

การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาช้อเหวียง

พรสุดา อรัญวงศ์

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เมษายน 2559


ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ได้
พิจารณางานนิพนธ์ของ พรสุดา อริญวงค์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา
ได้


คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์


..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาณู ลิลา)


คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์


..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาณู ลิลา)


..... กรรมการ
(ดร. จักรวาท คุณะดิลก)


..... กรรมการ
(ดร. บัญชา อริยะจรรยา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 13 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ธิลา อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. จักรวาล คุณะดิลก และดร. บัญชา อริยะจรรยา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์จากหัวหน้างานและบุคลากรในบริษัทผู้ส่งมอบกรณีศึกษา ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเพทาย คุณแม่พรพิศ อรัญวงศ์ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

พรสุดา อรัญวงศ์

57920724: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง/ กระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด/ ค่าความต้านทานแรงดึง

พรศุตา อรัญวงศ์: การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพการผลิต

ชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง (AN IMPLEMENTATION OF DESIGN OF EXPERIMENT TO IMPROVE PRODUCTION QUALITY OF THE SPROCKET CRANK SHAFT PART)

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: บรรหาญ ลิลา, Ph.D., 86 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพการผลิตของชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง ในส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงหลังการเชื่อมประสานแบบจุด ในเบื้องต้นพบปัญหาความสามารถของกระบวนการผลิต (Ppk) ต่ำประเมินได้ -1.39 มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผลิตได้เท่ากับ 3.2008 kN จึงมีการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยตัวแบบ SIPOC แผนภาพเหตุและผล และทำการทดลองแบบครึ่งละปัจจัย ทำให้สามารถบ่งชี้อิทธิพลของปัจจัยส่วนใหญ่ได้ชัดเจน ยกเว้นชนิดแผ่นโลหะ ปริมาณกระแสไฟ และเวลาในการเชื่อมประสานแบบจุด จึงทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและวิเคราะห์ผลพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ได้แก่ ชนิดแผ่นโลหะ ปริมาณกระแสไฟ และเวลาเชื่อม โดยใช้แผ่นโลหะชนิด SK-85 กำหนดกระแสเชื่อม 11 kA เวลาเชื่อมที่ระดับ 2 Cycle ในการผลิตจริง จากการติดตามผลพบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึง และดัชนีความสามารถของกระบวนการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 8.120 kN และ 0.93 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการประยุกต์แนวทางการออกแบบการทดลองในการศึกษานี้นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงได้อย่างมีนัยสำคัญ

57920724: MAJOR: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.ENG.

(INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORDS: DESIGN OF EXPERIMENT/ SPOT WELDING/ TENSILE STRENGTH

PORNUSUDA ARANWONG: AN IMPLEMENTATION OF DESIGN OF
EXPERIMENT TO IMPROVE PRODUCTION QUALITY OF THE SPROCKET CRