยากาศโดยทั่วไปจะใช้ในระบบทำความเย็นที่มีอุณหภูมิปานกลางหรือระบบปรับอากาศ เช่น ระบบปรับอากาศในอาคาร รถยนต์หรือตู้เย็นและรหัสสีของ R-134a คือ สีฟ้าอ่อน

2.2.5 R-22: Monochlorodifluoromethane (CHClF₂)

R-717 เป็นสารทำความเย็นที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม มีจุดเดือดเท่ากับ -28 องศาฟาเรนไฮต์ ที่ความดันบรรยากาศด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้ R-717 มักถูกนำไปใช้กันมากในระบบทำความเย็นที่ต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยที่ความดันใน evaporator ไม่ต้องต่ำกว่าความดันบรรยากาศ คุณสมบัติโดยทั่วไปของ R-717 คือ เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นฉุน มีความเป็นพิษทำลายระบบประสาท หากสัมผัสกับผิวหนังโดยตรงจะทำให้เกิดแผลไหม้และมีความสามารถในการติดไฟได้เล็กน้อย ส่วนรหัสสีสำหรับ R-717 คือสีเงิน

2.2.6 R-125: Pentafluoroethane (CHCF₅)

R-125 คือ สารผสมที่ถูกใช้ในอุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิปานกลาง ซึ่งมีจุดเดือดเท่ากับ -55.3 องศาฟาเรนไฮต์ ที่ความดันบรรยากาศ คุณสมบัติของ R-125 คือ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่กัดกร่อน นอกจากนี้ R-125 สามารถนำไปใช้แทน R-502 ได้อีกด้วย

สารทำความเย็นทั้งหมดที่กล่าวมาต่างมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นจึงมีความสำคัญมากใน การเลือกใช้ให้ตรงกับความต้องการหากมีการใช้งานผิดประเภท แล้วสามารถทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงได้ หรืออาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ

2.2.7 สารทำความเย็นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.7.1 Ozone Depletion Potential: ODP

ODP เป็นตัวเลขที่แสดงระดับในการทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ของสารทำความเย็น ชนิดต่างๆ โดยใช้ค่าของ R-11 เป็นมาตรฐาน คือ กำหนดค่า ODP ของ R-11 =1 ส่วนสารทำความเย็นอื่นๆ มีค่า ODP ซึ่งเทียบกับ R-11 ได้ เช่น R-12 (ODP=1), R-22 (ODP=0.055) และ R-134a (ODP=0) สารทำความเย็นที่ใช้ควรมีค่า ODP เป็นศูนย์ นั่นคือต้องเป็นสารที่ไม่ทำลายโอโซน ซึ่ง สารทำความเย็นกลุ่ม CFC ซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบนั้นจะมีสมบัติในการทำลายโอโซน โดยคลอรีนที่ถูกปล่อยออกมาจะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ ออกซิเจน และคลอรีนมอนอกไซด์ (ClO)

2.2.7.2 Global Warming Potential: GWP

GWP เป็นตัวเลขที่แสดงระดับการทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยกำหนดค่า GWP ของ R-11 เป็นมาตรฐาน คือ 1.0 ส่วนสารทำความเย็นอื่นมีค่าเทียบกับ R-11 ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

แสดงค่า ODP และ GWP ของน้ำยาชนิดต่างๆ

Environmental Factor for Refrigerants		
Refrigerants	ODP	GWP
CFC-11	1.000	1.00
12	1.000	3.00
113	1.07	1.40
114	.800	3.90
115	.520	7.50
500	.740	2.28
502	.290	5.00
HCFC-22	.055	.36
123	.020	.02
124	.022	.10
HFC -143a	0	.76
125	0	.84
134a	0	.25
32	0	.13
152a	0	.03

2.2.8 สารทำความเย็นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ความเป็นพิษ (toxicity) จัดระบบความเป็นพิษของสารทำความเย็นเป็น 2 ระดับ คือ

Class A = ระดับความเป็นพิษต่ำ (Low toxicity)

Class B = ระดับความเป็นพิษสูง (High toxicity)

ความสามารถในการติดไฟ (flammability) จัดระดับความสามารถในการติดไฟของสารทำความเย็นออกเป็น 3 กลุ่ม เมื่อนำไปใช้งาน คือ

Group 1 = ไม่ติดไฟ (No flammability)

Group 2 = ติดไฟได้ (Low flammability)

Group 3 = ติดไฟได้ง่าย (High flammability)

เมื่อนำค่าความเป็นพิษและความสามารถในการติดไฟมาจัดรวมเป็นระดับความปลอดภัยของสารทำความเย็น จะจัดเป็นระดับ A1 , A2 , A3 , B1 , B2 และ B3 ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

การจัดกลุ่มของสารทำความเย็นตามระดับความปลอดภัย

Increasing Flammability	3 Higher Flammability	A3	R-600a R-290	B3	R-1140
	2 Lower Flammability	A2	R-32 R-143a R-152a	B2	R-717
	1 No Flame Propagation	A1	R-11 R-12 R-22 R-125 R-134a	B1	R-123
		A	Lower Toxicity	B	Higher Toxicity
			Increasing Toxicity		

2.3 ชนิดของเครื่องปรับอากาศ

เครื่องปรับอากาศมีวิธีในการแบ่งประเภทออกได้หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่นิยมใช้แบ่งประเภท ของเครื่องปรับอากาศ ได้แก่ การแบ่งตามลักษณะการใช้งาน การแบ่งตามลักษณะการระบาย ความร้อนของคอนเดนเซอร์ การแบ่งตามชนิดของคอมเพรสเซอร์ และการแบ่งตามขนาดซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมมากที่สุด

2.3.1 เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก

เครื่องปรับอากาศขนาดเล็กเป็นเครื่องปรับอากาศที่เราเห็นใช้กันอยู่ตามบ้านเรือน และสำนักงาน ขนาดเล็ก เครื่องปรับอากาศขนาดเล็กมักเป็นเครื่องเดี่ยวๆ จึงมักเรียกว่า Unitary เครื่องแบบนี้ สามารถปรับอากาศได้โดยไม่ต้องต่อพ่วงอุปกรณ์อื่น เช่น คุลลิ่งทาวเวอร์ เครื่องเป่าลม ท่อลม เป็นต้น

2.3.2 เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่าง (Window)

เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่างจะรวมอุปกรณ์ทั้ง 4 อย่างเข้าไว้ในตัวเครื่องเดียวกัน การติดตั้งจึง ต้องติดตั้งโดยให้ด้านหนึ่งอยู่ในห้อง ส่วนอีกด้านอยู่ภายนอกเพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน ฉะนั้นในการติดตั้งจึงต้องติดตั้งบริเวณช่องหน้าต่าง หรือเจาะช่องที่ผนังด้านที่แข็งแรง ในกรณี ที่เป็นบ้านไม้ก็อาจมีเสียงดัง ข้อดีของเครื่องปรับอากาศประเภทนี้คือประหยัดเนื้อที่ ไม่จำเป็นต้อง มีที่สำหรับตั้งชุดคอนเดนซิงก์ และความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศชนิดนี้ จะสูงกว่าแบบอื่นๆ เพราะทุกอย่างประกอบเสร็จจากโรงงานไม่ขึ้นกับการติดตั้ง ดังนั้น การสูญเสีย ประสิทธิภาพในการ ทำความเย็นจึงมีน้อยมาก

2.3.3 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type)

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนจะแยกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนทำความเย็นที่เรียกว่า แฟนคอยล์ยูนิต (Fan Coil Unit) จะเป็นส่วนที่อยู่ในห้อง ซึ่งภายในประกอบด้วย อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator Coil) และอุปกรณ์ลดความดัน (บางรุ่นจะติดตั้งไว้ในคอนเดนซิงก์) อีกส่วนหนึ่งคือชุดคอนเดนซิงก์ (Condensing Unit) จะตั้งอยู่ภายนอกประกอบด้วยคอนเดนเซอร์คอยล์ (Condenser Coil) และ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทั้งสองส่วนนี้จะต่อถึงกันโดยระบบท่อน้ำยา เครื่องปรับอากาศ แบบแยกส่วนมีข้อดีคือส่วนที่ปรับอากาศจะเงียบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนสามารถแบ่ง ประเภทตามลักษณะการติดตั้งแฟนคอยล์ยูนิตได้ดังนี้

แบบตั้งพื้น : จุดเด่นของการติดตั้งลักษณะนี้คือสะดวกต่อการบำรุงรักษาและซ่อมแซม แต่ฝุ่นละอองในห้องอาจเข้าเครื่องได้ง่ายเป็น ผลให้ต้องทำความสะอาดไส้กรองบ่อยๆ และ ยังเสียพื้นที่ใช้สอยไปส่วนหนึ่งด้วย

แบบติดผนังต่ำ : ลักษณะนี้คล้ายกับแบบแรกแต่ต่างกันตรงที่ฝุ่นละอองจะเข้าเครื่อง น้อยกว่า

แบบตีตมผนัง : จะประหยัดเนื้อที่ดูแลรักษาง่าย แต่จะยากกว่าแบบตั้งพื้น การติดตั้งส่วนใหญ่ จำกัดกับสถานที่ซึ่งต้องเป็นผนังที่ติดกับด้านนอก และชุดคอนกรีตคิงก์ ยูโกลักๆ กับชุดระบายความร้อนจากคอยล์

แบบแขวนใต้เพดาน : ประหยัดเนื้อที่มากที่สุด ระยะลมเป่าไกลกว่า ฝุ่นละอองเข้าเครื่องยาก และการ ระบายลมดี แต่การบำรุงรักษา ไม่สะดวกนัก

2.3.4 เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่

เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่เป็นเครื่องปรับอากาศที่ใช้กันในอุตสาหกรรมและอาคารขนาดใหญ่ เช่น โรงงาน โรงแรม ห้างสรรพสินค้า โรงพยาบาล เป็นต้นเครื่องปรับอากาศประเภทนี้มักประกอบด้วยวงจรทำความเย็น 2 ส่วน จึงต้องมีอุปกรณ์มาต่อพ่วงเพื่อให้ระบบสมบูรณ์ เครื่องปรับอากาศแบบนี้จะมีราคาแพงแต่ประสิทธิภาพสูง

2.4 การเชื่อม (Welding)

กระบวนการต่อวัสดุ คือ เป็นการทำให้ชิ้นงานตั้งแต่สองส่วนต่อเข้าด้วยกัน โดยอาศัยการให้ความร้อนในการเชื่อมประสาน หรืออาจใช้ตัวประสานเช่นในกลุ่มกาว หรือแม้แต่ใช้อุปกรณ์ทางกลเช่นหมุด มาใช้ในการจับยึดต่อประสาน โดยกระบวนการต่อวัสดุ สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลัก คือ

1. การเชื่อม (Welding)
2. การบัดกรี (Brazing and Soldering: บัดกรีแข็งและบัดกร้อ่อน)
3. การใช้ตัวประสาน (Adhesive bonding)
4. การต่อยึดทางกล (Fasteners)

ในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการต่อวัสดุแบบการเชื่อมเท่านั้น

2.4.1 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อมเป็นกระบวนการที่ทำให้ตัวชิ้นงานหรืออาจจะเป็นวัสดุประสาน ณ รอยต่อของงานเชื่อมเพื่อให้ตัวชิ้นงานนั้นติดกันที่บัพบอยในกระบวนการผลิตทั่วไปนั้น การเชื่อมอาศัยอุณหภูมิ (ในบางประเภทจะใช้ความดันร่วมด้วย) มาใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายที่บริเวณจุดที่จะเชื่อมโดยทั่วไปจะสามารถแบ่งการเชื่อมออกเป็นได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.4.1.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion)

ใช้ความร้อนในการทำให้วัสดุหลอมละลายที่บริเวณจุดเชื่อมซึ่งทำให้เกิดการต่อประสานเมื่อเย็นตัวลงลักษณะงานเชื่อมที่มีการหลอมละลาย เกิดขึ้นกับชิ้นวัสดุบริเวณที่จะเชื่อมนั้น มักนิยมเติมวัสดุประสาน หรือ Filler metal เพื่อเป็นการเพิ่มเนื้อประสานและเพิ่มความแข็งแรงกับรอยเชื่อมนั้นได้มีหลายประเภทเช่น

1. Oxyfuel gas welding (OFW): เป็นการหลอมติดกันของชิ้นงานโดยใช้พลังงานจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงด้วยแก๊ส
2. Arc welding (AW): เป็นการหลอมติดกันของชิ้นงานโดยใช้พลังงานจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้า
3. Resistance welding (RW): เป็นการหลอมติดกันของชิ้นงานโดยใช้พลังงานจากความต้านทานไฟฟ้าบริเวณต่อชนของชิ้นงานภายใต้แรงกด
4. Unique processes: เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้พลังงานจากแหล่งอื่น เช่น จากเลเซอร์ ลำแสงอิเล็กตรอน

2.4.1.2 การเชื่อมแบบไม่เปลี่ยนสถานะ (Solid state)

ใช้ความดันและความร้อนที่จะทำให้เกิดการเชื่อมประสานโดยไม่มีการหลอมละลายของวัสดุ เป็นการเชื่อมที่ทำให้ชิ้นงานติดกันโดยไม่ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อวัสดุ แต่การเชื่อมจะได้รับแรงกดหรือทั้ง แรงกด หรือความดัน และพลังงานความร้อนควบคู่กันไป (ในกรณีใช้ความร้อน อุณหภูมิยังไม่ถึงจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน) มีหลายประเภทเช่น

1. Friction welding (FRW): เป็นการเชื่อมกันที่เกิดจากการกดผิวสัมผัสของชิ้นงานเข้าด้วยกันเพียงอย่างเดียว
2. Diffusion welding (DFW): เป็นการเชื่อมกันที่เกิดจากการกดผิวสัมผัสของชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิและบรรยากาศที่เหมาะสม สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้
3. Ultrasonic welding (USW): เป็นการเชื่อมกันของชิ้นงานที่อาศัยระบบการสั่น แบบ ultrasonic ที่ทำให้ผิวชิ้นงานประสานติดกันได้ (ultrasonic: ความถี่เหนือเสียง) เช่นการเชื่อมท่อแดงดังที่ได้ทำการศึกษา

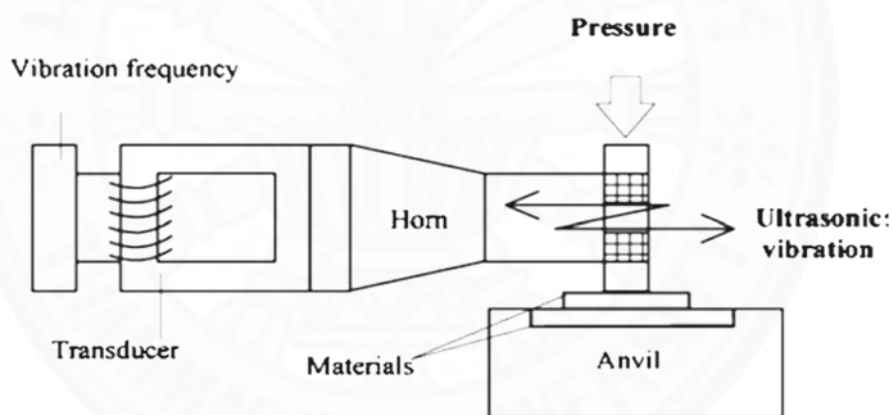
2.4.2 หลักของการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิก

การเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิกเป็นหนึ่งในวิธีการล่าสุดของเทคโนโลยีการต่อวัสดุ ,กระบวนการเชื่อมตอนนี้จะใช้การสั่นที่ความถี่สูงผสมผสานไปกับแรงกดเพื่อทำให้วัสดุ 2 ชิ้นติดเข้าด้วยกันอย่างรวดเร็วและปลอดภัย ซึ่งปราศจากการก่อให้เกิดปริมาณความร้อนในระดับที่เป็น

อันตรายต่อผู้ใช้งานทำให้การเชื่อมโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิกมีข้อได้เปรียบกว่า การเชื่อมโลหะด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้เทคนิคด้านความร้อนเป็นพื้นฐานหลัก

วิธีการนี้ยังสามารถเชื่อมต่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน เช่น การเชื่อมวัสดุที่อยู่ใกล้ชิดกับวัสดุที่อ่อนไหว ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือพลาสติก ไม่ต้องใช้วัสดุสิ้นเปลืองเพื่อช่วยในการเชื่อมต่อโลหะ เช่น ตะกั่ว ฟลักซ์ และใช้พลังงานต่ำกว่าการเชื่อมโลหะด้วยวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้ การเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิกยังมีข้อจำกัดในการเชื่อมอยู่บ้าง คือ วัสดุที่นำมาเชื่อมต่อกันส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่อ่อนนุ่ม พลาสติกที่บางๆ ที่มีขนาดเล็ก เช่น สายไฟ และท่อทองแดง เป็นต้น

ในกระบวนการการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิกเริ่มต้นจากการนำชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมมาวางเข้าด้วยกันในบริเวณชุดวางชิ้นงาน (Anvil) จากนั้นระบบจะเริ่มทำการกดที่ชิ้นงานเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นสัมผัสกันและหัวสั่น (Sonotrode) จะสั่นด้วยความถี่สูงประมาณ 20,000 เฮิร์ต ถึง 40,000 เฮิร์ต เป็นผลทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกันในที่สุดดังแสดงภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิก

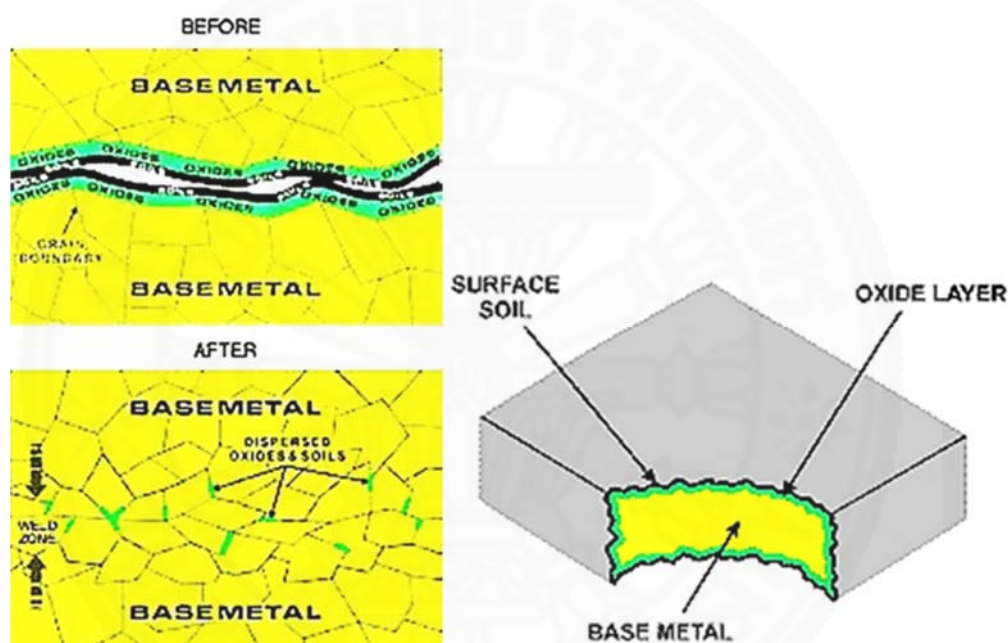
ระบบของเชื่อมต่อโลหะด้วยวิธีอัลตราโซนิกนั้นใช้หลักการขัดสีของชิ้นงานเข้าด้วยกันประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 4 ส่วน คือ

1. Anvil เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการรองรับชิ้นงานและยึดให้ชิ้นงานอยู่นิ่งๆ ในขณะที่มีการถูไปมา
2. Ultrasonic transducer เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมาที่ความถี่ประมาณ 20,000 เฮิร์ต

3. Booster เป็นตัวขยายแอมพลิจูดของความถี่เพื่อให้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้ชิ้นมีการขจัดผิวไปมา

4. Horn /Sonotrode เป็นชิ้นส่วนที่รับพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมาแล้วถูกไปมาที่ชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน

ในระหว่างการขัดสีกันที่ผิวของชิ้นงานที่ปกคลุมไปด้วยสิ่งปนเปื้อน เช่น คราบ น้ำมัน สนิม จะถูกขัดสีจนหมดจนเนื้อโลหะที่บริสุทธิ์สัมผัสโดยแท้จริงทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกันจนเกิดการเชื่อมต่อกันของวัสดุโดยใช้เวลาน้อยมากๆ ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเชื่อมติดกันของวัสดุ

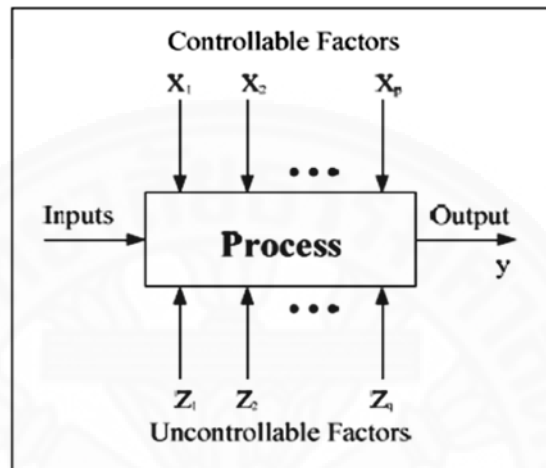
2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

2.5.1 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบเพื่อตรวจสอบดูว่าปัจจัย (Factor) ใด หรือตัวแปรนำเข้า (Input variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ (Output response) ดังภาพที่ 2.8 โดยปัจจัยจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้น ได้ในกระบวนการ ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่น ละออง ความชื้น สัมผัส หรือส่วนของอุปกรณ์ที่ยากต่อการควบคุมเนื่องจากต้องใช้ความระมัดระวังสูง หรือเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอ เป็นต้น



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

การออกแบบการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่นั้น ต้องทำการเปลี่ยนแปลงปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งถ้าปัจจัยเปลี่ยนก็จะทำให้ผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 อิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด
2. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด
3. กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y มีค่าการแปรปรวนต่ำที่สุด
4. กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) Z_1, Z_2, \dots, Z_q มีค่าน้อยที่สุด

2.5.3 คำจำกัดความ

1. ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ตัวผลลัพธ์ (Output) ที่ต้องการควบคุมให้เป็นตามมาตรฐานที่ต้องการ
2. ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้
3. ระดับปัจจัย (Level of factors) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง
4. วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้น
5. จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs of Experimental Runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง

2.5.4 หลักพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง ดังนี้

1. เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูล เพื่อกำจัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออก ซึ่งมีคุณสมบัติ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องยิ่งขึ้น
2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) การทำแบบสุ่ม หมายถึง การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน โดยการทำการทดลองแบบสุ่มนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 วิธี
 - ก. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomization)
 - ข. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization)

ค. การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomization within blocks)

3. การบล็อก (Blocking) หมายถึง การจัดกลุ่มเก็บข้อมูลเป็นช่วง ๆ เพื่อลดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องทำเสมอไป

2.5.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การนิยามปัญหา เป็นการกำหนดปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข ซึ่งจะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ในการทดลอง

2. การเลือกปัจจัยที่จะทำการแปรค่าในการทดลอง และจำนวนระดับที่ใช้ในการทดลอง คือ ระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

ก. แบบกำหนด หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

ข. แบบสุ่ม หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

ค. แบบผสม หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

3. กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรผลลัพธ์ (Response Variables) ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ทำการศึกษาอยู่ และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง ซึ่งมักใช้เป็น ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

4. การเลือกแบบแผนการทดลอง การเลือกแบบการทดลองจะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของจำนวนปัจจัยที่ใช้

ก. กรณีสนใจศึกษาปัจจัยเดียว แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือการจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA)

ข. กรณีศึกษาสองปัจจัยโดยไม่สนใจผลกระทบร่วม (Interaction) แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือการจำแนกสองทาง (Two-Way ANOVA) หรือการออกแบบแบบสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Complete Randomized Design)

ค. กรณีศึกษาสองปัจจัย หรือมากกว่า และสนใจผลกระทบร่วม แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือ การทดลองแฟคทอเรียล (Factorial Experiments)

5. การดำเนินการทดลอง และการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูล หรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และพยายามลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Reduction of Error) นอกจากนี้ต้องคำนึงถึง การทดลองต้องไม่มีอคติ วิเคราะห์ตรงประเด็น (Relevant) เลือกตัวแปรที่เหมาะสมและสมเหตุสมผล (Validity) การทดลองต้องมีผลที่ชัดเจนแม่นยำ (Precise) และต้องทำได้จริงในทางปฏิบัติ (Practicable)

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลจากการทดลอง โดยเน้นหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์ด้วยกราฟค่าเฉลี่ย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เกิดขึ้นมาจากการทดลอง

7. การสรุปผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและข้อเสนอแนะ เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง

2.5.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการทดลองนั้น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลอง ควรเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลอง ซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้นไม่สามารถประกันได้ว่า จะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่

4. ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำ ๆ หลายครั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้ ถูกต้อง

2.5.7 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory Data Analysis; EDA) เป็นกระบวนการทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) อาศัยหลักการนำกราฟเข้ามาช่วยในการนำเสนอข้อมูล เพื่อให้ผู้วิเคราะห์ข้อมูล หรือผู้ทดลองสามารถอธิบายข้อสรุปเกี่ยวกับข้อมูลระบบได้โดยอาศัยหลักการพิจารณาเบื้องต้นดังนี้ คือ

ก. ตำแหน่งของระบบ (Location Effect) หรือค่ากลางของข้อมูล โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบว่าตำแหน่งกลางของข้อมูลอยู่ ณ ที่ใด และเป็นไปตามเป้าหมายหรือมาตรฐานที่ต้องการหรือไม่

ข. การกระจาย (Dispersion Effect) หรือความแตกต่างในระบบ โดยพิจารณาได้จากค่าพิสัยของข้อมูล เพื่อสรุปลักษณะการกระจายภายในระบบนั้น ๆ ในเบื้องต้น หรือเปรียบเทียบกับระบบอื่นเมื่อเงื่อนไขระบบแตกต่างออกไป

ค. รูปร่างลักษณะการแจกแจงของระบบ (Shape) โดยทั่วไปจะพิจารณาว่าข้อมูลมีความสมมาตรหรือไม่ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน (Inference Statistics) เช่น การทดสอบสมมติฐาน การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์การถดถอยมีข้อสมมติที่สำคัญบนพื้นฐานการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงที่มีลักษณะสมมาตร

ง. ข้อมูลที่ผิดปกติ (Unusual Observations or Outliers) ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่าของข้อมูลว่ามีค่าที่แตกต่างกันมากเกินไปหรือไม่ (ค่าน้อยมากๆ หรือค่าสูงมากๆ) ค่าที่แตกต่างกลุ่มออกไป และในบางครั้งควรทำการตัดทิ้งก่อนทำการวิเคราะห์ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการเก็บรวบรวมข้อมูลนั้น เช่น ต้องการประมาณค่าเฉลี่ยควรจะต้องตัดข้อมูลที่ผิดปกติออก เนื่องจากมีผลกระทบอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ตำแหน่ง หรือค่าเฉลี่ยของระบบ

2.6 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing)

สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคหรือข้อความที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นซึ่งอาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ข้อความหรือประโยคดังกล่าวนี้ต้องระบุกลุ่มของประชากรที่เกี่ยวข้องมาด้วยกลุ่มหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่มก็ได้

สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติเราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มีความแตกต่างกัน ภาษานักวิจัยเรียกกันว่าโนลไฮโปทีสิส (Null Hypothesis) หรือสมมติฐานหลัก แทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกันเรียกว่า อัลเทอเนทีฟไฮโปทีสิส (Alternative Hypothesis) หรือสมมติฐานรอง แทนค่าด้วยสัญลักษณ์ H_1

2.6.1 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu = \mu_0$ และกำหนด H_1 ดังนี้คือ
 $H_1 : \mu < \mu_0$ หรือ $H_1 : \mu > \mu_0$ โดยที่
 μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

2.6.2 การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu = \mu_0$ และกำหนด H_1 ดังนี้คือ
 $H_1 : \mu \neq \mu_0$ โดยที่
 μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยที่อ้างอิง
 หรือเป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$ และกำหนด H_1 ดังนี้คือ
 $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ (i, j) โดยที่
 μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 i, j คือ 1, 2, ..., a

ในการทดสอบสมมติฐาน จะอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ H_0 นอกจากนั้นยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

การทดสอบสมมติฐานจะเกิดลักษณะของความผิดพลาดในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน ซึ่งความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ขณะทดสอบสมมติฐาน ถ้าหากค่า H_0 ถูกปฏิเสธ ทั้งๆที่ H_0 ถูกต้องจะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 ขึ้น แต่ถ้าหาก H_0 ไม่ถูกปฏิเสธทั้งๆที่ H_0 นั้นไม่ถูกต้อง ความผิดพลาดประเภทที่ 2 ก็เกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ทั้ง 2 ประเภทก่อให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษคือ α และ β

$$\alpha = P(\text{type I error}) = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is true})$$

β = P (type II error) = P (fail to reject H_0 / H_0 is false)

โดยที่

α หมายถึง ความเสี่ยงในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

β หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริง

และจากความเสี่ยงของทั้งสองแบบนี้เองจึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองไว้เพื่อให้มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงในการยอมรับข้อมูลตามที่กำหนดไว้ และในการวิเคราะห์ก็มักจะกำหนดให้ค่าของ α มีค่าคงที่และค่าของ β ให้มีค่าน้อยที่สุด

2.6.3 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$

H_1 : $\mu_i \neq \mu_j$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ (i, j)

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ τ เมื่อ τ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$

H_1 : $\tau_i \neq 0$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า i

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ_τ^2) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : $\sigma_\tau^2 = 0$

H_1 : $\sigma_\tau^2 > 0$

3. การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effects Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองมีลักษณะเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Levels) และแบบสุ่ม (Random Levels) รวมกัน

อยู่ จะต้องใช้การทั้งสองสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้น ๆ

2.6.4 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เราสามารถบอกได้ว่า $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คำกล่าวสรุปมักจะไม่ใช่เพียงพอ เพราะไม่ได้บอกให้ผู้ตัดสินใจรู้ว่าค่าทดสอบทางสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ที่ใดบนพื้นที่วิกฤต ยิ่งกว่านั้นการหาผลลัพธ์โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นที่พึงพอใจ เนื่องจากผู้ทำการทดลองบางคนอาจไม่ต้องการใช้ระดับความเสี่ยงที่ $\alpha = 0.05$

วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากกว่าค่าสังเกต ในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

ปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้ค่า P-Value แล้วผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมามีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.6.5 ช่วงความเชื่อมั่น

ถึงแม้ว่าการทดสอบสมมติฐานจะเป็นวิธีที่ดี แต่บางครั้งไม่ได้บอกถึงรายละเอียดทั้งหมด ดังนั้น จึงเป็นการดีกว่าที่จะมีการกำหนดช่วงของค่าของพารามิเตอร์ ช่วงที่พูดถึงก็คือ “ช่วงความเชื่อมั่น” ในทางวิศวกรรมมีหลายครั้งที่ผู้ทดลองทราบแล้วว่า μ_1 และ μ_2 แตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบสมมติฐาน $\mu_1 - \mu_2$ จึงน่าสนใจเพียงเล็กน้อย แต่ผู้ทดสอบจะให้ความสนใจกับช่วงของความเชื่อมั่นของความต่างระหว่าง $\mu_1 - \mu_2$ มากกว่า

ในการนิยามหรือกำหนดช่วงความเชื่อมั่น กำหนดให้ α เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และเพื่อที่จะหาค่า α นี้จำเป็นต้องหาค่าสถิติ L (Lower) และ U (Upper) ที่จะทำให้สมการข้างล่างเป็นจริง

$$P(L \leq \alpha \leq U) = 1 - \alpha \text{ และช่วง } L \leq \alpha \leq U$$

เรียกว่า “ช่วงความเชื่อมั่น $100(1 - \alpha) \%$ ” สำหรับพารามิเตอร์ α ความหมายของช่วงนี้คือ ในการสุ่มตัวอย่างซ้ำ ๆ กัน แล้วนำมาสร้างช่วงความเชื่อมั่นลักษณะนี้ขึ้นมาเป็นจำนวนมากจะพบว่า $100(1 - \alpha) \%$ ของช่วงความเชื่อมั่นนี้ จะมีค่าที่แท้จริงของ α อยู่ค่าสถิติ L และ U เรียกว่า “ค่าล่างและค่าบนของขีดจำกัดความเชื่อมั่น” ตามลำดับ และ $1 - \alpha$ เรียก “สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น” ถ้า $\alpha = 0.05$ เราจะเรียกว่าเป็น ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ α

ในการหาช่วงความเชื่อมั่น $100(1 - \alpha) \%$ ของค่าความแตกต่างที่แท้จริงของ $\mu_1 - \mu_2$ ค่าของช่วงความเชื่อมั่นสามารถหาได้จากสถิติ แบ่งเป็น กรณี $\sigma_{12} \neq \sigma_{22}$ และ กรณี $\sigma_{12} = \sigma_{22}$ ทราบค่า

ถ้าหากประชากรทั้งคู่เป็นแบบปกติหรือมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้น Central Limit Theorem สามารถนำมาใช้ได้ การแจกแจงของ Z_0 คือ $N(0,1)$ ถ้าสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้นพื้นที่วิกฤตควรจะหาโดยการแจกแจงปกติมากกว่าการแจกแจง t และจะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ โดย $Z_{\alpha/2}$ คือ ค่าบนของ $\alpha / 2 \%$ ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน

2.7 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผันความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้น ไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลาย ๆ ค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริง ๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่าง ๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้น ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่า

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมันสำคัญหรือไม่ เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบางที่ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่มรูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E$$

โดยที่

SS_T คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SS_{Tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS - Mean Square) โดยที่ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองสามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS / DF$$

โดยที่

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ (Degree of freedom)

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่ใช้นามาเปรียบเทียบค่าความแปรผันคือ

$$F = MS_{Tr} / MS_E$$

โดยที่

MS_{Tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การเปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, v_1, v_2}

ถ้า $F > F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ

α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

v_1 คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

v_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) หรือการจำแนกทางเดียว (One Way ANOVA) สามารถเขียนตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองและค่าคาดคะเนของค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง $E(MS)$ ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (D.F.)	ผลบวกกำลังสอง (Sum Square)	ค่าเฉลี่ย SS (Mean Square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติงาน	a-1	SS_A	$MS_A = SS_A / (a-1)$	$F = MS_A / MS_E$
ความผิดพลาด	N-a	$SS_E = SS_T - SS_A$	$MS_E = SS_E / (N-a)$	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	N-1	SS_T		

2.7.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

ในการพิจารณาระดับต่าง ๆ ของตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อความเปลี่ยนแปลงของข้อมูล หรือผลตอบสนองที่ได้รับจากการทดลองด้วยตัวแบบสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) เพื่อการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อต้องการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานจริงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบของข้อมูลที่สมมติขึ้น ว่า มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยข้อสมมติสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวว่า หากค่าความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนในการทดลองมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ มีความถูกต้องตรงตามข้อสมมติ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ ในการตรวจสอบข้อสมมติทางด้านการกระจายแบบปกติของข้อมูล ที่ได้รับจากการทดลองสามารถทำได้โดยใช้การพล็อตความน่าจะเป็น

เป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าความผิดพลาด (Residuals) ถ้าข้อสมมติมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2. การตรวจสอบการแจกแจงที่เป็นอิสระต่อกัน การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกัน เป็นการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (Residuals) กับ ลำดับที่ของการทดลองจากการทดลองสุ่ม ค่าความผิดพลาดจึงมีทั้งค่าลบและค่าบวก หากเงื่อนไขของข้อสมมติของความเป็นอิสระต่อกันเป็นจริง ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากเกิดลักษณะของ แนวโน้มในทิศทางเดียวไม่ว่าจะเป็นเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น ย่อมแสดงว่าข้อสมมติดังกล่าวเกิดความผิดพลาดขึ้น การออกแบบที่ใช้ในการทดลองอย่างสุ่มที่เหมาะสมจะมีส่วนสำคัญในการทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีลักษณะตรงตามข้อสมมติ

3. การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ เป็นการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (Residuals) กับค่าประมาณการทดลองที่ระดับ i ใดๆ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายเมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณการทดลองที่ระดับต่าง ๆ อย่างไรก็ตามหากเกิดแนวโน้มของรูปทรง เช่น ลักษณะลำโพง ย่อมแสดงว่าข้อสมมติดังกล่าวเกิดความผิดพลาดขึ้น

2.8 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.8.1 การนิยามประชากร

ในการตัดสินใจทางสถิติ จะเรียกการรวบรวม (Collection) ของสิ่งที่ต้องการจะตัดสินใจนั้นว่า ประชากร (Population) และเรียกส่วนหนึ่งของประชากรที่ทำการศึกษาว่า สิ่งตัวอย่าง (Sample) โดยจะเรียกลักษณะสมบัติเชิงตัวเลข (Numerical Characteristic) ของประชากรนั้นว่า พารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งโดยปกติให้แทนด้วยอักษรกรีก อาทิ μ , σ และเรียกลักษณะเชิงตัวเลขของสิ่งตัวอย่างว่า ตัวสถิติ (Statistic) ซึ่งโดยปกติจะให้แทนด้วยอักษรละติน อาทิ เช่น X , SD

พารามิเตอร์มี 2 ประเภทคือ แบบแอตทริบิวต์ (Attributes) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่ไม่สามารถวัดได้ เช่น ความสวยงาม ความเรียบร้อย สี ฯลฯ และแบบผันแปร (Variable) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่สามารถวัดได้และมีค่าผันแปรไป แม้ว่าจะวัดได้อย่างถูกต้อง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางค่าใช้จ่าย แรงดึง ฯลฯ

ในทางวิศวกรรมอาจนิยาม “ประชากร” ได้ว่าเป็นการรวบรวมสิ่งที่สนใจที่เป็นไปได้ทั้งหมดทั้งกรณีอาจมีรูปร่าง (Tangible) หรือไม่มีรูปร่าง (Intangible) ก็ได้เช่น กระบวนการผลิตเครื่องจักร ลอต (Lot) วัตถุดิบหรือกระบวนการบริการ เป็นต้น

ในการนิยามประชากรเพื่อการศึกษาและตัดสินใจ จึงควรเริ่มต้นจากการกำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน แล้วอาศัยกลวิธีการของศึกษาวิธีการของวิศวกรรมอุตสาหการในการจัดการมาตรฐานการปฏิบัติการดังกล่าว โดยการนิยามประชากรนี้ให้ทำการระบุด้วยว่า มีตัวแปรอะไรที่สามารถควบคุมได้ และมีตัวแปรอะไรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งนี้การนิยามประชากรดังกล่าวจะต้องได้จากการศึกษาและสังเกตจากสถานที่จริง ของจริง และภายใต้สภาพแวดล้อมจริงหรืออาจเรียกว่าหลัก 3 จริง โดยไม่ควรนิยามจากความเข้าใจทางทฤษฎีหรือจากแบบจำลอง (Model) หรือจากแบบเขียน (Drawing) เท่านั้นเพราะจะทำให้การนิยามประชากรเป็นไปอย่างไม่ถูกต้อง อาทิ อุณหภูมิห้อง อาจหมายถึงสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้สำหรับกระบวนการต่างๆ ไป แต่สำหรับอุตสาหกรรมในห้องสะอาด (Clean Room) แล้วจะถือว่าอุณหภูมิห้องเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ เป็นต้น

ในการนิยามตัวแบบของประชากรที่ไม่ถูกต้องจากการขาดทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) เนื่องจากการขาดการสังเกตหรือขาดความรู้ ความเข้าใจทางด้านวิศวกรรม เทคโนโลยีและวิศวกรรมการบริหารนั้น จะมีผลทำให้ได้ข้อมูลที่เกิดจากภาวะที่มีได้ควบคุมตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ทำให้ข้อมูลมีความผันแปรผิดธรรมชาติไปไม่สามารถวิเคราะห์ทางสถิติได้โดย Dr.Walter A. Shewhart เรียกความผันแปรเนื่องจากสาเหตุที่มีได้ควบคุมสิ่งที่สามารถควบคุมได้นี้ว่า สาเหตุจากความผิดพลาด (Assignable Cause) และ Dr.Edwards Deming เรียกสาเหตุของความผันแปรประเภทนี้ว่า สาเหตุไม่ธรรมดา (Special Cause) อาจสรุปได้ว่า ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติจะทำให้ได้ตัวแบบที่สามารถคาดการณ์ได้ ในขณะที่ความผันแปรจากสาเหตุผิดพลาด จะทำให้ได้ตัวแบบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้

ดังนั้นในการนิยามประชากรทางสถิติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาข้อมูลของประชากรมีค่าไม่เท่ากันอย่างอิสระ และมีตัวแบบที่คงที่ที่สามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ มิฉะนั้นมีความจำเป็นต้องนิยามใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากว่ากลวิธีต่างๆ ทางสถิติจะไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความผันแปรจากสาเหตุความผิดพลาดได้ โดยการทวนสอบความถูกต้องของการนิยามประชากรอาจจะอาศัยเครื่องมือเบื้องต้นทางสถิติ อาทิ แผนภูมิควบคุม สำหรับการทวนสอบความมีเสถียรภาพ ของตัวแบบของข้อมูล

2.8.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ให้น้อยที่สุด

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ (ความผันแปรที่อธิบายได้/ความผันแปรทั้งหมด) $\times 100\%$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขได้โดย

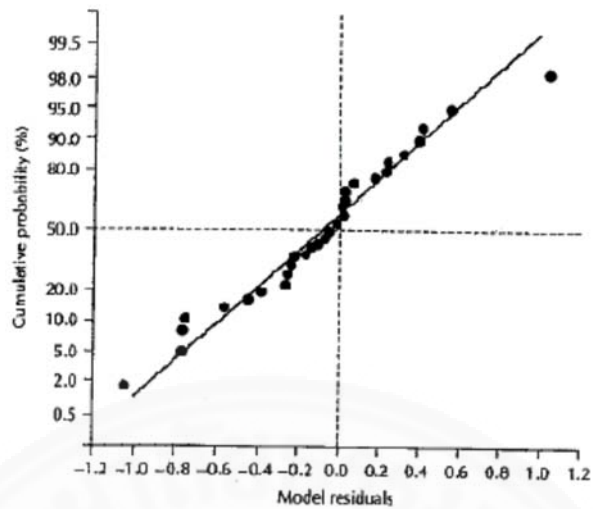
1. เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง
2. ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่
3. ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมากต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

2.8.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Analyze Residuals) และตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองที่สร้างขึ้น

จากแบบจำลองทดลองแทนค่าตัวแปรลงในสมการเพื่อทำนายผลตอบของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งถ้าแบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยทุกเทอมของผลกระทบที่จำเป็นในการทำนายผลตอบ, \hat{y} ค่าของส่วนตกค้าง ($e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$) ของแบบจำลอง ควรมีพฤติกรรมดังนี้

- 1) มีค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างเข้าใกล้ศูนย์
- 2) ส่วนตกค้างควรจะมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

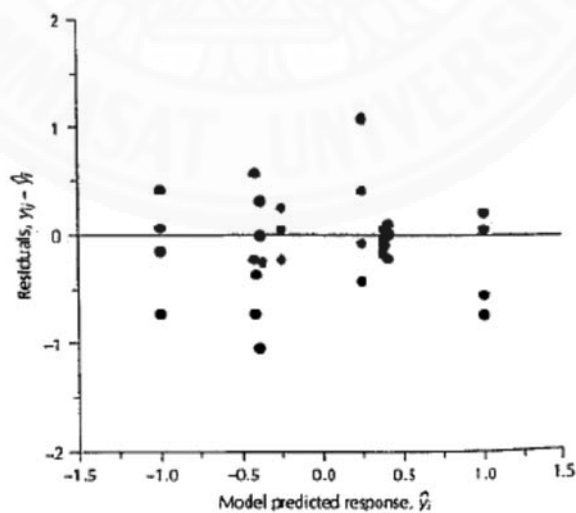
ตัวอย่างการแจกแจงของข้อมูลส่วนตกค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติแสดงดังภาพที่ 2.10 จากกราฟพบว่าจุดของส่วนตกค้างจะมีการกระจายตัวเข้าใกล้เส้นตรง (0,0) ที่ลากผ่าน จะมีเพียง 2 หรือ 3 จุดเท่านั้นที่กระจายตัวอยู่ห่างเส้นตรง



ภาพที่ 2.10 การพล็อตกราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

3) ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนที่คงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย (\hat{y}) หรือลำดับการทดลอง ดังนี้

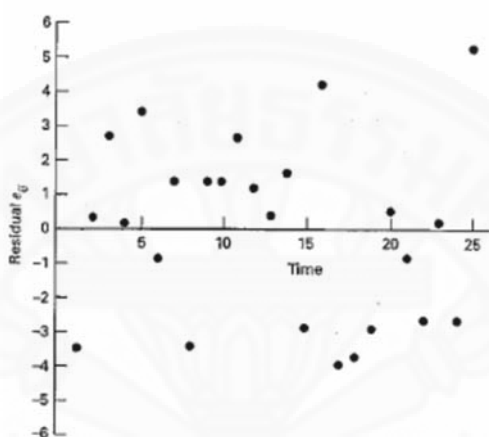
ภาพที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการแจกแจงของข้อมูลส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plot of Residuals Versus the Predicted Value) ซึ่งจากกราฟมีลักษณะการกระจายตัวแบบอิสระมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างจากการทดลองไม่ขึ้นอยู่กับค่าทำนาย



ภาพที่ 2.11 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย

ส่วนตกค้างจะต้องมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่แปรผันตามปัจจัยที่สนใจศึกษา ลำดับของการทดลองหรืออื่นๆ

ภาพที่ 2.12 แสดงตัวอย่างการแจกแจงของข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus Run order) ซึ่งจากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอนมีการกระจายตัวที่กระจุกกระจาย ไม่แปรผันตามลำดับการทดลอง



ภาพที่ 2.12 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง

ดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองได้ดังนี้ คือ ใช้แบบจำลองที่ได้จากการทดลองทำนายค่าผลตอบในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นนำค่าทำนายที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงหรือคำนวณหาค่าความผิดพลาดของส่วนตกค้าง ($e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_i$) ของแต่ละการทดลอง และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟการแจกแจงของส่วนตกค้างสังเกตลักษณะของกราฟที่ได้จากการพล็อต ซึ่งลักษณะของกราฟจะต้องมีพฤติกรรมดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

2.9 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

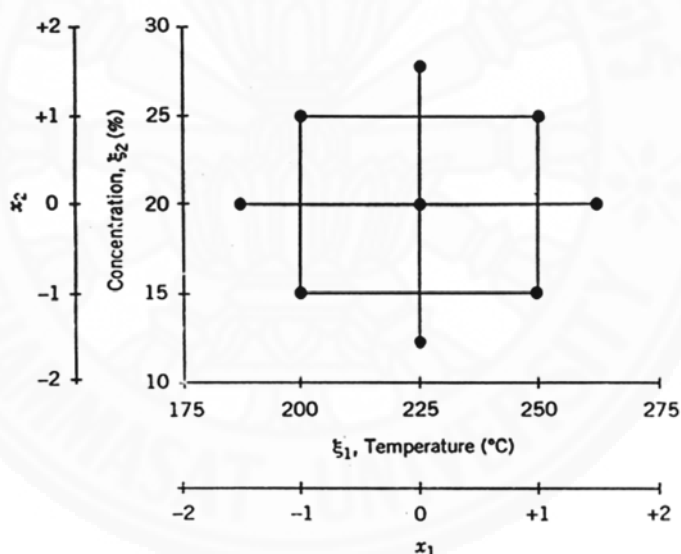
การออกแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ใช้ในการออกแบบการทดลองที่มีหลาย ๆ ปัจจัย (Factor) เพื่อที่จะหาผลของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรผลตอบ (Response Variable) ที่เป็นทั้งผลหลักและอันตรกิริยา (Interaction) กรณีพิเศษของ Factorial Design ที่มีความสำคัญมากคือในแต่ละ k ปัจจัยที่เราสนใจมี 2 ระดับ (Levels) ซึ่งเรียกว่า 2^k Factorial Designs โดยที่การ

ออกแบบการทดลองแบบนี้มีความสำคัญมากต่อการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ใน 3 ส่วน คือ

1) การออกแบบชนิด 2^k Factorial Design เป็นจุดเริ่มต้นของการหาพื้นผิวผลตอบที่มีกระบวนการกรอง (Screening) เพื่อกำหนดตัวแปรของระบบหรือตัวแปรของกระบวนการที่สำคัญ

2) การออกแบบ 2^k Factorial Design โดยส่วนมากจะใช้สำหรับฟิตแบบจำลองพื้นผิวผลตอบลำดับหนึ่ง (Fit a First-Order Response Surface Model) และใช้ในการประมาณผลของปัจจัยที่ต้องการสำหรับวิธีการ Steepest Ascent

3) การออกแบบ 2^k Factorial Design เป็นการออกแบบพื้นฐานในการสร้างบล็อก เพื่อการสร้างพื้นผิวผลตอบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มการออกแบบ 2^2 ด้วย Axial Runs ตามภาพที่ 2.13 แล้วจะให้ผลลัพธ์เป็น Central Composite Design ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบที่สำคัญมากของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Second-Order Response Surface Model)



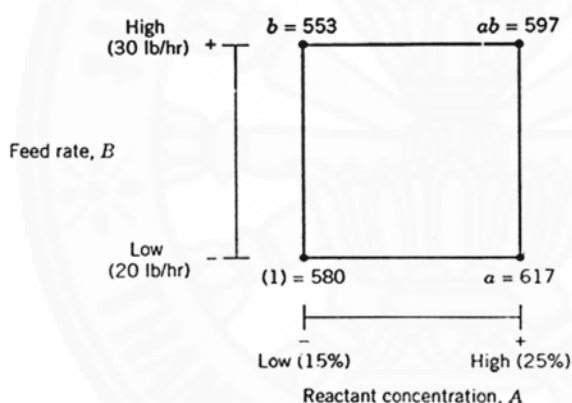
ภาพที่ 2.13 การออกแบบส่วนประสมกลาง

2.9.1 การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design

การออกแบบที่ง่ายที่สุดของ 2^k คือที่มีปัจจัยเพียง 2 ปัจจัยสมมติเป็น A และ B โดยในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงเรียกว่า 2^2 Factorial Design ระดับของปัจจัยอาจกำหนดเป็นระดับต่ำ (Low) และสูง (High) ซึ่งทั้งสองระดับอาจจะเป็นเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิหรือความดัน หรืออาจจะเป็นเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรสองเครื่อง คนงานสองคน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วในการหาพื้นผิวผลตอบปัจจัยและระดับจะกำหนดเป็นเชิงปริมาณ

การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design แสดงตามภาพที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด (Treatment Combination) ของปัจจัยเท่ากับ 4 โดยกำหนดให้ผลของปัจจัยเป็นอักษรลาตินตัวใหญ่ คือ A อ้างถึงผลของปัจจัย A , B คือผลของปัจจัย B ส่วน AB เรียกว่า AB Interaction ในการออกแบบชนิด 2^2 ระดับต่ำและสูงของ A และ B จะกำหนดเป็นเครื่องหมาย - และ + บนแกน A และแกน B ดังนั้น - บนแกน A แสดงถึงระดับต่ำ และ + แสดงถึงระดับสูง ในทำนองเดียวกัน - บนแกน B แสดงถึงระดับต่ำ และ + แสดงถึงระดับสูง

เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด (Treatment Combination) ทั้ง 4 ปกติจะแสดงโดยใช้อักษรตัวเล็กและที่ระดับต่ำของปัจจัยที่จุดในการออกแบบจะไม่มีอักษรแสดง ดังนั้น a ตามภาพที่ 2.14 แสดงถึงคอมบิเนชันของ A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, ส่วน b แสดงถึง A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ส่วน ab แสดงถึงปัจจัยทั้งสองที่ระดับสูง โดยปกติ (1) หมายถึง Run ของทั้งสองปัจจัยที่ระดับต่ำโดยการกำหนดลักษณะนี้จะใช้เป็นหลักในการออกแบบ 2^k ทั้งหมด



ภาพที่ 2.14 การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design

การกำหนดค่าเฉลี่ยของปัจจัยจะทำให้ผลตอบเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนในระดับของปัจจัยที่ถูกเฉลี่ยกับปัจจัยอื่น สัญลักษณ์ตามภาพที่ 2.7 คือ (1), a, b และ ab แสดงถึงผลรวมทั้งหมดของ n ซ้ำที่กระทำที่จุดต่าง ๆ ของการออกแบบ ดังนั้นผลของ A สามารถหาได้จากความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของผลตอบของสองจุดในด้านขวามือของสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เรียกว่าค่าเฉลี่ย \bar{y}_{A^+}) เพราะว่าเป็นค่าเฉลี่ยผลตอบที่จุดที่ A อยู่ในระดับสูง) และสองจุดที่อยู่ทางซ้ายมือ (หรือ \bar{y}_{A^-}) นั่นคือ

สมการที่ 2-1

$$\begin{aligned} A &= \bar{Y}_{A^+} - \bar{Y}_{A^-} = \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \end{aligned}$$

ส่วนผลของปัจจัย B หาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่สองจุดบนด้านบนของสี่เหลี่ยม (\bar{y}_{B^+}) และค่าเฉลี่ยของผลตอบของสองจุดที่ด้านล่างของสี่เหลี่ยม (\bar{y}_{B^-}) หรือ

สมการที่ 2-2

$$\begin{aligned} B &= \bar{Y}_{B^+} - \bar{Y}_{B^-} \\ &= \frac{ab + b}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \end{aligned}$$

สุดท้ายหาผลของอันตรกิริยา AB คือค่าเฉลี่ยของผลตอบบนจุดทแยงมุมขวาและซ้ายของสี่เหลี่ยม [ab และ (1)] ลบด้วยค่าเฉลี่ยของผลตอบจุดทแยงมุมจากซ้ายและขวา (a และ b) หรือ

สมการที่ 2-3

$$\begin{aligned} AB &= \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \end{aligned}$$

การออกแบบชนิด 2^k Factorial Design สามารถตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของผลลัพธ์ของปัจจัยที่ต้องการทราบ โดยการให้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

พิจารณาผลรวมของกำลังสอง (Sums of Squares) ของ A, B และ AB จากสมการที่ 2-1 จะได้คอนแทรกต์ที่ใช้ในการประมาณค่า A นั่นคือ

สมการที่ 2-4

$$Contrast_A = ab + a - b - (1)$$

โดยปกติจะเรียกคอนแทรกต์นี้ว่าผลลัพธ์รวมของ A และจากสมการที่ 2-2 กับสมการที่ 2-3 จึงได้คอนแทรกต์ที่ใช้ในการประมาณค่า B และ AB โดยทั้ง 3 คอนแทรกต์ นี้เรียกว่ารูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งค่าผลรวมของกำลังสองใด ๆ จะเท่ากับคอนแทรกต์ยกกำลังสองหารด้วยจำนวนของค่าสังเกตในแต่ละจำนวนครั้งของคอนแทรกต์จะได้ว่า

สมการที่ 2-5

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n \cdot 4}$$

สมการที่ 2-6

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n \cdot 4}$$

สมการที่ 2-7

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n \cdot 4}$$

และสามารถที่จะหาผลรวมของ Sum of Squares ได้ดัง สมการที่ 2-8

สมการที่ 2-8

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{4n}$$

และสามารถที่จะหาผลรวมของ Sum of Squares ได้ดัง สมการที่ 2-8

โดยทั่วไป SST จะมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ $4n - 1$ และมีค่าความผิดพลาดของผลรวมของกำลังสอง (Error Sum of Squares) เท่ากับ $4(n - 1)$ ซึ่งสามารถคำนวณในรูปสมการต่อไปนี้ดังสมการที่ 2-9

สมการที่ 2-9

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

ในการเขียนระดับของปัจจัยหรือเงื่อนไขการทดลองทั้งหมดในลำดับของ (1), a, b, ab จะนิยมเขียนเป็นเครื่องหมายตามตาราง 2.4 ซึ่งจะอ้างถึงเป็นลำดับมาตรฐาน (Standard Order) โดยประกอบด้วยเครื่องหมาย + และ - จากภาพที่ 2.14 ซึ่งมี 4 Runs ตามมุมของสี่เหลี่ยม นั้นหมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์ของคอนทราสต์ (Contrast Coefficients) สำหรับประมาณค่าผลลัพธ์ของอันตรกิริยาจะเป็นไปตามสัมประสิทธิ์ของผลหลักทั้งสอง (A และ B) เครื่องหมายที่อยู่ในแนวตั้ง | ในตารางที่ 2.4 แสดงถึงผลรวมหรือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมดในการทดลอง โดยเครื่องหมายในช่อง | นี้มีเฉพาะเครื่องหมาย + ส่วนในแนวนอนเป็นเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด ในการหาคอนทราสต์สำหรับการประมาณค่าใด ๆ ทำได้โดยการคูณเครื่องหมายที่เกี่ยวข้องในแต่ละแถวในแนวตั้ง (Column) ของตารางของแต่ละเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด และนำมาบวกกัน เช่น ประมาณค่า A จะได้ว่า Contrast คือ $-(1) + a - b + ab$

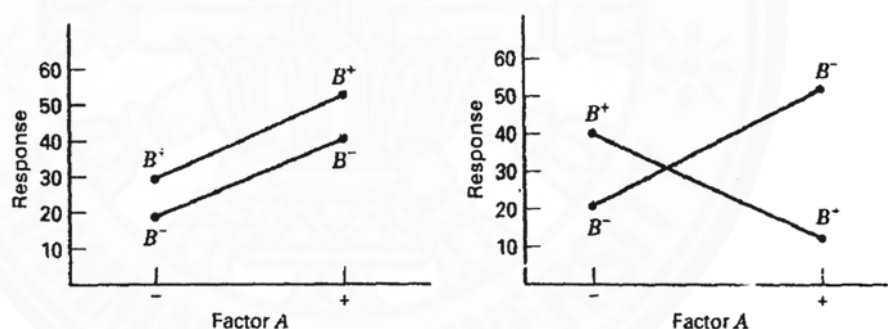
ตารางที่ 2.4

เครื่องหมายที่ใช้สำหรับคำนวณผลลัพธ์ของการออกแบบ 2^2

Treatment Combination	Factorial Effect			
	I	A	B	A
(1)	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

ที่มา : Myers and Montgomery, 1995 : 84

ในการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัย นอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลักที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมคือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย ดังตัวอย่างที่เกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ (Interaction) แสดงได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 อิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

2.9.2 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ตัว และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ เช่น มีวิศวกรคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดันคือ

สมการที่ 2-10

$$y = \int (x_1, x_2) + \varepsilon$$

โดยที่ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

สมการที่ 2-11

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้ว จะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟในภาพที่ 2.16 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อต (Plot) เป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบสนองในภาพที่ 2.17 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง ในปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

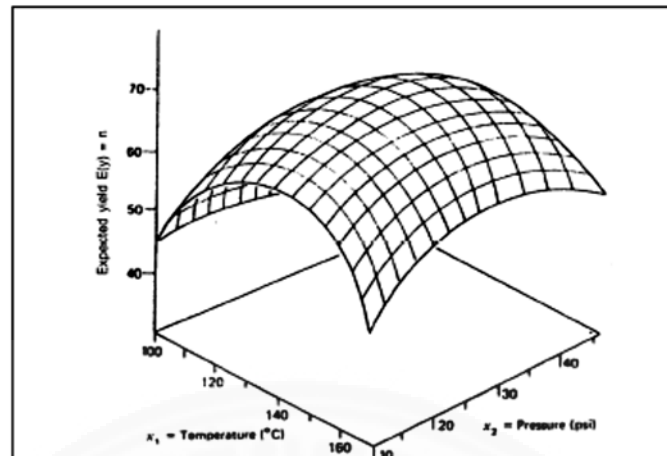
สมการที่ 2-12

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

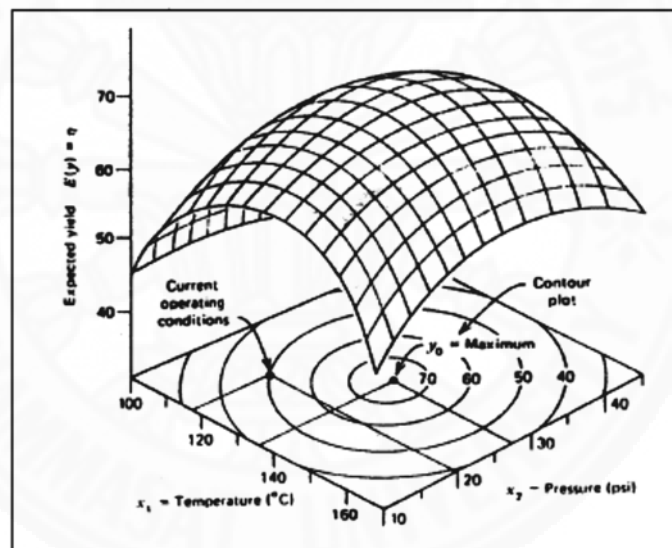
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

สมการที่ 2-13

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$



ภาพที่ 2.16 พื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ



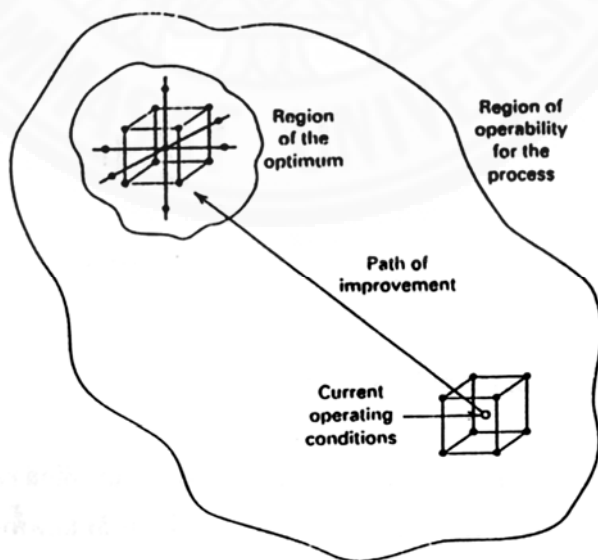
ภาพที่ 2.17 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลอง 1 ใน 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามเหล่านี้จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) กล่าวไว้ในทฤษฎีของการสร้างแบบจำลองการถดถอย (Fitting Regression Models) แล้ว จะถูกนำมาใช้ในการประมาณ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีพอ ดังนั้น การวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่าการออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่อยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เว้นไขการทำงานปัจจุบันในภาพที่ 2.18 จะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ คือ การนำการทดลองไปใช้เป็นแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นเช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากภาพที่ 2.19 จะพบว่าวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเหมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของภูเขามักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุด จะคิดเสมือนการเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา วัตถุประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



ภาพที่ 2.18 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

2.9.2.1 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

สมการที่ 2-14

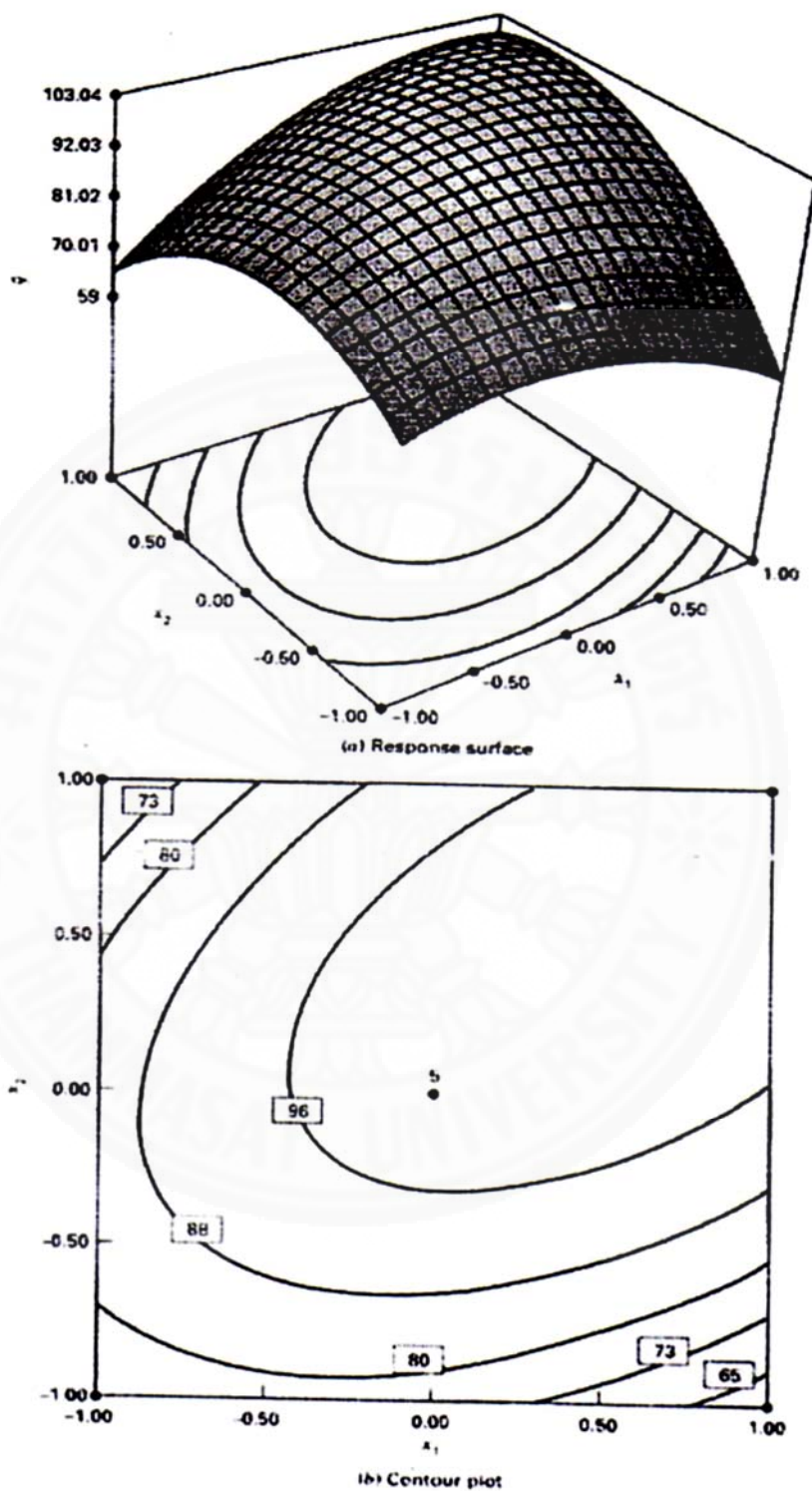
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

ซึ่งแบบจำลองนี้มีความพอเพียง ในส่วนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง สมมติว่าต้องการที่จะหาระดับของ X_1, X_2, \dots, X_k ที่จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าที่ดีที่สุด จุดนี้ถ้าหากมีอยู่จริงจะหมายถึง เงื่อนไขของจุด X_1, X_2, \dots, X_k ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (Partial Derivative)

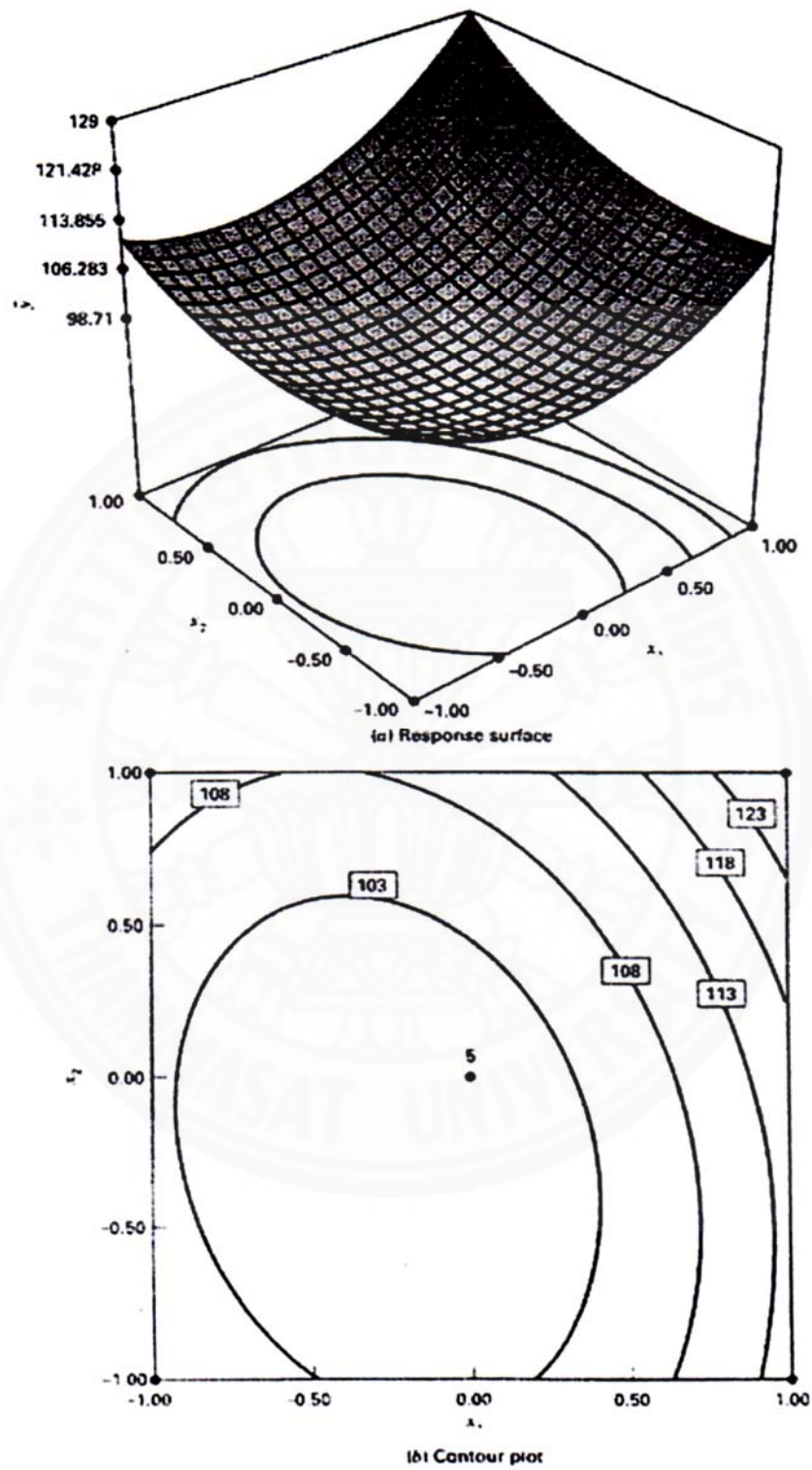
สมการที่ 2-15

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} = 0$$

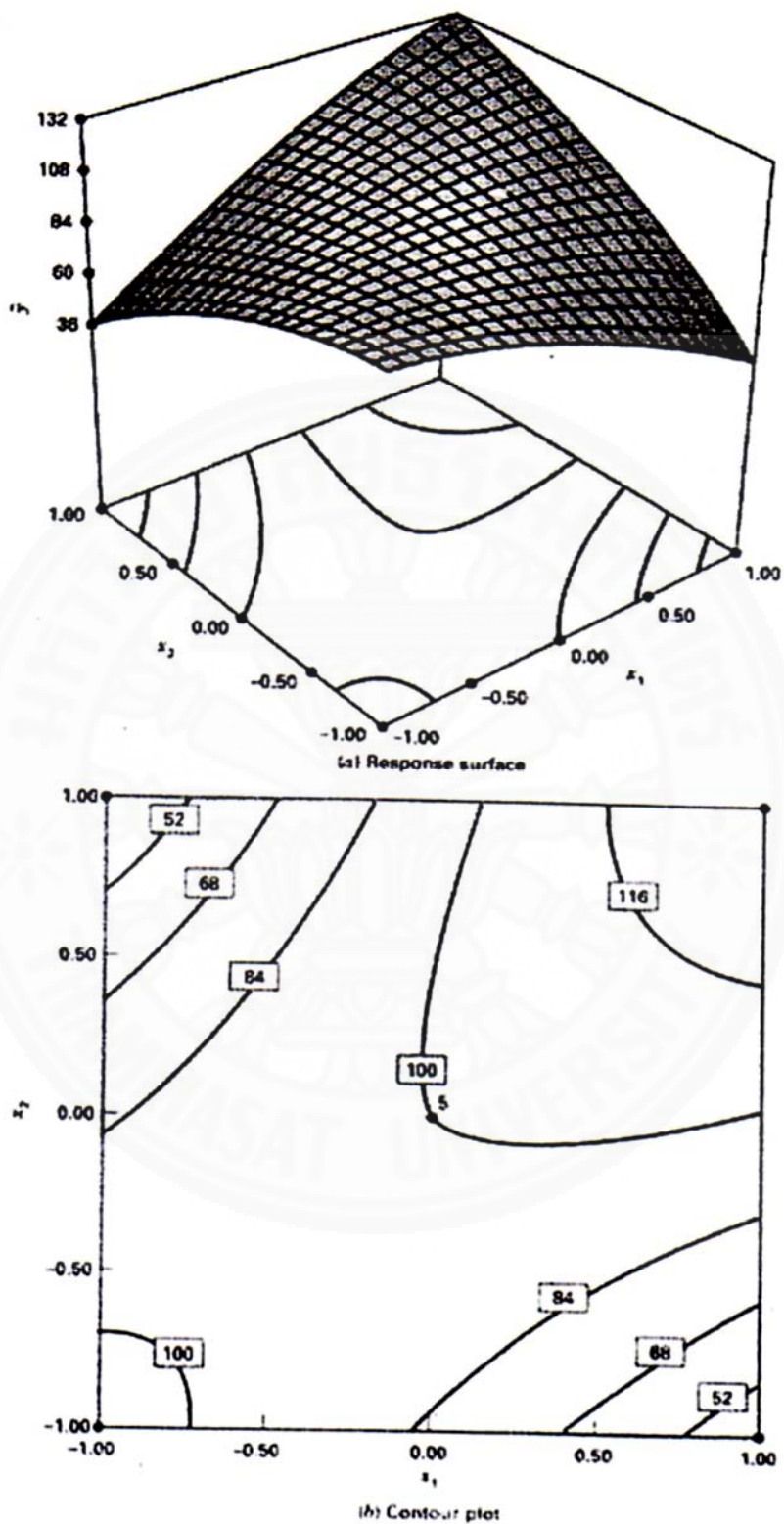
และจะเรียกตำแหน่งของจุด $X_1, X_2, \dots, X_{k,s}$ เหล่านี้ว่า จุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) จุดหยุดนิ่งนี้สามารถใช้ในการแทน จุดที่มีค่าผลตอบสนองสูงสุด จุดที่มีค่าผลตอบสนองต่ำสุด จุดอานม้า (Saddle Point) ซึ่งทั้ง 3 ทางที่มีความเป็นไปได้ แสดงในภาพที่ 2.19 ถึงภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.19 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด)



ภาพที่ 2.20 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองต่ำสุด)



ภาพที่ 2.21 จุดหยุดนิ่งจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสองเรียกว่า จุดอานม้า

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

สมการที่ 2-16

$$\hat{y} = \beta_0 + x'b + x'Bx$$

ซึ่ง b คือ เวกเตอร์ขนาด $(k \times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังหนึ่ง และ B คือเมทริกซ์แบบสมมาตรขนาด $(k \times k)$ ซึ่งมีส่วนประกอบในแนวเส้นทแยงมุมหลักเป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสองบริสุทธิ์ (β_{ii}) และส่วนประกอบที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเป็นครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์กำลังสองผสม ($\beta_{ij}, i \neq j$) ค่าอนุพันธ์ของ (\hat{y}) เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์ x มีค่าเท่ากับศูนย์ คือ

สมการที่ 2-17

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx = 0$$

จุดหยุดนิ่ง คือ คำตอบของสมการที่ 2-17 คือ

สมการที่ 2-18

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ 2-18 ในสมการที่ 2-16 จะพบค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง ณ จุดหยุดนิ่ง

สมการที่ 2-19

$$\hat{y} = \beta_0 + \frac{1}{2}x'_s b$$

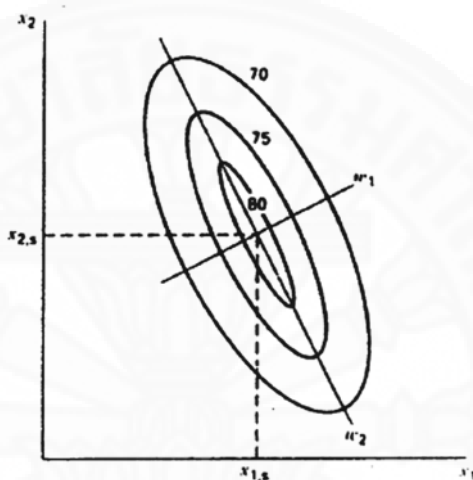
2.9.3 ลักษณะคุณสมบัติของพื้นผิวผลตอบสนอง

เมื่อค้นพบจุดหยุดนิ่งแล้ว มีความจำเป็นที่จะต้องหาลักษณะคุณสมบัติของพื้นผิวตอบสนองในบริเวณใกล้เคียงกับจุดนี้ นั่นคือ จะต้องหาว่าจุดหยุดนิ่งนี้เป็นจุดสูงสุด, จุดต่ำสุดหรือเป็นจุดอานม้า นอกจากนั้น ยังต้องศึกษาถึงความไวของผลตอบสนองกับตัวแปร X_1, X_2, \dots, X_k

เหมือนที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่า วิธีการแบบตรงไปตรงมาที่จะหาจุดเหล่านี้ คือ การดูกราฟจากโครงร่างของแบบจำลอง ถ้าในการทดลองนั้นมีตัวแปรของกระบวนการเพียง 2 หรือ 3 ตัว การสร้างและการตีความหมายของกราฟโครงร่างนี้จะค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีตัว

แปรเพียงแค่ 2 หรือ 3 ตัวก็ตาม การวิเคราะห์ห้อย่างเป็นทางการที่เรียกว่า การวิเคราะห์แบบบัญญัติ (Canonical Analysis) ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน

จะเป็นการช่วยในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก ถ้ามีการแปลงรูปของแบบจำลองไปสู่ระบบพิกัดที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดหยุดนิ่ง X_s และหลังจากนั้นก็หมุนแกนของระบบนี้จนกระทั่งมันขนานกับแกนหลัก (Principal Axis) ของพื้นผิวตอบสนองที่สร้างขึ้นมา การแปลงรูปอย่างนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 รูปแบบบัญญัติของแบบจำลองกำลังสอง

ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ผลของการแปลงรูปนี้ จะสามารถทำให้ได้แบบจำลองขึ้นมา นั่นคือ

สมการที่ 2-20

$$\hat{y} = \hat{y}_s + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$$

โดยที่ $\{w_i\}$ คือ ตัวแปรอิสระที่ถูกแปลงรูป และ $\{\lambda_i\}$ คือ ค่าคงตัว สมการที่ 2-13 เรียกว่า รูปแบบบัญญัติของแบบจำลอง นอกจากนั้น $\{\lambda_i\}$ จะหมายถึงค่าเฉพาะ หรือรากลักษณะ (Characteristic Roots) ของเมทริกซ์ B

ธรรมชาติของพื้นผิวตอบสนอง สามารถที่จะหาได้จากจุดหยุดนิ่งและเครื่องหมายและขนาดของ $\{\lambda_i\}$ อันดับแรก สมมติว่าจุดหยุดนิ่งอยู่ภายใต้บริเวณของการสำรวจ เพื่อที่จะสร้างแบบจำลองกำลังสอง ถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีค่าเป็นบวก ดังนั้น x_s จะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองมากที่สุด และถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีค่าเป็นลบ ดังนั้น x_s จะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองน้อยที่สุด และถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีเครื่องหมายแตกต่างกัน ดังนั้น x_s จะเป็นจุดอานม้า นอกจากนี้ พื้นผิวจะมีความชันสูงสุดใน

ทิศทางของ $\{w_i\}$ ซึ่งทำให้ $\{\lambda_i\}$ มีค่าสูงสุดเช่นในภาพที่ 2.28 ซึ่งแสดงระบบที่มี x_s อยู่ที่จุดสูงสุด (λ_1 และ λ_2 มีค่าเป็นลบ) ที่มี $|\lambda_1| > |\lambda_2|$

2.9.3.1 ผลตอบสนองหลายตัว

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองจำนวนมากเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัวการพิจารณาผลตอบสนองหลายตัวพร้อมๆ กัน ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแต่ละตัว และหลังจากนั้นจะทำการกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่จะทำให้ผลตอบสนองทั้งหมดมีค่าดีที่สุดหรืออย่างน้อยที่สุดให้ผลตอบสนองทั้งหมดอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ยอมรับได้

2.9.4 การออกแบบการทดลองสำหรับฟิต (Fit) พื้นผิวผลตอบสนอง

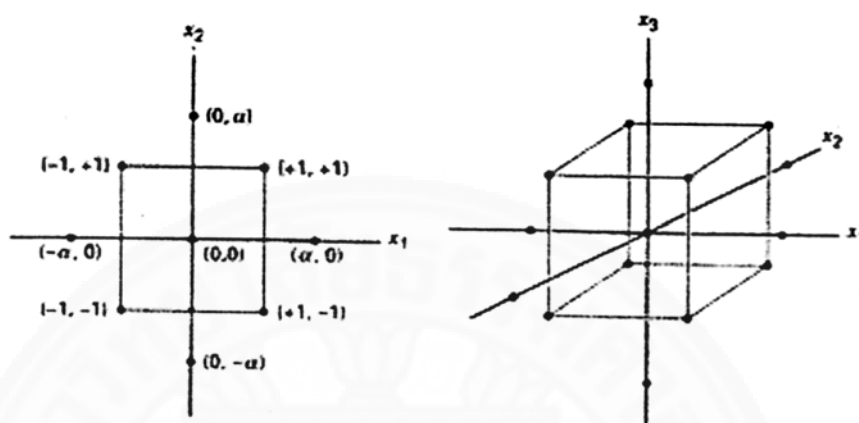
การฟิตและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะทำได้ง่ายขึ้น โดยถ้าหากทำการเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมในส่วนนี้ จะขออธิบายเกี่ยวกับแนวทางในการเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการฟิตพื้นผิวผลตอบสนอง โดยเมื่อจะทำการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแล้ว ลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณา มีดังนี้

1. ทำให้เกิดการกระจายที่เหมาะสมของจุดข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
 2. ทำให้สามารถตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และแลค ออฟฟิต (Lack of Fit) ได้
 3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อก (Block)
 4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้น สามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
 5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
 6. ไม่ต้องการการทดลองเป็นจำนวนมาก
 7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ
 8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย
- ลักษณะคุณสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ ซึ่งในบางครั้งอาจจะมีความขัดแย้งกันได้นั้น จึงจะต้องมีการไตร่ตรองอย่างดีก่อนที่จะทำการเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

2.9.5 การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับสอง

การออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ Central Cubic Design (CCD) ซึ่งใช้ในการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับ

การพิตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี n_f การทดลอง , การทดลอง 2^k ในแนวแกนหรือแนวรูปดาว (Star) และ n_c การทดลองที่จุดศูนย์กลาง ดังภาพที่ 2.23 จะเป็นการแสดง CCD สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ ปัจจัย



ภาพที่ 2.23 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$

2.9.6 CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Spherical) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้ เมื่อบริเวณที่สนใจมีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้อง 100% ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่สนใจอยู่นั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล และการออกแบบในแนวแกนให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมีเท่ากับ \sqrt{k}

2.9.6.1 จุดศูนย์กลางของการทดลองใน CCD

การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่สนใจอยู่ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลมการออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการทดลองเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบสนองที่พยากรณ์ได้ มีเสถียรภาพอย่างเต็มที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้วขอแนะนำให้ใช้ 3-5 รัน (Run)

2.9.7 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การออกแบบ แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ได้ถูกพัฒนาโดย นายบ็อกและนายเบห์นเคิน (1996) ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (second-order) วิธีการในการออกแบบโครงสร้าง

การทดลองนั้นมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก โครงสร้างการออกแบบการทดลองจะอยู่ในรูปแบบที่สมดุล กลุ่มไม่สมบูรณ์ (balance incomplete block design) ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองแบบสมดุล กลุ่มไม่สมบูรณ์ สำหรับ 3 ทรีตเมนต์ และ 3 บล็อก ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5

การออกแบบการทดลองแบบสมดุล กลุ่มไม่สมบูรณ์สำหรับ 3 ทรีตเมนต์และ 3 บล็อก

	Treatment		
	1	2	3
Block 1	x	x	
Block 2	x		x
Block 3		x	x

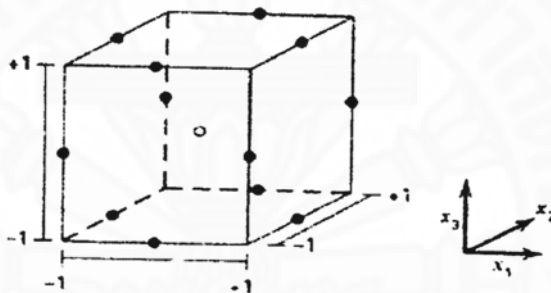
เมื่อนำตารางที่ 2.5 ไปสร้างแบบการทดลอง จากบล็อกที่ 1 คู่ของทรีตเมนต์ที่ 1 และ 2 ในการเซตค่าพื้ผิวตอบสนอง จะมีตัวแปร X_1 และ X_2 อยู่ในรูปแบบของ 2^2 Factorial (Scaling ± 1) ในขณะที่ X_3 จะกำหนดให้อยู่ที่จุดศูนย์กลาง ($X_3 = 0$) ในบล็อกที่ 2 และ 3 ก็จะเป็นเช่นเดียวกัน ซึ่งจะใช้รูปแบบ 2^2 Factorial เพื่อสร้างระดับของคู่ตัวแปร ส่วนตัวแปรที่เหลือจะกำหนดให้เท่ากับ 0 และแถวสุดท้ายจะกำหนดค่าตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่ที่จุดศูนย์กลางเรียกว่า Vector of Center Runs จากผลของ Box-Behnken Design ที่ $k=3$ แสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6

การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ที่มีสามตัวแปร

Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1

Run	X_1	X_2	X_3
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	-1	+1
11	0	+1	-1
12	0	+1	+1
13	0	0	0



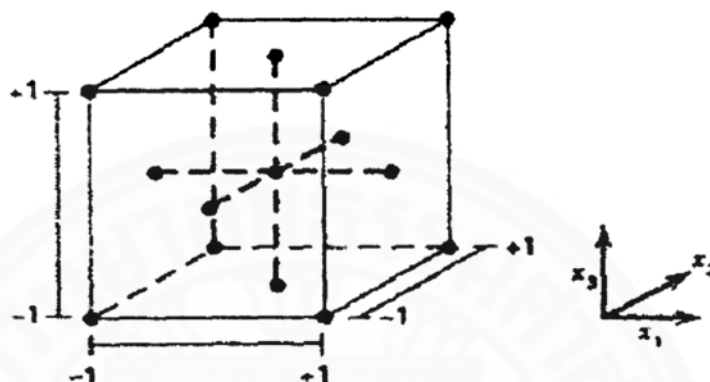
ภาพที่ 2.24 การออกแบบ แบบ Box-Behnken with a Center Point

จากรูปทางเรขาคณิตของการออกแบบ แสดงให้เห็นในภาพที่ 2.24 สังเกตว่า การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของแต่ละตัวแปรแต่ละตัวเป็นตัวกำหนด การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมาก เมื่อจุดที่อยู่บนรูปลูกบาศก์ คือ การรวมปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมาก หรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

2.9.7.1 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยด์ล (Cuboidal)

มีเหตุการณ์มากมายที่บริเวณที่อยู่ในความสนใจเป็นแบบคิวบอยด์ล (Cuboidal) แทนที่จะเป็นรูปทรงกลม ในกรณีเช่นนี้การออกแบบที่เรียกว่า เฟซ-เซ็นเตอร์เซ็นทรัลคอมโพสิท (Face-Centered Central Composite) หรือเฟซ-เซ็นเตอร์คิวบิก (Face-Center Cubic) ที่มี $\alpha = 1$ ซึ่งพัฒนามาจากส่วนประสมกลาง จะเป็นการออกแบบที่มีประโยชน์อย่างมาก

การออกแบบนี้วางจุดดาว (Star) หรือจุดในแนวแกน (Axial) อยู่บนจุดศูนย์กลางของหน้ารูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2.25 สำหรับ $k = 3$ การออกแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องการเพียง 3 ระดับของแต่ละปัจจัยเท่านั้น และการเปลี่ยนระดับปัจจัยทำได้ยากในทางปฏิบัติอีกด้วย



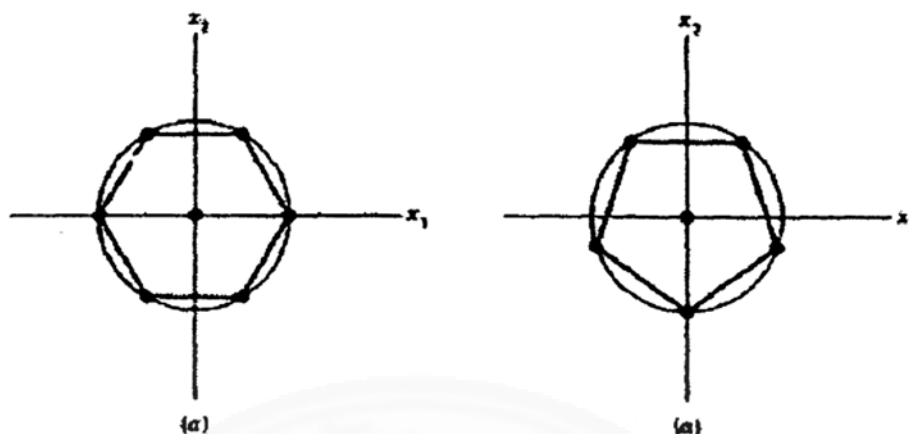
ภาพที่ 2.25 การออกแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Centered) ส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$

การออกแบบ แบบ Face-Center Cubic ไม่ต้องการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากเหมือนกันกับ CCD รูปทรงกลม ในทางปฏิบัติ $n_c = 2$ จะเพียงพอที่จะทำให้ความแปรปรวนของการพยากรณ์อยู่ในระดับที่ติดต่อด้านของการออกแบบ ในบางครั้งทำการทดลองที่จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากขึ้น เนื่องจากต้องการให้ค่าประมาณความผิดพลาดของการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

2.9.8 การออกแบบชนิดอื่น

ยังมีการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองอีกเป็นจำนวนมากที่อาจจะเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติบางโอกาสสำหรับกรณี 2 ตัวแปร สามารถใช้การออกแบบที่เกิดจากจุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลม และการออกแบบลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เนื่องจากจุดของการออกแบบนี้มีระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่าๆ กัน การจัดวางเช่นนี้ถูกเรียกว่าการออกแบบรัศมีเท่ากัน (Equiradial Design)

สำหรับ $k = 2$ การออกแบบรัศมีเท่ากันที่สามารถหมุนได้ จะหาได้จากการรวมจุด $n_c \geq 5$ จุด ที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลมที่มีจุด $n_1 \geq 1$ จุด ที่ศูนย์กลางของวงกลม การออกแบบที่สำคัญสำหรับ $k = 2$ คือรูปห้าเหลี่ยม และรูปหกเหลี่ยม การออกแบบนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การออกแบบเบรต์มีเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม (b) ห้าเหลี่ยม

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โสภิตา (2550) ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองซึ่งเป็นกรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ดำเนินการทดลองเบื้องต้นโดยใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) และใช้การการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Rolls 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Rolls 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 73.08 เปอร์เซ็นต์

วิชาญ (2545) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นและนำเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาหาปัจจัยด้วยวิธีการระดมสมอง ทำให้เลือกปัจจัยได้ทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช โดยใช้แผนการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล ในการทดลองเบื้องต้นโดยทุกระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อตัดปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3

ชนิดนี้มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น การทดลองแพททอเรียลจึงได้นำกลับมาใช้อีกครั้งโดยเพิ่มระดับของปัจจัย 3 ระดับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวนานน้อยที่สุด ผลการทดลองพบว่าสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ 158 มิลลิเมตร จากความยาวเดิม 681.17 มิลลิเมตร และพบว่ายังสามารถลดความยาวเพื่อตัดของเหล็กปลายสั้นลงได้ 264 มิลลิเมตรจากความยาวเดิม 349 มิลลิเมตร คิดเป็นมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเท่ากับ 629,856 บาทต่อปี อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

วีรเทพ (2550) การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบโดยวิธีการออกแบบการทดลอง เป็นการปรับปริมาณธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กที่ใช้ในการผลิตแท่งเหล็กดิบโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปริมาณธาตุที่จะทำให้เกิดความบกพร่องของเหล็กดิบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้เหล็กกวัดที่ผลิตจากเหล็กดิบนี้มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด จากผลการทดลองเบื้องต้นโดยการใช้ Factorial Design (2^5) ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีปัจจัย 5 ปัจจัย พบว่า ปริมาณคาร์บอน ปริมาณแมงกานีส ปริมาณกำมะถัน และปริมาณซิลิกอน มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กกวัดอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัส ไม่มีระดับนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กกวัด เมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กกวัดมาทำการออกแบบการทดลองอีกครั้งโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง แบบ Box-Behnken Design จะได้สมการถดถอยของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรง คือ $Y = 50.64 + 1.25A + 0.75B + 0.13C + 0.15D$ โดยได้คำตอบของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรง (Y) มากที่สุดคือ ปริมาณคาร์บอน (A) ที่ 0.20 %/kg ปริมาณแมงกานีส (B) ที่ 0.60 %/kg ปริมาณกำมะถัน (C) ที่ 0.05 %/kg และปริมาณซิลิกอน (D) ที่ 0.50 %/kg เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า ไม่พบความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนเหล็กดิบและเมื่อนำเหล็กดิบไปผลิตเป็นเหล็กกวัด พบว่า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กกวัดที่ได้จะมีค่าระหว่าง 52.34-55.08 kg/mm² ซึ่งผลวิจัยนี้สามารถลดความบกพร่องของเหล็กดิบได้ 100%

กฤษฏีกา โพธิเกษม (2553) ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และทากูชิตศึกษาปัจจัยการผลิตไฟวอด คาร์ทริดส์จำนวน 4 ปัจจัย คือ A, B, C และ D เพื่อประเมินอิทธิพลต่อค่าแรงบิดซึ่งผลการทดลองพบว่า ปัจจัย A ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงบิดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ขณะที่ปัจจัย B, C, และ D มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงบิดที่ระดับนัยสำคัญเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบค่าแรงบิดที่เหมาะสมที่สุดได้จากการกำหนดระดับของปัจจัย B ที่ระดับสูง ปัจจัย C ที่ระดับสูง และปัจจัย D ที่ระดับสูง ซึ่งผลจากการดำเนินการด้วยค่าระดับใหม่ของปัจจัยต่าง ๆ พบว่า ค่าแรงบิดที่ได้รับมีความเหมาะสมกว่าสภาวะการผลิตในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Sooriyamoorthy Elangovan & K. Prakasan & V. Jaiganesh (2010) ,Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments (การปรับปรุงค่าปัจจัยที่ใช้การเชื่อมแบบอัลตราโซนิก ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษานี้มีแรงกด เวลาในการเชื่อม และแอมพลิจูดของการสั่น จากการทดลองพบว่า แรงกด เวลาในการเชื่อม แอมพลิจูดของการสั่นมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ส่วนความสัมพันธ์แบบ 2 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญคือ แรงกดกับเวลาในการเชื่อม และแรงกดกับแอมพลิจูดของการสั่น แต่ความสัมพันธ์แบบ 3 ปัจจัยไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ในการตั้งค่าปัจจัยเพื่อให้ได้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีที่สุดคือแรงกด 2 bar , เวลาในการเชื่อม 2.25 วินาที และแอมพลิจูดของการสั่นที่ 50 μm ทำให้ได้ความแข็งแรงการดึงที่ $1.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 การคัดเลือกปัจจัยและประเภทของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding)

จากการศึกษากระบวนการปรับตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค พบว่า ปัจจัยและประเภทของปัจจัยที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding machine) มีรายละเอียดดังนี้

1. Tube no. คือ หมายเลขท่อที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บประวัติการเชื่อมท่อทองแดง และเป็นปัจจัยประเภทคงที่ (Fixed factor)

2. Tube Diameter คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง โดยในการศึกษานี้ใช้ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้วหรือ 9.525 มิลลิเมตรทำให้ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยประเภทคงที่ (Fixed factor)

3. Wall Thickness คือ ความหนาของผนังท่อทองแดง โดยในการศึกษานี้ใช้ท่อทองแดงที่มีความหนาเฉลี่ย 0.018 นิ้วหรือ 0.460 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นปัจจัยประเภทคงที่ (Fixed factor)

4. t1 คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน ซึ่งเป็นปัจจัยประเภทผันแปร (Variable factor)

5. t2 คือ ระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง ซึ่งเป็นปัจจัยประเภทผันแปร (Variable factor)

6. Air pressure คือ เป็นแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง ซึ่งเป็นปัจจัยประเภทผันแปร (Variable factor)

7. Amplitude คือ เป็นระยะการสั่นของหัวโซนาโทรดเป็นปัจจัยประเภทผันแปร (Variable factor)

8. Switch-Height คือ ความหนาของชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมตัด โดยความหนาของชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมตัดถูกกำหนดจากผู้ผลิตเครื่อง คือ $2 \times \text{wall thickness} - ((2 \times \text{wall thickness}) \times 25\%)$ และ $2 \times \text{wall thickness} - ((2 \times \text{wall thickness}) \times 45\%)$ ทำให้ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยประเภทคงที่ (Fixed factor)

หลังจากการคัดเลือกปัจจัยและประเภทของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก พบว่า ปัจจัยที่เป็นปัจจัยประเภทผันแปรได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดง (t_1) ระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง (t_2) แรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) และระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) เป็นปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding) โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

3.2 การแบ่งส่วนการศึกษา

3.2.1 การศึกษาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design (2^k) เพื่อนำปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญไปศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก

3.2.2 การศึกษาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม

การทดลองเพื่อศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิกโดยศึกษาพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร (Response Surface - Methodology) และอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design

3.3 การกำหนดระดับปัจจัย ค่าตอบสนองที่ใช้ในการทดลองและสมมุติฐาน

3.3.1 การกำหนดระดับปัจจัย

สามารถกำหนดระดับของปัจจัยอ้างอิงจากช่วงการปรับตั้งค่าของแต่ละปัจจัย โดยการกำหนดระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยที่ควบคุมในการทดลองนี้ จะกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) เป็นแบบคงที่ (Fixed Level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่กำหนดค่าได้แน่นอน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) หลังจากผ่านการเชื่อมแล้ว และหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก ดังตารางที่ 3.1 โดยช่วง (Range) ที่ศึกษาจะอาศัยช่วง

ที่กำหนดมาจากผู้ผลิตมาช่วยในการตัดสินใจกำหนดระดับของปัจจัย เป็นระดับสูง (High) และ ระดับต่ำ (Low).

ตารางที่ 3.1

ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษา

ปัจจัย (Factor)	ช่วงของปัจจัย (Range)	ต่ำ (Low)	สูง (High)	หน่วย (Unit)
t1	0.6 - 1.2	0.7	1.1	วินาที (Second)
t2	0.2 - 0.8	0.3	0.7	วินาที (Second)
Air pressure	4.0 - 5.5	4.3	5.1	บาร์ (Bar)
Amplitude	20 - 30	22	28	ไมโครเมตร (μm)

3.3.2 ค่าตอบสนองที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) จะกำหนดตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดงหลังจากผ่านการเชื่อมแล้ว (Withstand Pressure) มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่ค่าของความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมค่ามากหมายถึง รอยเชื่อมท่อทองแดงมีความแข็งแรงมากและค่าของความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมค่าน้อยหมายถึงรอยเชื่อมท่อทองแดงมีความแข็งแรงน้อย ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

3.3.3 การกำหนดสมมุติฐานการทดลอง

$$H_0 : \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$$

$$H_1 : \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq 0 ; \text{for at least one}$$

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0 ; \text{for at least one}$$

$$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

$$H_1 : \gamma_1 \neq \gamma_2 \neq 0 ; \text{for at least one}$$

$$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = 0$$

$$H_1 : \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 0 ; \text{for at least one}$$

เมื่อ

ε คือ อิทธิพลที่เกิดจากระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1)

β คือ อิทธิพลที่เกิดจากระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง (t2)

γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure)

λ คือ อิทธิพลที่เกิดจากระยะเวลาการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude)

3.4 การเลือกแบบการทดลอง

เนื่องจากปัจจัยหลักที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นมี 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยนั้นมีความสำคัญต่อค่าตอบสนอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล เมื่อมีปัจจัยทั้งสิ้น 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2^4 Factorial Design มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้มีจำนวนครั้งของการทดลอง (Runs) เท่ากับ 32 การทดลอง และจัดให้ลำดับการทดลองนั้นเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดอคติ ดังตารางที่ 3.2 แสดงการออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้น

ตารางที่ 3.2

การออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้น

StdOrder	RunOrder	t1	t2	Air pressure	Amplitude	Withstand pressure
16	1	1.1	0.7	5.1	28	
23	2	0.7	0.7	5.1	22	
18	3	1.1	0.3	4.3	22	
19	4	0.7	0.7	4.3	22	
8	5	1.1	0.7	5.1	22	
5	6	0.7	0.3	5.1	22	
26	7	1.1	0.3	4.3	28	
1	8	0.7	0.3	4.3	22	
6	9	1.1	0.3	5.1	22	
28	10	1.1	0.7	4.3	28	
12	11	1.1	0.7	4.3	28	
15	12	0.7	0.7	5.1	28	
17	13	0.7	0.3	4.3	22	
13	14	0.7	0.3	5.1	28	
20	15	1.1	0.7	4.3	22	
31	16	0.7	0.7	5.1	28	
30	17	1.1	0.3	5.1	28	
7	18	0.7	0.7	5.1	22	
21	19	0.7	0.3	5.1	22	
24	20	1.1	0.7	5.1	22	
9	21	0.7	0.3	4.3	28	
4	22	1.1	0.7	4.3	22	
10	23	1.1	0.3	4.3	28	
22	24	1.1	0.3	5.1	22	
11	25	0.7	0.7	4.3	28	
14	26	1.1	0.3	5.1	28	

ตารางที่ 3.2

การออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	t1	t2	Air pressure	Amplitude	Withstand pressure
25	27	0.7	0.3	4.3	28	
2	28	1.1	0.3	4.3	22	
3	29	0.7	0.7	4.3	22	
29	30	0.7	0.3	5.1	28	
32	31	1.1	0.7	5.1	28	
27	32	0.7	0.7	4.3	28	

3.5 การดำเนินการทดลอง

หลังจากเลือกแบบการทดลองในขั้นต้นได้แล้ว จึงได้กำหนดวิธีการทำการทดลองและขั้นตอนทำการทดลองได้ดังนี้

3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

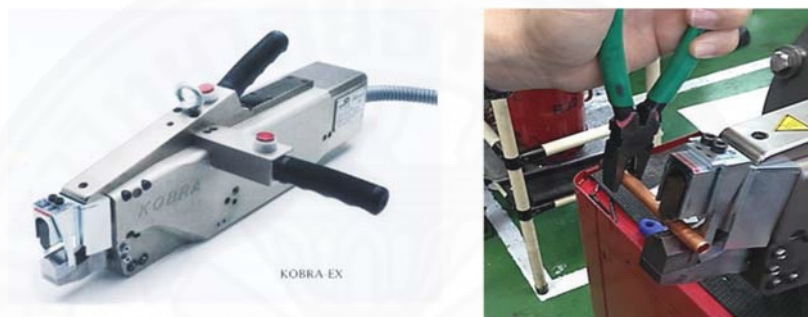
ในการทดลองนี้ใช้ท่อทองแดงขนาดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้วหรือ 9.525 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบานแฟร์ที่ปลายท่อทองแดงแล้วสวมน็อตทองเหลืองตัวเมียเข้าไปเพื่อใช้ในการยึดเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดันดังแสดงในภาพที่ 3.2



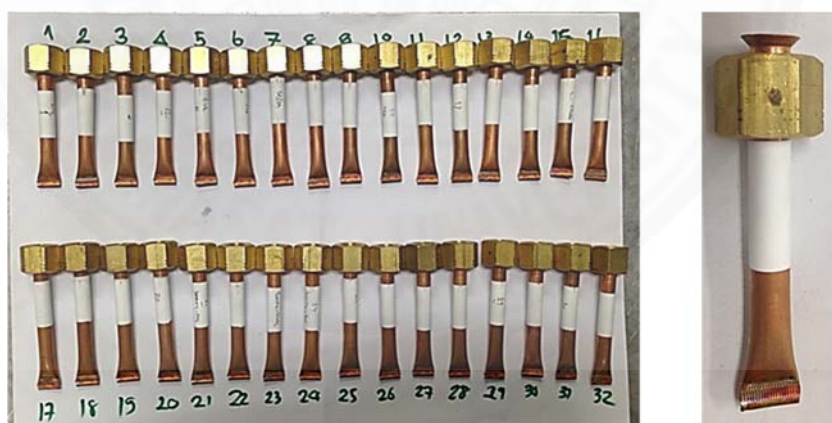
ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบ

3.5.2 การดำเนินการทดลอง

ดำเนินการเชื่อมต่อทองแดงกับเครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding machine) ตามที่ได้ออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.2 โดยปรับตั้งค่าปัจจัยตามแต่ละลำดับการทดลอง (Run) ในที่นี้ในแต่ละครั้ง (Run) ของการทดลอง ผู้วิจัยกำหนดให้มีจำนวนการทดลองทำซ้ำเท่ากับ 2 เท่านั้น รวมมีจำนวนครั้งของการทดลอง (Runs) เท่ากับ 32 การทดลอง และเป็น การทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านเวลาในการทดลอง, ทรัพยากรในการทดลอง และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดลองดังภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 การเชื่อมต่อทองแดงกับเครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding machine)



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก

3.5.3 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก

การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก วัดจากความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ต่อทองแดงหลังจากผ่านการเชื่อมแล้วกับเครื่อง

ทดสอบแรงดันตามภาพที่ 3.1 แสดงการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม จากนั้นบันทึกข้อมูลของความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมของแต่ละการทดลอง (Run)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab Version 16.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลองโดยในการทดลองนี้จะกำหนดช่วงความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% หรือกำหนดค่า α เท่ากับ 0.05 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลอง (Model Adequacy Checking) จะประกอบด้วย การตรวจสอบต่างๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบเพื่อตรวจสอบความปกติของการกระจายตัวข้อมูล

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

3. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals

4. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน หรือ σ^2

ซึ่งมีสมมุติฐานว่ารูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องไปไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ Residuals มีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และมีความเสถียรของความแปรปรวน หรือ σ^2 มีค่าคงตัวจึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องเชื่อถือได้ ซึ่งเมื่อเป็นไปตามหลักการที่กำหนดจึงนำชุดข้อมูลที่ได้ไปทำการทดสอบสมมุติฐานต่อไป โดยการที่จะให้ได้ข้อสรุปหรือการตัดสินใจที่ชัดเจนตามสมมุติฐานที่สนใจเฉพาะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการยืนยันโดยใช้ข้อเท็จจริงจากชุดข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างต่างๆ จะต้องมีวิธีการสำหรับการปฏิเสธหรือยอมรับสมมุติฐานอย่างถูกต้องแน่นอน สมมุติฐานแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

สมมุติฐานหลัก (Null Hypothesis, H_0) เป็นสมมุติฐานของการไม่มีความแตกต่าง ไม่มีความเกี่ยวข้อง หรือไม่มีผลต่อการทดสอบทางสถิติ โดยทั่วไปแล้วสมมุติฐานหลักที่แสดงไว้เพื่อต้องการพิสูจน์ว่าจะถูกปฏิเสธหรือยอมรับ เมื่อใด H_0 ถูกปฏิเสธ สมมุติฐานรอง H_1 ก็จะถูกยอมรับ

สมมุติฐานรอง (Alternative Hypothesis, H_1) เป็นสมมุติฐานที่เกี่ยวกับสิ่งที่ต้องการพิสูจน์ สิ่งที่ต้องการทราบหรือศึกษาของผู้ทำการทดลอง เป็นสิ่งที่คาดการณ์ ข้อสงสัย ความคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่หวังว่าจะเป็น โดยต้องมีความหมายที่แย้งกับสมมุติฐานที่กำหนดโดยชัดเจน โดยใช้สัญลักษณ์ H_1

3.7 การดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

หลังจากขั้นตอนของการกรองปัจจัยและเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองได้แล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้งหมดมาดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยกับค่าตอบสนอง และหาระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัย ในส่วนขั้นตอนของการดำเนินการทดลอง วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดสอบผลการทดลอง จะมีวิธีการและขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการทดลอง Full Factorial ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.5 ถึง 3.6

3.8 สรุปผลการทดลอง

ทำการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบผลที่ได้จากการปรับระดับการตั้งค่าปัจจัยต่างๆว่าระดับปัจจัยต่างๆนั้นต้องปรับไว้ที่ระดับใดจึงจะสามารถทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก มีค่าที่ดีที่สุด พร้อมกับวิเคราะห์ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังการทำการทดลองและหาวิธีการดำเนินการแก้ไขและปรับปรุง เพื่อที่จะนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค

จากขั้นตอนวิธีการทดลองเบื้องต้นตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 คือ การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design (2^k) เพื่อกรองปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญไปศึกษาหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงที่ดีที่สุดของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิค โดยใช้ปัจจัยที่เป็นปัจจัยประเภทผันแปรได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1), ระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง (t2), แรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) และระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) เป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและใช้ผลการตอบสนองความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดงหลังจากผ่านการเชื่อมแล้ว (Withstand pressure) มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa) ตามตารางที่ 4-1 แสดงความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) และชิ้นงานหลังการทดสอบแดงดังแสดงในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure)

StdOrder	RunOrder	t1	t2	Air pressure	Amplitude	Withstand pressure
16	1	1.1	0.7	5.1	28	20.0
23	2	0.7	0.7	5.1	22	19.7
18	3	1.1	0.3	4.3	22	19.6
19	4	0.7	0.7	4.3	22	20.9
8	5	1.1	0.7	5.1	22	18.6
26	6	1.1	0.3	4.3	28	21
5	7	0.7	0.3	5.1	22	20.2
1	8	0.7	0.3	4.3	22	20.5

ตารางที่ 4.1

ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	t1	t2	Air pressure	Amplitude	Withstand pressure
6	9	1.1	0.3	5.1	22	19.1
28	10	1.1	0.7	4.3	28	21
12	11	1.1	0.7	4.3	28	20.5
15	12	0.7	0.7	5.1	28	19.6
17	13	0.7	0.3	4.3	22	21.2
13	14	0.7	0.3	5.1	28	19.7
20	15	1.1	0.7	4.3	22	19.2
31	16	0.7	0.7	5.1	28	20.1
30	17	1.1	0.3	5.1	28	20
7	18	0.7	0.7	5.1	22	19.9
21	19	0.7	0.3	5.1	22	19.8
24	20	1.1	0.7	5.1	22	18.8
9	21	0.7	0.3	4.3	28	21
4	22	1.1	0.7	4.3	22	18.9
10	23	1.1	0.3	4.3	28	20.8
22	24	1.1	0.3	5.1	22	18.7
11	25	0.7	0.7	4.3	28	20.6
14	26	1.1	0.3	5.1	28	20
25	27	0.7	0.3	4.3	28	20.7
2	28	1.1	0.3	4.3	22	19.4
3	29	0.7	0.7	4.3	22	20.8
29	30	0.7	0.3	5.1	28	20.1
32	31	1.1	0.7	5.1	28	20.0
27	32	0.7	0.7	4.3	28	20.5



ภาพที่ 4.1 ชิ้นงานหลังการทดสอบ

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการทดลองทำได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน และจากผลการดำเนินการทดลองแบบ 2^4 Factorial Design มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง และจะใช้โปรแกรม Minitab Version 16 มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

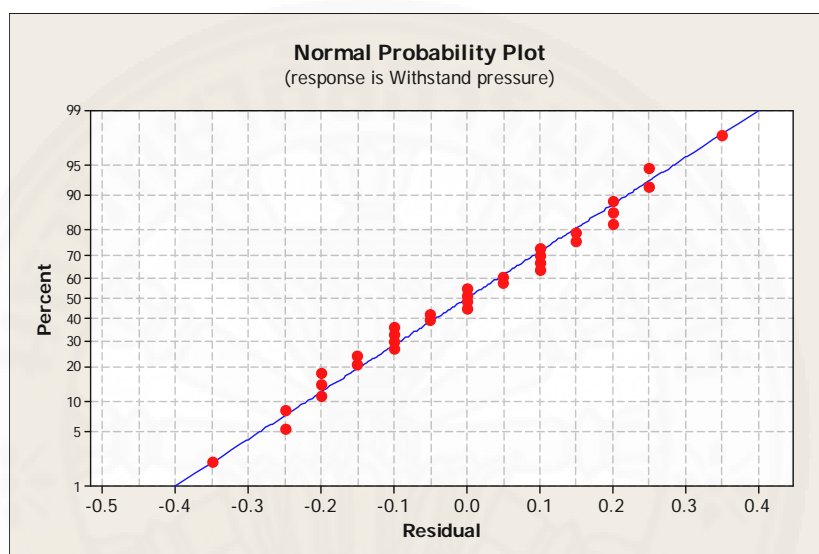
4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่ารูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ Residuals มีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และมีความเสถียรของความแปรปรวน หรือ σ^2 มีค่าคงตัวจึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องเชื่อถือได้ (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ในการตรวจสอบ ε_{ij} มี 4 ขั้นตอน ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.2.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

ของ Residuals

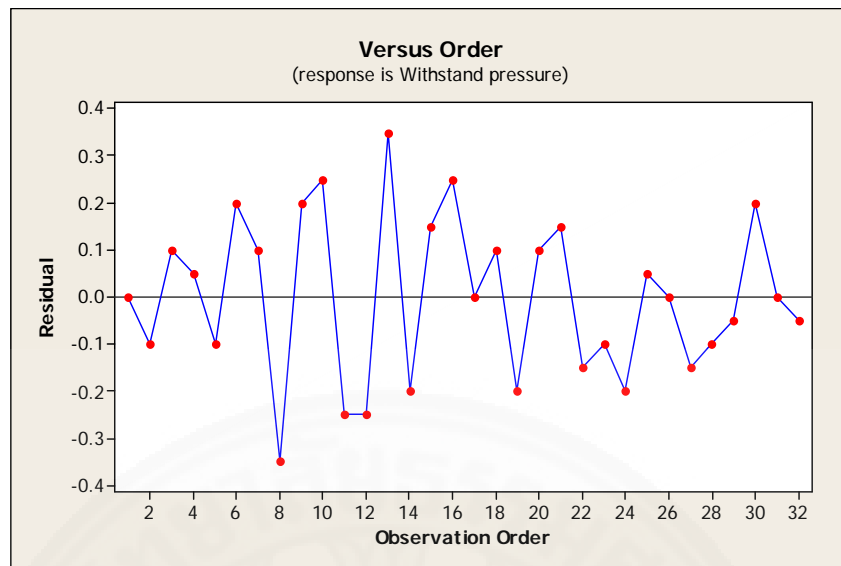
จากการพิจารณาการกระจายของค่า Residual ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ในภาพที่ 4.2 การกระจายแบบปกติของค่า Residual พบว่าค่า Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ให้ประมาณได้ว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4.2 การกระจายแบบปกติของค่า Residual

4.2.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่า Residual

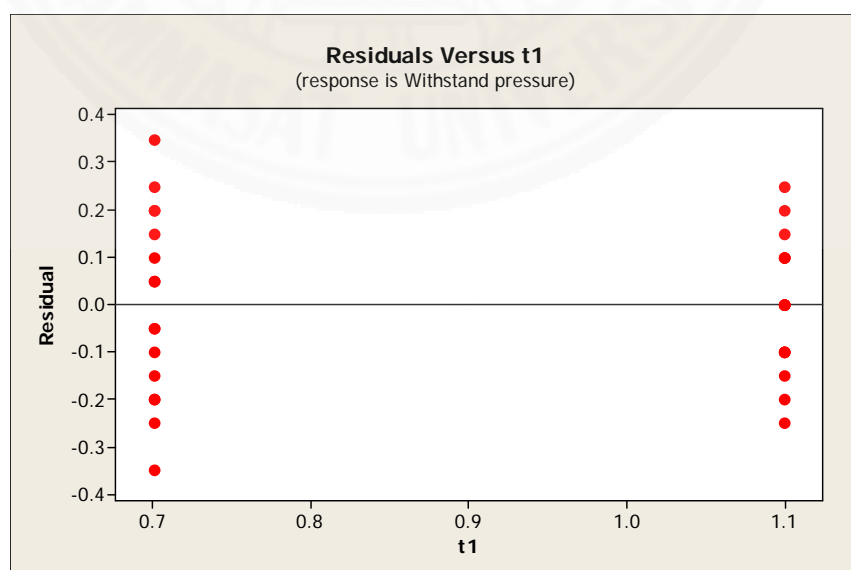
โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย จากภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่าการกระจายตัวของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่า Residual มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



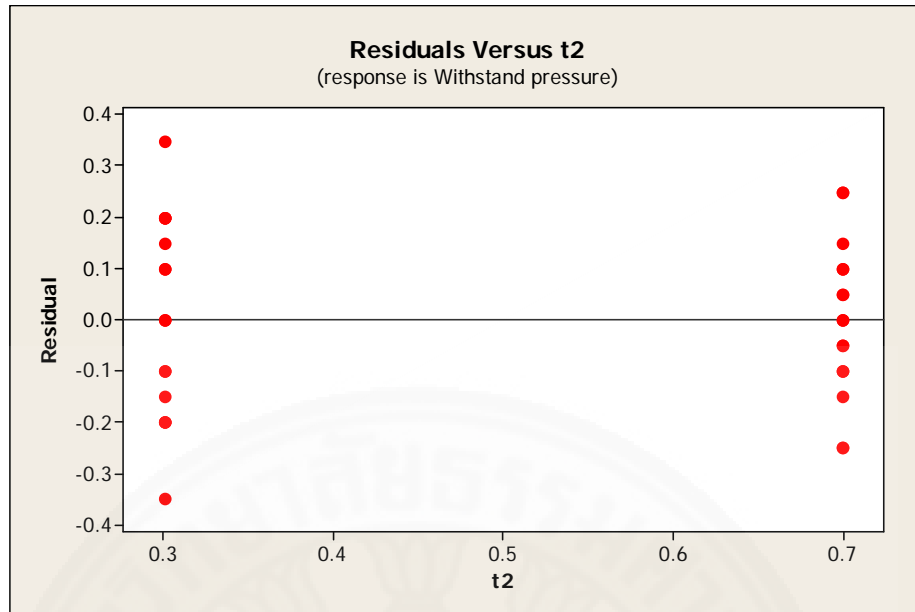
ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order

4.2.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals

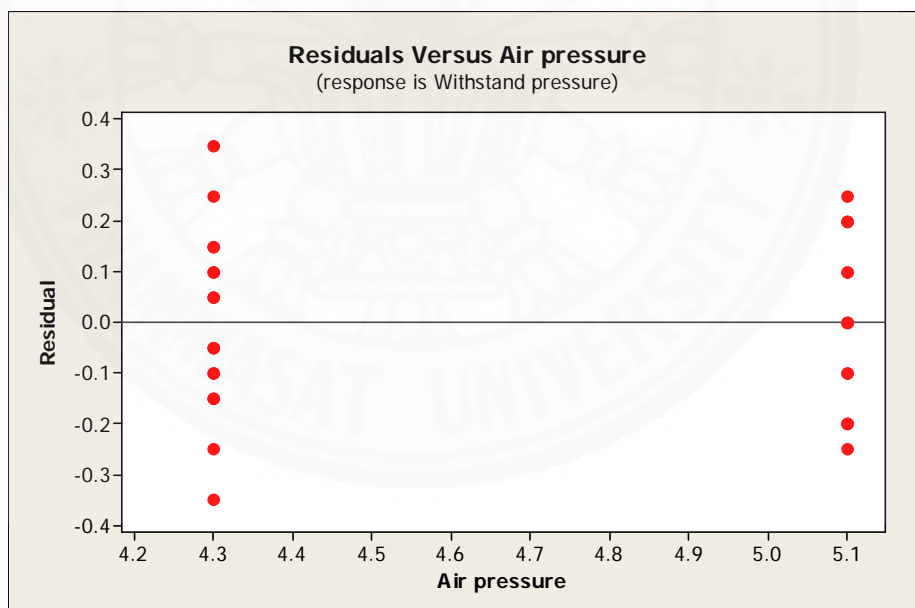
ทำการพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4.4 ถึงภาพที่ 4.7 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่า Residual เทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัว ซึ่งพบว่าค่า Residual ในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residuals มีค่าใกล้เคียงกัน



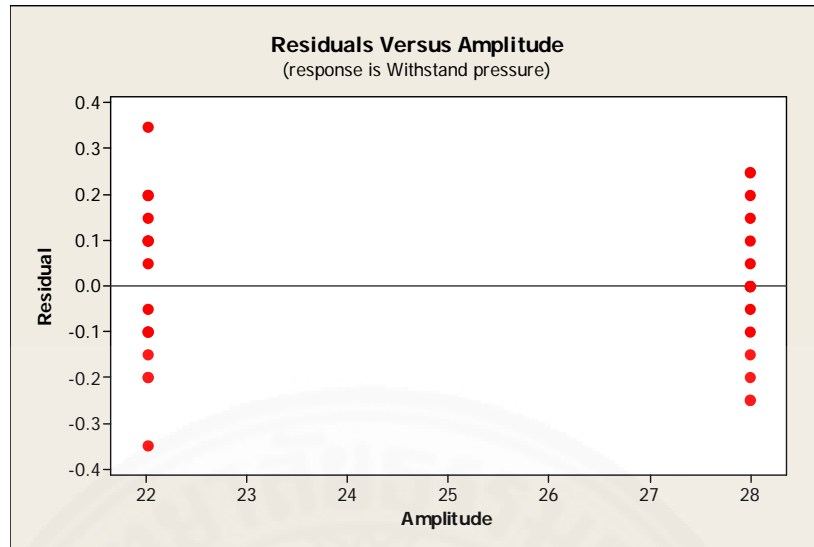
ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t1



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t2



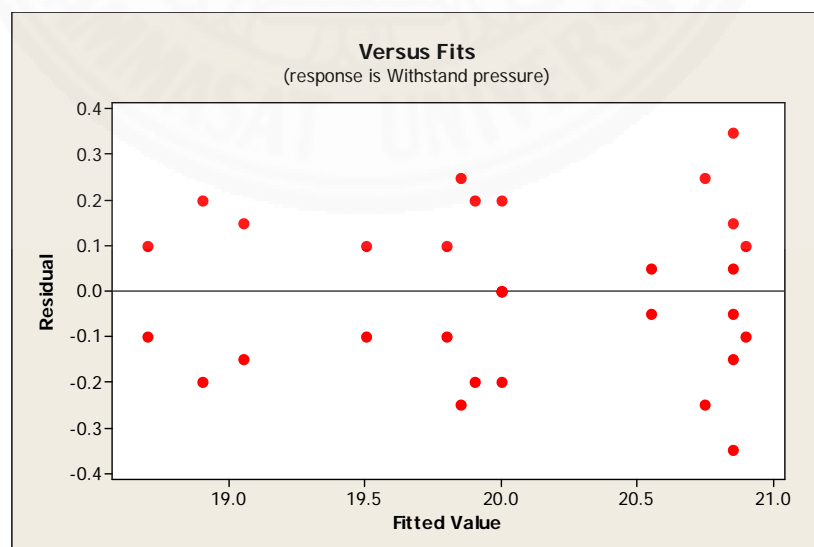
ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Air pressure



ภาพที่ 4.7 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Amplitude

4.2.1.4 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals

พิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย จากภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่า Residual เทียบกับ Fitted Value พบว่า σ^2 ของค่า Residual มีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของ Residuals เข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพง (outward-opening funnel or megaphone) แต่อย่างใด



ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Fitted Value

ในการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง เป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมดว่ามีผลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) นั้นมีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยในที่นี้กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) โดยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้ายอมรับสมมติฐานหลัก ($P\text{-Value} > \alpha$) แสดงว่าอิทธิพลของปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) และหากมีการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ($P\text{-Value} < \alpha$) แสดงว่าอิทธิพลของปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure)

จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติวิศวกรรมของความแปรปรวนของผลการทดสอบความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ในตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง , แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยในภาพที่ 4.9, กราฟแสดง Normal Probability Plot of the Effects ในภาพที่ 4.10 , กราฟแสดงอิทธิพลหลัก 4 ปัจจัยในภาพที่ 4.11 และกราฟแสดงอิทธิพลร่วม 2 ระดับในภาพที่ 4.12 พบว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1), แรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) และระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) นั้น มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 และเกิดอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยคือระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1) กับระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude), ส่วนปัจจัยที่เหลือคือ ค่าระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง (t2) นั้นไม่มีนัยสำคัญหรือไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure)

ตารางที่ 4.2

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น

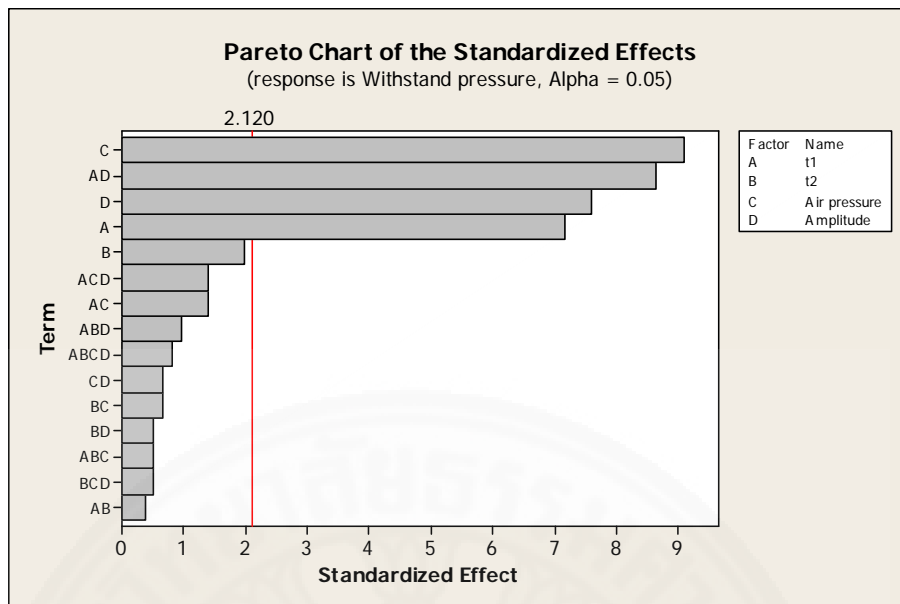
Estimated Effects and Coefficients for Withstand pressure (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		20.0281	0.04227	473.77	0.000
t1	-0.6063	-0.3031	0.04227	-7.17	0.000
t2	-0.1688	-0.0844	0.04227	-2.00	0.063
Air pressure	-0.7687	-0.3844	0.04227	-9.09	0.000
Amplitude	0.6438	0.3219	0.04227	7.61	0.000
t1*t2	-0.0313	-0.0156	0.04227	-0.37	0.717
t1*Air pressure	0.1188	0.0594	0.04227	1.40	0.179
t1*Amplitude	0.7313	0.3656	0.04227	8.65	0.000
t2*Air pressure	0.0563	0.0281	0.04227	0.67	0.515
t2*Amplitude	0.0438	0.0219	0.04227	0.52	0.612
Air pressure*Amplitude	-0.0563	-0.0281	0.04227	-0.67	0.515
t1*t2*Air pressure	0.0438	0.0219	0.04227	0.52	0.612
t1*t2*Amplitude	0.0812	0.0406	0.04227	0.96	0.351
t1*Air pressure*Amplitude	-0.1188	-0.0594	0.04227	-1.40	0.179
t2*Air pressure*Amplitude	0.0437	0.0219	0.04227	0.52	0.612
t1*t2*Air pressure*Amplitude	-0.0688	-0.0344	0.04227	-0.81	0.428

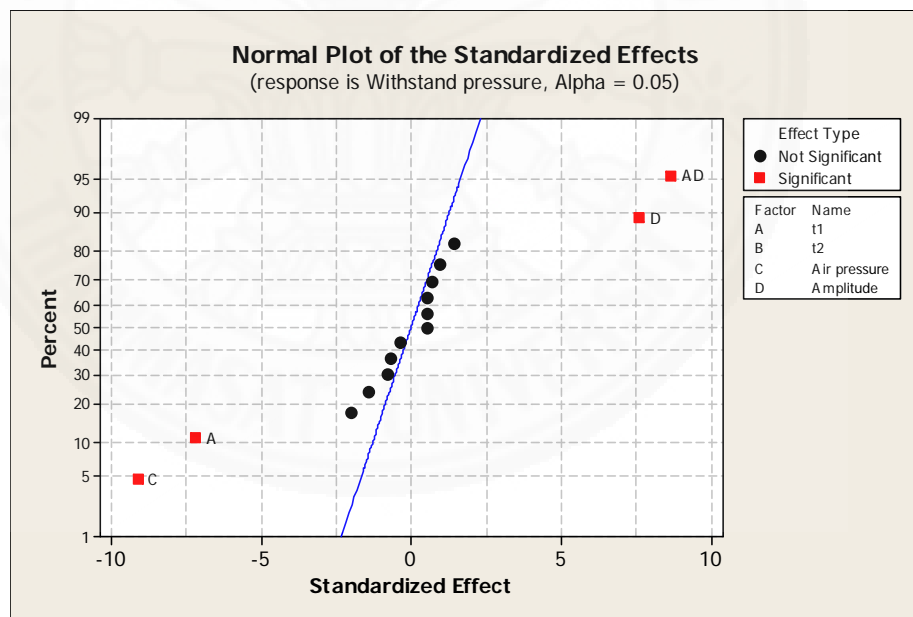
S = 0.239139 PRESS = 3.66
R-Sq = 94.56% R-Sq(pred) = 78.25% R-Sq(adj) = 89.46%

Analysis of Variance for Withstand pressure (coded units)

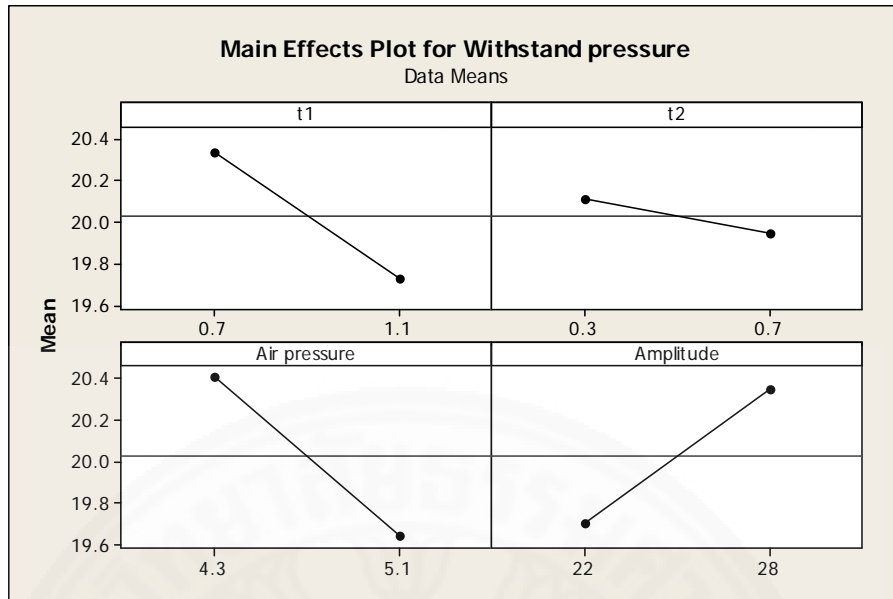
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	11.2112	11.2113	2.80281	49.01	0.000
t1	1	2.9403	2.9403	2.94031	51.42	0.000
t2	1	0.2278	0.2278	0.22781	3.98	0.063
Air pressure	1	4.7278	4.7278	4.72781	82.67	0.000
Amplitude	1	3.3153	3.3153	3.31531	57.97	0.000
2-Way Interactions	6	4.4644	4.4644	0.74406	13.01	0.000
t1*t2	1	0.0078	0.0078	0.00781	0.14	0.717
t1*Air pressure	1	0.1128	0.1128	0.11281	1.97	0.179
t1*Amplitude	1	4.2778	4.2778	4.27781	74.80	0.000
t2*Air pressure	1	0.0253	0.0253	0.02531	0.44	0.515
t2*Amplitude	1	0.0153	0.0153	0.01531	0.27	0.612
Air pressure*Amplitude	1	0.0253	0.0253	0.02531	0.44	0.515
3-Way Interactions	4	0.1963	0.1963	0.04906	0.86	0.510
t1*t2*Air pressure	1	0.0153	0.0153	0.01531	0.27	0.612
t1*t2*Amplitude	1	0.0528	0.0528	0.05281	0.92	0.351
t1*Air pressure*Amplitude	1	0.1128	0.1128	0.11281	1.97	0.179
t2*Air pressure*Amplitude	1	0.0153	0.0153	0.01531	0.27	0.612
4-Way Interactions	1	0.0378	0.0378	0.03781	0.66	0.428
t1*t2*Air pressure*Amplitude	1	0.0378	0.0378	0.03781	0.66	0.428
Residual Error	16	0.9150	0.9150	0.05719		
Pure Error	16	0.9150	0.9150	0.05719		
Total	31	16.8247				



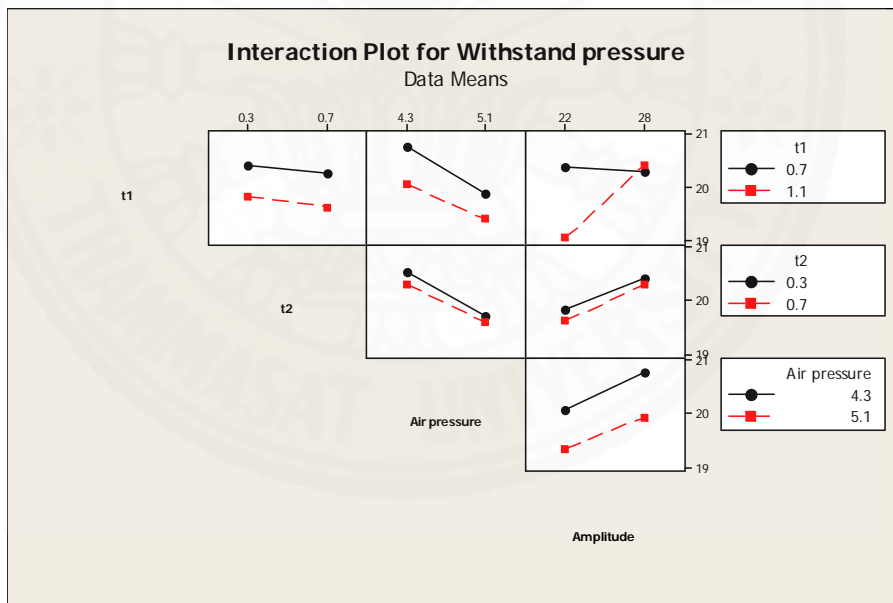
ภาพที่ 4.9 แผนภูมิพารेटอ (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย



ภาพที่ 4.10 Normal Probability Plot of the Effects



ภาพที่ 4.11 กราฟของอิทธิพลหลัก 2 ระดับ



ภาพที่ 4.12 กราฟของอิทธิพลร่วม 2 ระดับ

4.4 การทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง

เมื่อทำการกรองปัจจัยและเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองได้แล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้งหมดมาดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response-Surface Methodology) โดยในที่นี้จะใช้การทดลองแบบ Box-Behnken Design ทั้งนี้เนื่องจากเนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านทรัพยากร, เวลาและงบประมาณ โดยกำหนด Center Point = 3 เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยกับค่าตอบสนอง และหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ (Replication) เท่ากับ 3 ที่ระดับปัจจัยในการทดลองแต่ละการทดลอง (Run) ซึ่งจะทำให้มีจำนวนครั้งของการทดลอง (Runs) ทั้งหมดเท่ากับ 45 ครั้ง

การทดลองแบบนี้จะเห็นได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่าการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design คือไม่ต้องมีจุด Star ที่ทำให้ต้องปรับระดับของปัจจัยให้ละเอียดมากกว่าเดิมที่ต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นในการ Calibration sensors ของ Air pressure, Calibration sensors ของ Amplitude ซึ่งมีจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ และระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ จะนำระดับปัจจัยที่เคยทำการทดลองในหัวข้อที่ 3.4 มาทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Medium) ให้กับปัจจัยแต่ละตัว ตามหลักของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในส่วนขั้นตอนของการดำเนินการทดลอง,วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดสอบผลการทดลอง จะมีวิธีการและขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการทดลอง Full-Factorial ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.5 ถึง 3.6 ส่วนรายละเอียดของระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนองจะแสดงในตารางที่ 4-3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนองและการทดลองแบบ Box-Behnken Design with 3 center point ที่มี 3 ตัวแปรจะแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3

ระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนอง

ปัจจัย (Factor)	ช่วงของปัจจัย (Range)	ต่ำ (Low)	กลาง (Medium)	สูง (High)	หน่วย (Unit)
t1	0.6 - 1.2	0.7	0.9	1.1	วินาที (Second)
Air pressure	4.0 - 5.5	4.3	4.7	5.1	บาร์ (Bar)
Amplitude	20 - 30	22	25	28	ไมโครเมตร (μm)

ตารางที่ 4.4

การทดลอง Box-Behnken Design with 3 Center Point ที่มี 3 ตัวแปร

RunOrder	t1	Air pressure	Amplitude	Withstand Pressure
1	0.7	4.3	25	20.1
2	1.1	4.3	25	20
3	0.7	5.1	25	19.3
4	1.1	5.1	25	19.3
5	0.7	4.7	22	18.8
6	1.1	4.7	22	18.6
7	0.7	4.7	28	20.2
8	1.1	4.7	28	19.8
9	0.9	4.3	22	19.1
10	0.9	5.1	22	18.3
11	0.9	4.3	28	20.8
12	0.9	5.1	28	19.4
13	0.9	4.7	25	20.5
14	0.9	4.7	25	20.4
15	0.9	4.7	25	20.4
16	0.7	4.3	25	20.4
17	1.1	4.3	25	20.1
17	1.1	4.3	25	20.1
18	0.7	5.1	25	19.3
19	1.1	5.1	25	19
20	0.7	4.7	22	18.6
21	1.1	4.7	22	18.5
22	0.7	4.7	28	20.1
23	1.1	4.7	28	19.9
24	0.9	4.3	22	18.9
25	0.9	5.1	22	18.3

ตารางที่ 4.4

การทดลอง Box-Behnken Design with 3 Center Point ที่มี 3 ตัวแปร (ต่อ)

RunOrder	t1	Air pressure	Amplitude	Withstand Pressure
26	0.9	4.3	28	20.7
27	0.9	5.1	28	19.4
28	0.9	4.7	25	20.4
29	0.9	4.7	25	20.5
30	0.9	4.7	25	20.4
31	0.7	4.3	25	20.2
32	1.1	4.3	25	19.9
33	0.7	5.1	25	19.2
34	1.1	5.1	25	19.1
35	0.7	4.7	22	18.7
36	1.1	4.7	22	18.7
37	0.7	4.7	28	20.1
38	1.1	4.7	28	19.8
39	0.9	4.3	22	19
40	0.9	5.1	22	18.4
41	0.9	4.3	28	20.8
42	0.9	5.1	28	19.6
43	0.9	4.7	25	20.4
44	0.9	4.7	25	20.4
45	0.9	4.7	25	20.3

4.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

เมื่อได้ทำการศึกษาและบันทึกข้อมูลต่างๆแล้ว งานในขั้นตอนถัดไป คือ การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแปลผลจากข้อมูลแล้วสรุปให้อยู่ในรูปแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการพยากรณ์หาค่าผลตอบสนอง

4.5.1 การพิจารณาในการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์

เพื่อใช้หาจุดเหมาะสมของค่าตอบสนอง ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลอง และข้อสรุปจากการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนการดำเนินการทดลองแบบ Box-Behnken Design ได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ โดยอาศัยโปรแกรม Minitab Version 16 ซึ่งเลือกรูปแบบสมการจากผลการวิเคราะห์ จะพิจารณาจาก

4.5.1.1 ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression)

ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression) คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบซึ่งในที่นี้คือ ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) กับเซตย่อยของตัวแปรถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หรือไม่ กำหนดให้ค่า $\alpha = 0.05$ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้ายอมรับสมมติฐานหลัก ($P\text{-Value} > \alpha$) และสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ที่กำลังพิจารณาอยู่ก็ไม่ควรจะถูกนำมาพิจารณาอีกต่อไป และหากมีการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ($P\text{-Value} < \alpha$) จะบอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หนึ่งตัว จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์

4.5.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ

4.5.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj})

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) ตามปกติแล้วมักจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงไปในการค่าของ (R^2_{adj}) จะมีค่าลดลงเสมอ

4.5.1.4 ค่า Lack - of - Fit

ค่า Lack-of-Fit เป็นตัวบอกความเพียงพอของตัวแปรในสมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นถ้าค่า $P\text{-Value} < \alpha$ รูปแบบของสมการถดถอยที่จะนำมาพิจารณานี้มีอยู่ด้วยกัน 4 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่

1. รูปแบบสมการพหุคูณควอดราติก (Full Quadratic)
2. รูปแบบสมการลิเนียร์กับอินเตอร์แอคชั่น (Linear + Interaction)
3. รูปแบบสมการลิเนียร์กับสแควร์ (Linear + Squares)

4. รูปแบบสมการเส้นตรง (Linear)

รายละเอียดในการวิเคราะห์ของสมการถดถอยในแต่ละรูปแบบนั้น อธิบายได้ดังหัวข้อ 4.5.2 ถึงหัวข้อ 4.5.5

4.5.2 รูปแบบสมการพหุคูณกำลังสอง (Full Quadratic)

รูปแบบสมการพหุคูณกำลังสอง (Full Quadratic) โดยที่มีเทอมของ t_1 , Air pressure, Amplitude, (t_1*t_1), (Air pressure*Air pressure), (Amplitude*Amplitude), (t_1 *Air pressure), (t_1 *Amplitude), (Air pressure*Amplitude) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบพหุคูณกำลังสอง (Full Quadratic)

ตารางที่ 4.5

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบพหุคูณกำลังสอง (Full Quadratic)

Estimated Regression Coefficients for Withstand Pressure						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	20.4111	0.03033	673.025	0.000		
t_1	-0.0958	0.01857	-5.160	0.000		
Air pressure	-0.4750	0.01857	-25.577	0.000		
Amplitude	0.6958	0.01857	37.467	0.000		
t_1*t_1	-0.4139	0.02734	-15.140	0.000		
Air pressure*Air pressure	-0.3389	0.02734	-12.397	0.000		
Amplitude*Amplitude	-0.6806	0.02734	-24.895	0.000		
t_1 *Air pressure	0.0250	0.02626	0.952	0.348		
t_1 *Amplitude	-0.0500	0.02626	-1.904	0.065		
Air pressure*Amplitude	-0.1583	0.02626	-6.028	0.000		

S = 0.0909823 PRESS = 0.500266
R-Sq = 98.85% R-Sq(pred) = 98.02% R-Sq(adj) = 98.56%

Analysis of Variance for Withstand Pressure						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	24.9423	24.9423	2.7714	334.80	0.000
Linear	3	17.2558	17.2558	5.7519	694.87	0.000
t_1	1	0.2204	0.2204	0.2204	26.63	0.000
Air pressure	1	5.4150	5.4150	5.4150	654.16	0.000
Amplitude	1	11.6204	11.6204	11.6204	1403.81	0.000
Square	3	7.3481	7.3481	2.4494	295.90	0.000
t_1*t_1	1	1.3029	1.8975	1.8975	229.23	0.000
Air pressure*Air pressure	1	0.9149	1.2721	1.2721	153.68	0.000
Amplitude*Amplitude	1	5.1303	5.1303	5.1303	619.77	0.000
Interaction	3	0.3383	0.3383	0.1128	13.62	0.000
t_1 *Air pressure	1	0.0075	0.0075	0.0075	0.91	0.348
t_1 *Amplitude	1	0.0300	0.0300	0.0300	3.62	0.065
Air pressure*Amplitude	1	0.3008	0.3008	0.3008	36.34	0.000
Residual Error	35	0.2897	0.2897	0.0083		
Lack-of-Fit	3	0.0275	0.0275	0.0092	1.12	0.356
Pure Error	32	0.2622	0.2622	0.0082		
Total	44	25.2320				

จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ดังในตารางที่ 4-5 พบว่าสมการในเทอม Full Quadratic ให้ค่า $R^2 = 98.85\%$ และค่า $R^2_{adj} = 98.56\%$ จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0 ซึ่ง $< \alpha$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในเทอม Full Quadratic มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.356 ซึ่ง $> \alpha$ จึงสรุปว่าเทอมของสมการ Full Quadratic มีความพอเพียงและมีฟังก์ชันการถดถอยเป็นเชิงเส้น

4.5.3 รูปแบบสมการลิเนียร์ร่วมกับอินเตอร์แอคชัน (Linear + Interaction)

รูปแบบสมการลิเนียร์ร่วมกับอินเตอร์แอคชัน (Linear + Interaction) โดยที่มีเทอมของ t1, Air pressure, Amplitude, (t1*Air pressure), (t1*Amplitude) และ (Airpressure*Amplitude) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบลิเนียร์กับอินเตอร์แอคชัน (Linear + Interaction)

ตารางที่ 4.6

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลิเนียร์กับอินเตอร์แอคชัน (Linear + Interaction)

Estimated Regression Coefficients for Withstand Pressure

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19.6467	0.06683	293.969	0.000
t1	-0.0958	0.09151	-1.047	0.302
Air pressure	-0.4750	0.09151	-5.190	0.000
Amplitude	0.6958	0.09151	7.604	0.000
t1*Air pressure	0.0250	0.12942	0.193	0.848
t1*Amplitude	-0.0500	0.12942	-0.386	0.701
Air pressure*Amplitude	-0.1583	0.12942	-1.223	0.229

S = 0.448325 PRESS = 9.10268

R-Sq = 69.73% R-Sq(pred) = 63.92% R-Sq(adj) = 64.95%

Estimated Regression Coefficients for Withstand Pressure

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19.6467	0.06683	293.969	0.000
t1	-0.0958	0.09151	-1.047	0.302
Air pressure	-0.4750	0.09151	-5.190	0.000
Amplitude	0.6958	0.09151	7.604	0.000
t1*Air pressure	0.0250	0.12942	0.193	0.848
t1*Amplitude	-0.0500	0.12942	-0.386	0.701
Air pressure*Amplitude	-0.1583	0.12942	-1.223	0.229

S = 0.448325 PRESS = 9.10268
R-Sq = 69.73% R-Sq(pred) = 63.92% R-Sq(adj) = 64.95%

Analysis of Variance for Withstand Pressure

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	17.5942	17.5942	2.9324	14.59	0.000
Linear	3	17.2558	17.2558	5.7519	28.62	0.000
t1	1	0.2204	0.2204	0.2204	1.10	0.302
Air pressure	1	5.4150	5.4150	5.4150	26.94	0.000
Amplitude	1	11.6204	11.6204	11.6204	57.81	0.000
Interaction	3	0.3383	0.3383	0.1128	0.56	0.644
t1*Air pressure	1	0.0075	0.0075	0.0075	0.04	0.848
t1*Amplitude	1	0.0300	0.0300	0.0300	0.15	0.701
Air pressure*Amplitude	1	0.3008	0.3008	0.3008	1.50	0.229
Residual Error	38	7.6378	7.6378	0.2010		
Lack-of-Fit	6	7.3756	7.3756	1.2293	150.01	0.000
Pure Error	32	0.2622	0.2622	0.0082		
Total	44	25.2320				

จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ดังในตารางที่ 4-6 พบว่าสมการในเทอม Linear + Interaction ให้ค่า $R^2 = 69.73\%$ และค่า $R^2_{adj} = 64.95\%$ จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0 ซึ่ง $< \alpha$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในเทอม Linear + Interaction มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.000 ซึ่ง $< \alpha$ จึงสรุปว่าเทอมของสมการ Linear + Interaction ไม่มีความพอเพียงและไม่มีฟังก์ชันการถดถอยเป็นเชิงเส้น

4.5.4 รูปแบบสมการลิเนียร์กับสแควร์ (Linear + Squares)

รูปแบบสมการลิเนียร์กับสแควร์ (Linear + Squares) โดยที่มีเทอมของ t1, Air pressure, Amplitude, (t1*t1), (Air pressure*Air pressure), และ (Amplitude*Amplitude),

ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบ
 ลีเนียร์กับสแควร์ (Linear + Squares)

ตารางที่ 4.7

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลีเนียร์กับสแควร์ (Linear + Squares)

Estimated Regression Coefficients for Withstand Pressure

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	20.4111	0.04285	476.300	0.000
t1	-0.0958	0.02624	-3.652	0.001
Air pressure	-0.4750	0.02624	-18.101	0.000
Amplitude	0.6958	0.02624	26.516	0.000
t1*t1	-0.4139	0.03863	-10.715	0.000
Air pressure*Air pressure	-0.3389	0.03863	-8.773	0.000
Amplitude*Amplitude	-0.6806	0.03863	-17.618	0.000

S = 0.128560 PRESS = 0.899363

R-Sq = 97.51% R-Sq(pred) = 96.44% R-Sq(adj) = 97.12%

Analysis of Variance for Withstand Pressure

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	24.6039	24.6039	4.1007	248.11	0.000
Linear	3	17.2558	17.2558	5.7519	348.02	0.000
t1	1	0.2204	0.2204	0.2204	13.34	0.001
Air pressure	1	5.4150	5.4150	5.4150	327.63	0.000
Amplitude	1	11.6204	11.6204	11.6204	703.08	0.000
Square	3	7.3481	7.3481	2.4494	148.20	0.000
t1*t1	1	1.3029	1.8975	1.8975	114.81	0.000
Air pressure*Air pressure	1	0.9149	1.2721	1.2721	76.97	0.000
Amplitude*Amplitude	1	5.1303	5.1303	5.1303	310.41	0.000
Residual Error	38	0.6281	0.6281	0.0165		
Lack-of-Fit	6	0.3658	0.3658	0.0610	7.44	0.000
Pure Error	32	0.2622	0.2622	0.0082		
Total	44	25.2320				

จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ดังในตารางที่ 4.7 พบว่า
 สมการในเทอม Linear + Squares ให้ค่า $R^2 = 97.51\%$ และค่า $R^2_{adj} = 97.12\%$ จึงเป็น
 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0 ซึ่ง $< \alpha$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปว่า
 ฟังก์ชันการถดถอยในเทอม Linear + Squares มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และอย่างน้อยที่สุดตัวแปร
 ถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองสมการทาง
 คณิตศาสตร์

จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.000 ซึ่ง $< \alpha$ จึงสรุปว่าเทอมของสมการ Linear + Squares ไม่มีความพอเพียงและไม่มีฟังก์ชันการถดถอยเป็นเชิงเส้น

4.5.5 รูปแบบสมการลิเนียร์ (Linear)

รูปแบบสมการลิเนียร์ (Linear) โดยที่มีเทอมของ A, B, C และ D ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบลิเนียร์ (Linear)

ตารางที่ 4.8

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของสมการแบบลิเนียร์ (Linear)

Estimated Regression Coefficients for Withstand Pressure

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19.6467	0.06575	298.806	0.000
t1	-0.0958	0.09003	-1.064	0.293
Air pressure	-0.4750	0.09003	-5.276	0.000
Amplitude	0.6958	0.09003	7.729	0.000

S = 0.441068 PRESS = 8.89112
R-Sq = 68.39% R-Sq(pred) = 64.76% R-Sq(adj) = 66.08%

Analysis of Variance for Withstand Pressure

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	17.2558	17.2558	5.7519	29.57	0.000
Linear	3	17.2558	17.2558	5.7519	29.57	0.000
t1	1	0.2204	0.2204	0.2204	1.13	0.293
Air pressure	1	5.4150	5.4150	5.4150	27.83	0.000
Amplitude	1	11.6204	11.6204	11.6204	59.73	0.000
Residual Error	41	7.9762	7.9762	0.1945		
Lack-of-Fit	9	7.7139	7.7139	0.8571	104.60	0.000
Pure Error	32	0.2622	0.2622	0.0082		
Total	44	25.2320				

จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ดังในตารางที่ 4-7 พบว่าสมการในเทอม Linear ให้ค่า $R^2 = 68.39\%$ และค่า $R^2_{adj} = 66.08\%$ จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0 ซึ่ง $< \alpha$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในเทอม Linear มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย t1, Air pressure, Amplitude หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.000 ซึ่ง $< \alpha$ จึงสรุปว่าเทอมของสมการ Linear ไม่มีความพอเพียงและไม่มีฟังก์ชันการถดถอยเป็นเชิงเส้น

การเลือกแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดนั้นจะพิจารณาที่ค่า R^2 , R^2_{adj} Regression P-Value และ Lack-of-Fit P-Value ระหว่างเทอมของ Full Quadratic, Linear + Interaction, Linear + Squares และ Linear ดังแสดงสรุปข้อมูลของสมการถดถอยในแต่ละรูปแบบในตารางที่ 4.9 และเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลพบว่าเทอม Full Quadratic จะมีค่า R^2 , R^2_{adj} , Regression P-Value และ Lack-of-Fit P-Value ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.9

สรุปข้อมูลของสมการถดถอยในแต่ละรูปแบบ

term	R	Radj	Regression P-Value	Lack-of-Fit P-Value
Full Quadratic	99.85%	98.56%	0	0.356
Linear+Interaction	69.73%	64.95%	0	0
Linear+Square	97.51%	97.12%	0	0
Linear	68.39%	66.08%	0	0

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ในเทอมของ Full-Quadratic มาใช้ในการพยากรณ์หาจุดสูงสุดของค่า withstand pressure ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์นั้น ได้นำมาแสดงในตารางที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 4.10

ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

Term	Coefficient
Constant	-97.8615
t1	18.7604
Air Pressure	21.7396
Amplitude	4.70795
t1 ²	-10.3472
Air Pressure ²	-2.11806
Amplitude ²	-0.0756173
t1* Air Pressure	0.312500
t1* Amplitude	-0.0833333
Air Pressure*Amplitude	-0.131944

โดยมีแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 4-1

สมการที่ 4-1

$$Y = -97.8615 + 18.7604 (t1) + 21.7396 (\text{Air Pressure}) + 4.70795 (\text{Amplitude}) - 10.3472 (t1^2) - 2.11806 (\text{Air Pressure}^2) - 0.0756173 (\text{Amplitude}^2) + 0.312500 (t1 * \text{Air Pressure}) - 0.0833333 (t1 * \text{Amplitude}) - 0.131944 (\text{Air Pressure} * \text{Amplitude})$$

โดยที่แต่ละปัจจัยมีข้อจำกัดดังนี้

$$t1: 0.7 \leq t1 \leq 1.1 \text{ วินาที (Second)}$$

$$\text{Air pressure: } 4.3 \leq \text{Air Pressure} \leq 5.1 \text{ บาร์ (Bar)}$$

$$\text{Amplitude: } 22 \leq \text{Amplitude} \leq 28 \text{ ไมโครเมตร } (\mu\text{m})$$

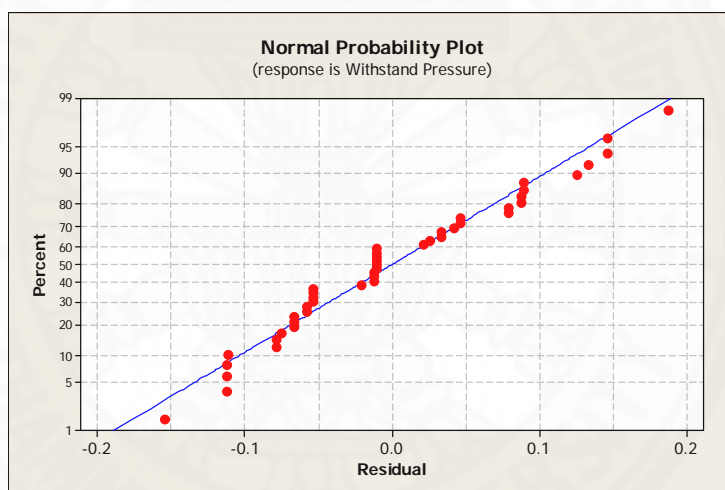
4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่า

รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง ต้องเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \approx NID(0, \sigma^2)$ คือ Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.6.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของ Residuals

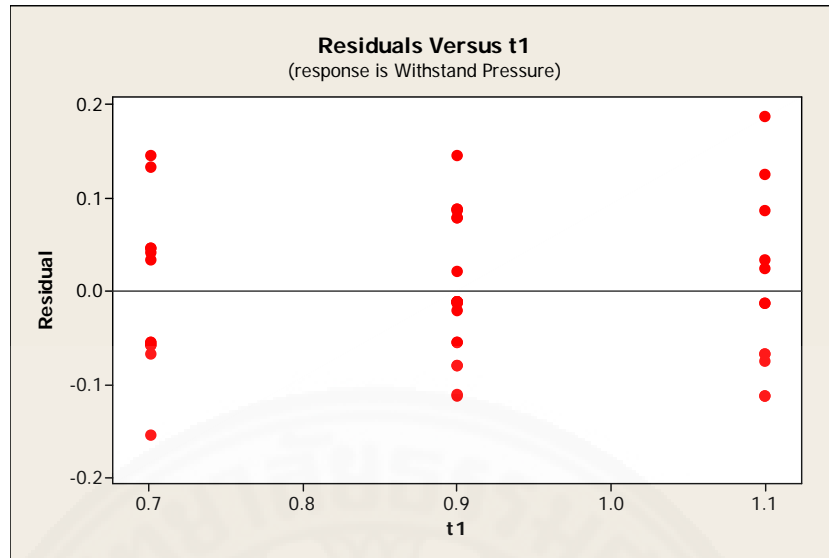
จากการพิจารณาการกระจายของค่า Residual ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ในภาพที่ 4.13 พบว่าค่า Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ให้ประมาณได้ว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ



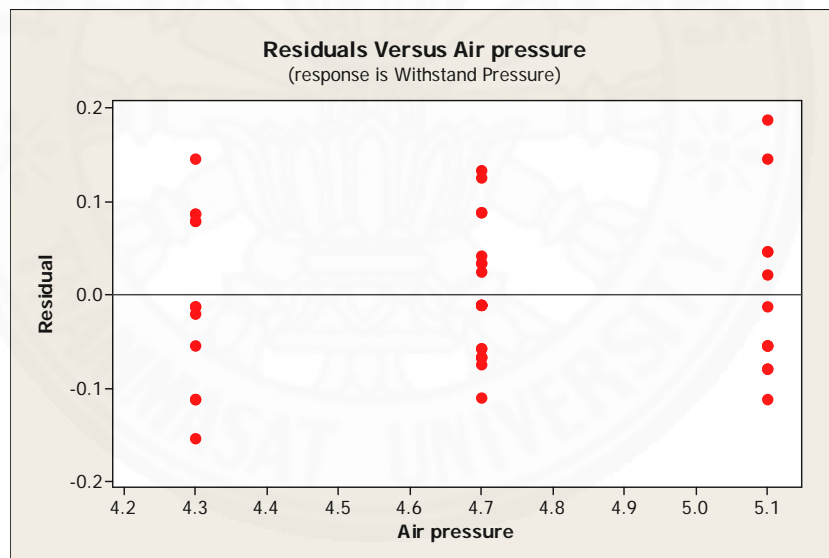
ภาพที่ 4.13 การกระจายแบบปกติของค่า Residual (Box-Behnken)

4.6.2 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals

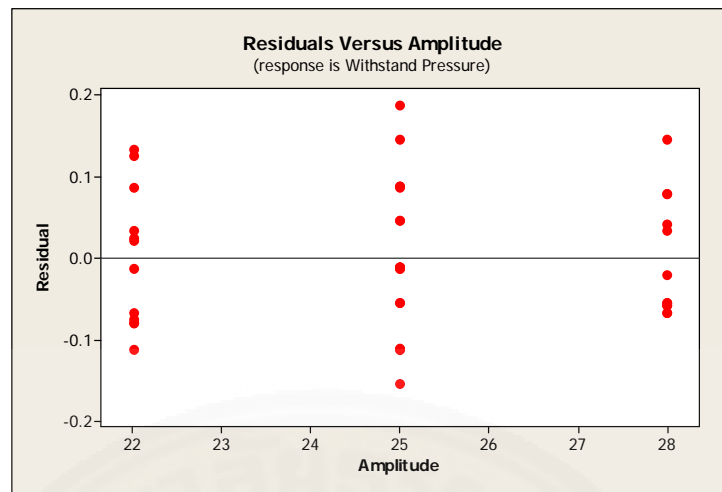
การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4.14 ถึงภาพที่ 4.16 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่า Residual เทียบกับ ระดับของปัจจัยทุกตัว ซึ่งพบว่า Residual ในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายทางด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residuals มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ t1 (Box-Behnken)



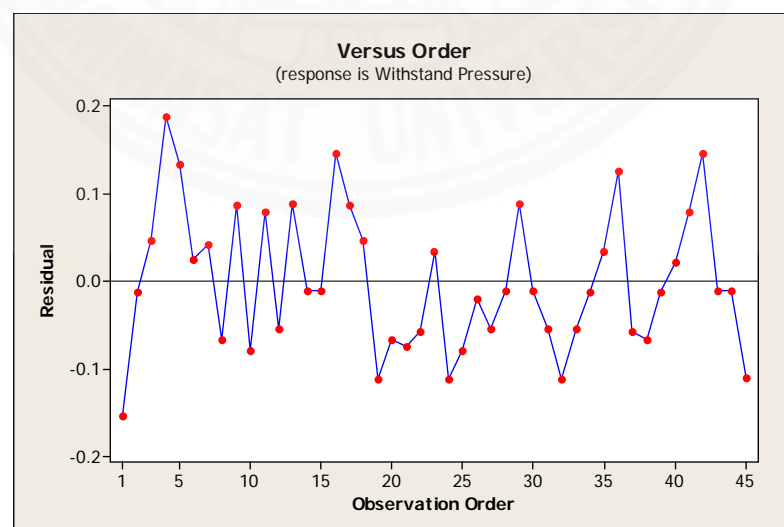
ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Air Pressure (Box-Behnken)



ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Amplitude (Box-Behnken)

4.6.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order ในภาพที่ 4.17 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่าการกระจายตัวของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่า Residual มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



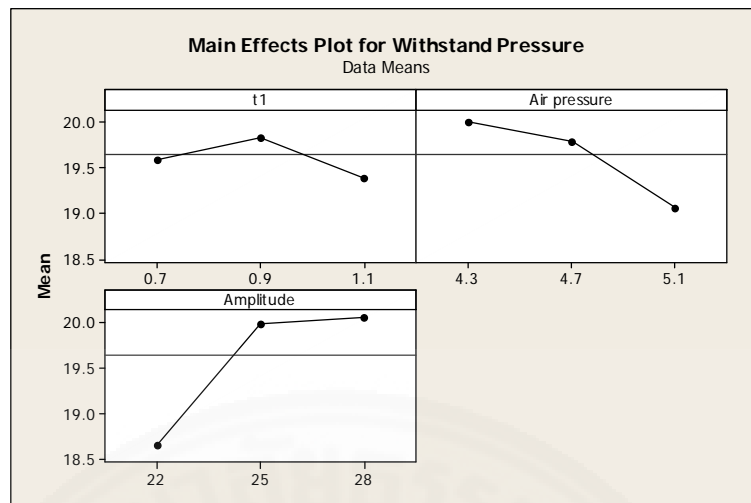
ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order (Box-Behnken)

การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง เป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้น สรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟของอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยจากภาพที่ 4.18 จะพบว่าค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อปรับระดับของระยะเวลาที่มีบีบท่อทองแดง (t_1) ให้อยู่ในระดับสูงสุด เมื่อทำการปรับ t_1 จากระดับต่ำไปที่ระดับกลาง จะทำให้ค่า Withstand pressure จะค่อยๆเพิ่มขึ้น และมีค่า Withstand pressure มากที่สุด และพบว่าเมื่อปรับ t_1 ไปที่ระดับต่ำสุดจะได้ให้ค่า Withstand pressure มีค่ามากกว่าเมื่อปรับ t_1 อยู่ในระดับสูงสุด

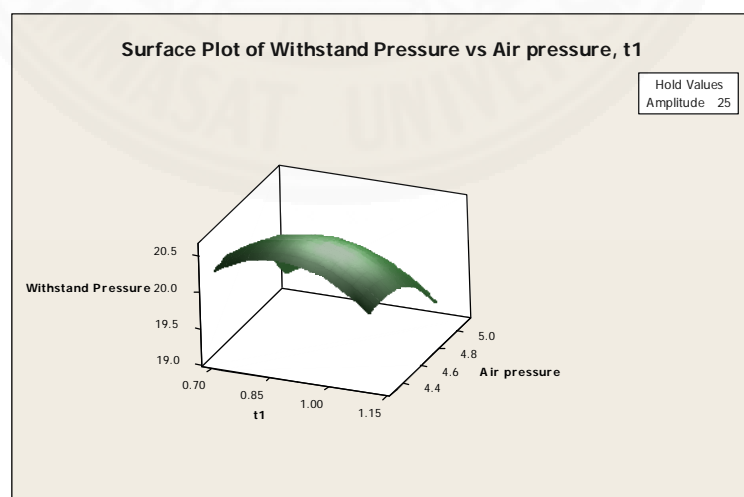
จากอิทธิพลของค่าระดับแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) พบว่าเมื่อปรับให้ระดับของ Air pressure อยู่ระดับต่ำจะทำให้ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มากที่สุด, เมื่อมีการปรับระดับของ Air pressure ไปที่ระดับกลางจะทำให้ค่า Withstand pressure ลดลงและเมื่อปรับ Air pressure ให้อยู่ในระดับสูงสุดพบว่าค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีค่าน้อยที่สุด

จากอิทธิพลของค่าระดับระยะเวลาการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) จะพบว่าค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อปรับระดับของ Amplitude ให้อยู่ในระดับต่ำสุด เมื่อทำการปรับจากระดับต่ำขึ้นไปที่ระดับกลาง จะทำให้ค่า Withstand pressure เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หากปรับระดับ Amplitude ให้สูงขึ้นไปถึงระดับที่มากที่สุด ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนทำให้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีค่ามากที่สุดด้วย



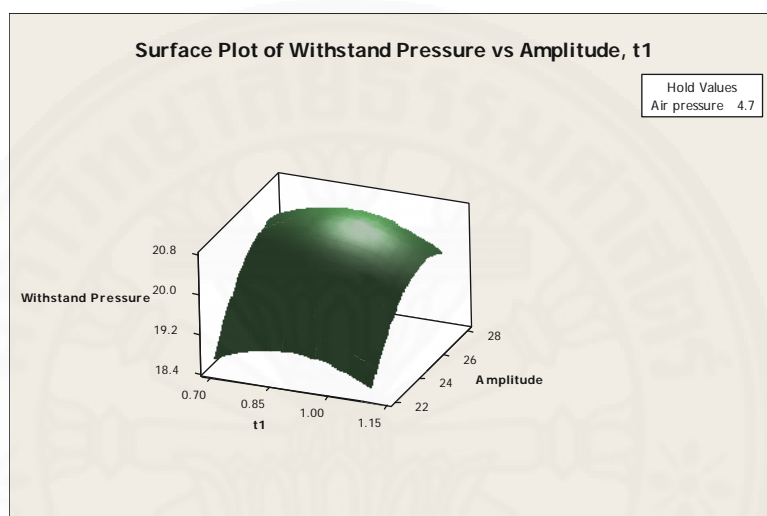
ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟของอิทธิพลหลัก 3 ระดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ t1 โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้ Amplitude คงไว้ที่ระดับกลาง ดังภาพที่ 4.19 แสดงพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ t1 พบว่าถ้า Air pressure อยู่ระดับต่ำ, t1 อยู่ระดับกลาง จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในระดับสูง และถ้า Air pressure อยู่ระดับสูง, t1 อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในระดับต่ำ



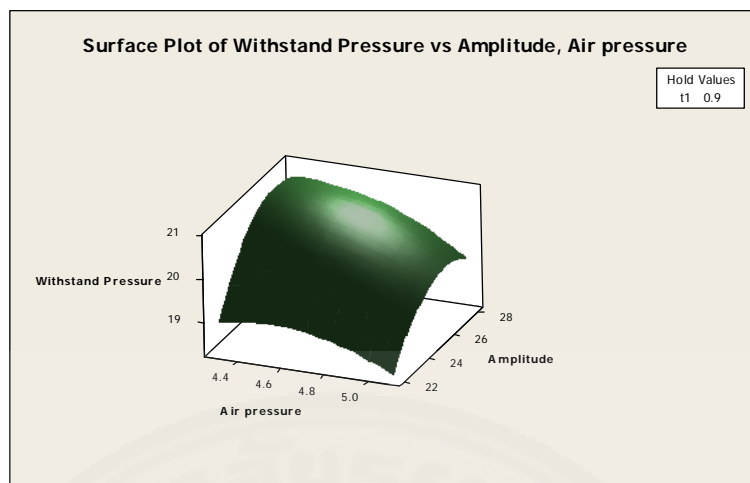
ภาพที่ 4.19 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ t1

เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Amplitude กับ t_1 โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้ Air pressure คงไว้ที่ระดับกลาง ดังภาพที่ 4.20 แสดง พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Amplitude กับ t_1 พบว่าถ้า Amplitude อยู่ระดับสูง t_1 อยู่ระดับกลาง จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในระดับสูง และถ้า Amplitude อยู่ระดับต่ำ t_1 อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในระดับต่ำ



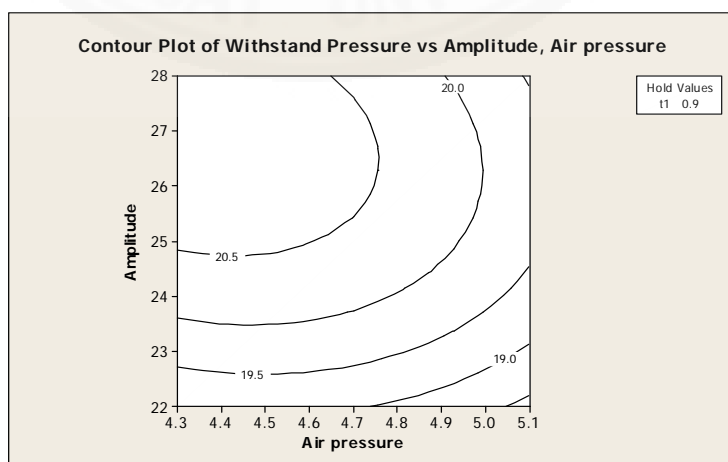
ภาพที่ 4.20 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Amplitude กับ t_1

เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Amplitude กับ Air pressure โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้ t_1 คงไว้ที่ระดับกลาง ดังภาพที่ 4.21 แสดง พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ Amplitude พบว่าถ้า Amplitude อยู่ระดับสูง, Air-pressure อยู่ระดับต่ำ จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand- pressure) อยู่ในระดับสูง และถ้า Amplitude อยู่ระดับต่ำ Air pressure อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในระดับต่ำ



ภาพที่ 4.21 พื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ Amplitude

เมื่อนำกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง Air pressure กับ Amplitude มาแสดงในลักษณะของกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และกำหนดให้ระดับของ Air pressure อยู่ที่ระดับสูงสุด คือ ที่ 5.1 จะเห็นได้ชัดถึงความสัมพันธ์ของ Air pressure และ Amplitude ที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 4.22 แสดงกราฟโครงร่าง (Contour Plot) ของระดับปัจจัยเทียบกับค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ซึ่งเส้นด้านล่างสุดจะแสดงถึงค่า Withstand pressure เท่ากับ 18.5 เมกะปาสคาล (MPa) ส่วนเส้นที่ถัดออกมาทางด้านบนขึ้นไปจะแสดงถึงค่า Withstand pressure ที่เพิ่มขึ้น คือ 19 เมกะปาสคาล (MPa) จนถึง 20.5 เมกะปาสคาล (MPa)



ภาพที่ 4.22 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) ของระดับปัจจัยเทียบกับ Withstand pressure

จากการใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ในการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยหลักทั้ง 3 ชนิดที่จะทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ที่มากที่สุด ทำให้ได้กราฟของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่า Withstand pressure ดังภาพที่ 4.23 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้มีค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดงสูงสุด โดยการใช้สมการที่ 4.1 (หน้า 24)

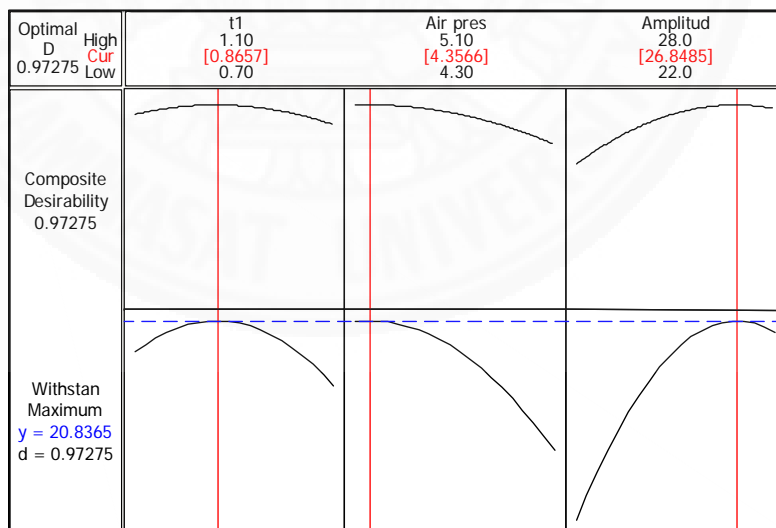
$$Y = -97.8615 + 18.7604 (t1) + 21.7396 (\text{Air Pressure}) + 4.70795 (\text{Amplitude}) - 10.3472 (t1^2) - 2.11806 (\text{Air Pressure}^2) - 0.0756173 (\text{Amplitude}^2) + 0.312500 (t1 * \text{Air Pressure}) - 0.0833333 (t1 * \text{Amplitude}) - 0.131944 (\text{Air Pressure} * \text{Amplitude})$$

โดยที่แต่ละปัจจัยมีข้อจำกัดดังนี้

ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1) : $0.7 \leq t1 \leq 1.1$ วินาที

ค่าแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) : $4.3 \leq \text{Air Pressure} \leq 5.1$ บาร์ (Bar)

ค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) : $22 \leq \text{Amplitude} \leq 28$ ไมโครเมตร (μm)



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้มีค่า Withstand pressure สูงสุด

การปรับตั้งค่าระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยแต่ละปัจจัยเป็นไปตามตารางที่ 4-11แสดง Output Optimization Point จากโปรแกรม คือ

1. ปรับค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1) ที่ 0.865 วินาที (Second)
2. ปรับแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) ที่ 4.356 บาร์ (Bar)
3. ปรับค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) ที่ 26.848 ไมโครเมตร (μm)

ตารางที่ 4.11

Output Optimization Point ที่ให้ค่า *Withstand pressure* สูงสุด

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Withstand Pr	Maximum	15	21	21	1	1

Global Solution

t1	=	0.865657
Air pressure	=	4.35657
Amplitude	=	26.8485

Predicted Responses

Withstand Pr	=	20.8365	,	desirability =	0.972747
--------------	---	---------	---	----------------	----------

Composite Desirability = 0.972747

ทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand-pressure) มีค่าประมาณ 20.84 เมกะปาสคาล (MPa) เมื่อนำระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองทั้งสิ้น 12 ครั้ง ได้ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 20.85 เมกะปาสคาล (MPa) โดยตารางที่ 4-12 แสดงการปรับตั้งค่าปัจจัยและค่า Withstand pressure และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างค่าที่ประมาณการกับค่าที่ได้จากการยืนยันผลแล้วพบว่ามีความน่าเชื่อถือมากซึ่งมีความ

คลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 1 ไปในทางค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 4.1

ตารางที่ 4.12

การปรับตั้งค่าปัจจัยที่ให้ค่า Withstand pressure สูงสุดและผลการทดสอบ

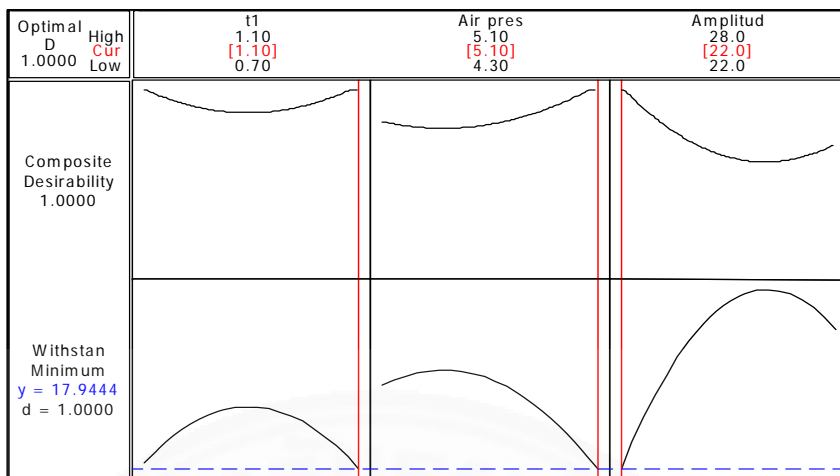
การปรับตั้งค่าปัจจัย			Withstand Pressure											
t1	Air pressure	Amplitude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.86	4.35	27	20.9	20.7	20.7	20.9	20.8	20.9	20.6	21	20.8	20.9	21.1	20.9

หมายเหตุ : การปรับปรับตั้งค่าปัจจัยไม่สามารถปรับตามที่กำหนดได้อย่างพอดีแต่จะเป็นค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดในด้านความละเอียดในการการปรับตั้งค่าและได้ผลค่า Withstand Pressure ตามที่ต้องการ

แต่ในความเป็นจริงนั้นในการปรับตั้งค่าแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดนั้น อาจทำให้ก่อให้เกิดความสึกหรอของชิ้นส่วนหลักๆเช่น Anvil, Sonotrode ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพงและทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

ในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัยได้เคยกล่าวไว้ว่าการเชื่อมต่อทองแดงแบบอัลตราโซนิกนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่และยังไม่มีกำหนดค่ามาตรฐานการทดสอบ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องอ้างอิงแรงดันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของท่อทองแดงที่ 18 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งเป็นแรงดันทดสอบที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับกระบวนการ และค่าแรงดันทดสอบนี้ยังสูงกว่าแรงดันของสารทำความเย็น (1.4-2.2 MPa) หลายเท่าตัว จึงสามารถใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบรอยเชื่อมต่อทองแดงได้

จากการใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ในการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยหลักทั้ง 3 ชนิดที่จะทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ที่ประมาณ 18 เมกะปาสคาล (Mpa) ทำให้ได้กราฟของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่า Withstand pressure ดังภาพที่ 4.24 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้มีค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงจุดตัดที่ทำให้ได้ค่า Withstand pressure ประมาณ 18 MPa

การปรับตั้งค่าระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยเป็นไปตามตารางที่ 4.13 แสดง Output Optimization Point จากโปรแกรมคือ

1. ปรับค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบิบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1) ที่ 1.1 วินาที (Second)
2. ปรับแรงดันลมที่จะใช้ในการบิบท่อทองแดง (Air pressure) ที่ 5.1 บาร์ (Bar)
3. ปรับค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) ที่ 22 ไมโครเมตร (µm)

ตารางที่ 4.13

Output Optimization Point เพื่อใช้ในกระบวนการผลิต

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Withstand Pr	Minimum	18	18	21	1	1

Global Solution

t1	=	1.1
Air pressure	=	5.1
Amplitude	=	22

Predicted Responses

Withstand Pr	=	17.9444	,	desirability =	1.000000
--------------	---	---------	---	----------------	----------

Composite Desirability = 1.000000

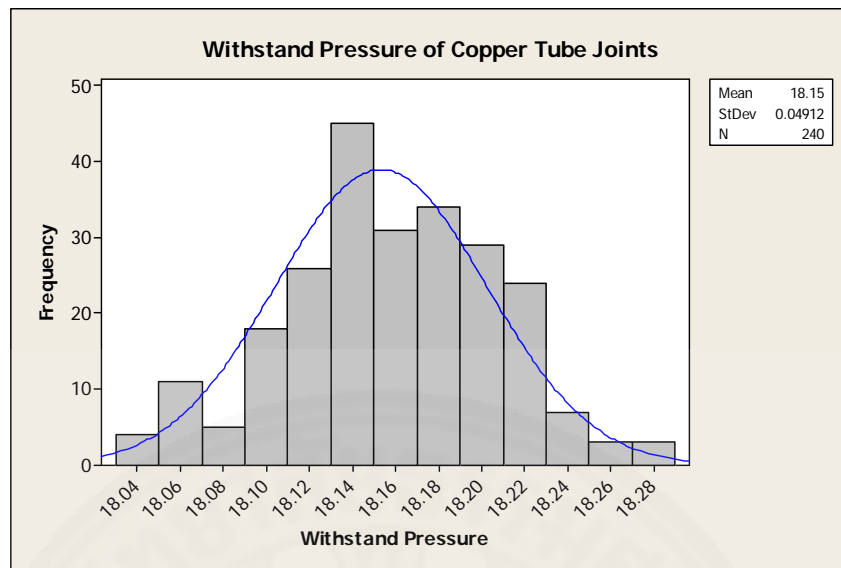
ทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand- pressure) มีค่าประมาณ 18.0 เมกะปาสคาล (MPa) นำระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองทั้งสิ้น 12 ครั้ง ได้ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 18.16 เมกะปาสคาล (MPa) โดยในตารางที่ 4-14 แสดงการปรับตั้งค่าปัจจัยและค่า Withstand pressure และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ประมาณการกับค่าที่ได้จากการยืนยันผลแล้วพบว่ามีความน่าเชื่อถือมากซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 1.17 ไปในทางค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 4-1 (หน้า 24 และ 32)

ตารางที่ 4.14

การปรับตั้งค่าปัจจัยเพื่อใช้ในการกระบวนการผลิตและผลการทดสอบ

การปรับตั้งค่าปัจจัย			Withstand Pressure											
t1	Air pressure	Amplitude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1	5.1	22	18.2	18.1	18.0	18.3	18.2	18.1	18.3	18.2	18.3	18.1	18.2	18.0

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้ในการผลิตจริงตั้งแต่วันที่ 3-30 สิงหาคม 2558 ซึ่งในแต่ละวันจะมีการตรวจสอบค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) วันละ 4 ครั้ง ครั้งละ 3 ชิ้น รวมชิ้นงานการตรวจสอบทั้งสิ้น 240 ครั้ง พบว่าฮีสโตรแกรมการกระจายตัวของค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) เป็นแบบปกติดังแสดงในภาพที่ 4.25 ส่วนข้อมูลค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ในช่วง 18.03 – 18.28 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 18.15 เมกะปาสคาล (MPa) ที่ซึ่งมากกว่า 18 เมกะปาสคาล (MPa) ส่วนรายละเอียดข้อมูลของค่า Withstand pressure ในช่วงวันที่ 3-30 สิงหาคม 2558 จะแสดงในภาคผนวก ก



ภาพที่ 4.25 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวแบบปกติของค่า Withstand pressure

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก และต้องการหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก

จากการออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองพร้อมการวิเคราะห์ผลของตัวแปรตอบสนอง สามารถสรุปผลการวิจัยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังนี้

5.1.1 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก

การวิจัยเรื่อง การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก และต้องการหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการบิบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1)
2. แรงดันลมที่จะใช้ในการบิบท่อทองแดง (Air pressure)
3. ระยะการสั้นของหัวโซนาโทรด (Amplitude)

ในขณะที่ปัจจัยที่เหลือซึ่งก็คือ ระยะเวลาที่มีการเชื่อมระหว่างผิวสัมผัสของท่อทองแดง (t2) ไม่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding)

5.1.2 ผลการวิจัยหลังจากใช้การออกแบบทดลองแบบ Response Surface Methodology

ผลการวิจัยหลังจาก Screening Factor Experimental โดยการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Response Surface Methodology ทำให้ได้สมการถดถอยของปัจจัยที่มี

ความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ซึ่งก็คือ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดง ดังนี้

$$Y = -97.8615 + 18.7604 (t_1) + 21.7396 (\text{Air Pressure}) + 4.70795 (\text{Amplitude}) - 10.3472 (t_1^2) - 2.11806 (\text{Air Pressure}^2) - 0.0756173 (\text{Amplitude}^2) + 0.312500 (t_1 * \text{Air Pressure}) - 0.0833333 (t_1 * \text{Amplitude}) - 0.131944 (\text{Air Pressure} * \text{Amplitude})$$

โดยที่แต่ละปัจจัยมีข้อจำกัดดังนี้

1. ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1): $0.7 \leq t_1 \leq 1.1$ วินาที

2. ค่าแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure): $4.3 \leq \text{Air Pressure} \leq 5.1$ บาร์

3. ค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude): $22 \leq \text{Amplitude} \leq 28$ ไมโครเมตร

5.1.3 ระดับในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด

ระดับในการปรับค่าระดับปัจจัยที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก คือ

1. ค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t1) ที่ 0.86 วินาที (Second)

2. ค่าแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) ที่ 4.35 บาร์ (Bar)

3. ค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) ที่ 27.0 ไมโครเมตร (μm)

ซึ่งทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) หรือค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงจะมีค่าประมาณ 20.84 เมกะปาสคาล (MPa) และเมื่อนำระดับในการปรับตั้งค่าปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิจัยพบว่าค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) หรือค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงจะมีค่าประมาณ 20.85 เมกะปาสคาล (MPa) และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ประมาณการกับค่าที่ได้จากการยืนยันผลแล้วพบว่ามีความน่าเชื่อถือมากซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 1 ไปในทางค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 4-1

5.1.4 ระดับที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ใช้เป็นมาตรฐานในกระบวนการผลิต

ในการปรับตั้งค่าแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงที่สุดนั้น อาจทำให้อาจก่อให้เกิดความสึกหรอของชิ้นส่วนหลักๆ เช่น Anvil, Sonotrode ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง, สิ้นเปลืองพลังงานและทำให้ต้นทุนการประกอบการของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัยได้เคยกล่าวไว้ว่าการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิกนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่และยังไม่มีข้อกำหนดค่ามาตรฐานการทดสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องอ้างอิงแรงดันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของท่อทองแดงที่ 18 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งเป็นแรงดันทดสอบที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันกับกระบวนการ และค่าแรงดันทดสอบนี้ยังสูงกว่าแรงดันของสารทำความเย็นที่ใช้การผลิต (1.4-2.2 MPa) หลายเท่าตัว จึงสามารถใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบรอยเชื่อมท่อทองแดงได้

ซึ่งระดับที่เหมาะสมในการปรับค่าระดับปัจจัย ที่จะทำให้มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding) เป็นไปตามที่ต้องการคือ

1. ปรับค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบีบท่อทองแดงจนผิวท่อทองแดงภายในมาสัมผัสกัน (t_1) ที่ 1.1 วินาที (Second)

2. ปรับแรงดันลมที่จะใช้ในการบีบท่อทองแดง (Air pressure) ที่ 5.1 บาร์ (Bar)

3. ปรับค่าระยะการสั่นของหัวโซนาโทรด (Amplitude) ที่ 22 ไมโครเมตร (μm)

จะทำให้เกิดค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand- pressure) มีค่าประมาณ 18.0 เมกะปาสคาล (MPa) นำระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองทั้งสิ้น 12 ครั้ง ได้ค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) มีค่าประมาณ 18.16 เมกะปาสคาล (MPa) และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างค่าที่ประมาณการกับค่าที่ได้จากการยืนยันผลแล้วพบว่ามีความน่าเชื่อถือมาก ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 1.17 ไปในทางค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 4-1 และเมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้ในการผลิตจริงตั้งแต่วันที่ 3-30 สิงหาคม 2558 ซึ่งในแต่ละวันจะมีการตรวจสอบค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) วันละ 4 ครั้ง ครั้งละ 3 ชิ้น รวมชิ้นงานการตรวจสอบทั้งสิ้น 240 ครั้ง พบว่า จะได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) อยู่ที่ประมาณ 18.15 เมกะปาสคาล (MPa) จึงสรุปได้ว่าการปรับตั้งค่าปัจจัยเป็นระดับที่เหมาะสมที่ใช้เป็นมาตรฐานในกระบวนการผลิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำวิจัยครั้งนี้ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในตอนแรกว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 ที่เลือกมาพิจารณาในการออกแบบการทดลองนั้นมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดง โดยในการทดลองนั้นต้องพยายามที่จะจำกัดและลดอิทธิพลของปัจจัยอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องให้เกิดน้อยที่สุด แต่ในกระบวนการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิก ยังมีปัจจัยอื่นๆ ซึ่งควรนำมาศึกษาเพิ่มเติม เช่น

1. จำนวนครั้งในการใช้งานหัวสั่น (Sonatrod)
2. จำนวนครั้งในการใช้งานหัวรับ (Anvil)
3. มุมในการเชื่อมท่อทองแดง (Weld Angle)

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องควบคุมเพิ่มเติมเช่น การคัดเลือกวัสดุดิบก่อนนำมาเข้าสู่การเชื่อมท่อทองแดง, และการดูแลบำรุงรักษาเครื่องมือในการทดสอบค่าความสามารถในการทนแรงดันของรอยเชื่อมที่ท่อทองแดง (Withstand pressure) ซึ่งถ้าหากสามารถพัฒนาปัจจัยอื่นๆ ที่กล่าวมานี้ได้แล้ว ก็จะทำให้กระบวนการเชื่อมท่อทองแดงแบบอัลตราโซนิกมีคุณภาพสูงยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

หนังสือภาษาไทย

- รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: ท้อป.
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กิตติศักดิ์ พลอยเจริญพานิช. (2546). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2 (ประมวลผลด้วย MINITAB). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

หนังสือภาษาอังกฤษ

- Douglas C. Montgomery. (2005). Design and Analysis of Experiments. 6th edition. United State of America: John Wiley & Sons Inc.

วิทยานิพนธ์

- โสภิตา ท่วมมี. (2550). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
 วิชาญ วรรณนา. (2545). ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่องโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
 วีรเทพ เฉลิมสมิทธิชัย. (2550). การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สารนิพนธ์

กฤษติกา โปธิเกษม. (2553). การปรับปรุงค่าแรงบิดของไฟวอต คาร์ทริดส์โดยใช้หลักการออกแบบ การทดลอง. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาการพัฒนาอุตสาหกรรม

บทความวารสาร

Elangovan,S., Prakasan,K,& Jaiganesh,V. (2010).Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51(1-4), 163-171.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลของค่า Withstand pressure ในช่วงวันที่ 3-30 สิงหาคม 2558

ตารางข้อมูลของค่า Withstand pressure ในช่วงวันที่ 3-30 สิงหาคม 2558

วันที่	ครั้งที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3/8/2558	18.1	18.1	18.2	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1	18.2
4/8/2558	18.2	18.1	18.2	18.2	18.1	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1
5/8/2558	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.1
6/8/2558	18.2	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.1	18.1	18.1
7/8/2558	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2
10/8/2558	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.1	18.2	18.2
11/8/2558	18.2	18.2	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
12/8/2558	18.1	18.2	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2
13/8/2558	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.3	18.1	18.2	18.1	18.2	18.1	18.3
14/8/2558	18.1	18.2	18.2	18.1	18.1	18.1	18.2	18	18.2	18.1	18.2	18.2
17/8/2558	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2
18/8/2558	18.2	18.2	18.2	18.1	18.2	18.2	18.1	18.2	18.1	18.2	18.1	18.2
19/8/2558	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.3	18.1	18.1	18.2
20/8/2558	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.3	18.1
21/8/2558	18.1	18.1	18.2	18	18.1	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18
24/8/2558	18.2	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.1	18.2
25/8/2558	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.3	18.1	18	18.2	18.2
26/8/2558	18.2	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1
27/8/2558	18.1	18.1	18.2	18.2	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2	18.1	18.3	18.1
28/8/2558	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1	18.1
Max	18.28 MPa											
Min	18.03 Mpa											
Average	18.15 MPa											

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายชินธันย์ พิรบูรณ์ไกรกุล
วันเดือนปีเกิด 21 กันยายน 2524
ตำแหน่ง วิศวกรซ่อมบำรุง
บริษัท โตชิบาแคเรียร์ ประเทศไทย จำกัด

ผลงานทางวิชาการ

การหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมท่อทองแดงที่ดีที่สุดแบบอัลตราโซนิก
(การประชุมวิชาการระดับชาติเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชาติ 2558)

ประสบการณ์ทำงาน 2548 ถึง ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง
บริษัท โตชิบาแคเรียร์ ประเทศไทย จำกัด

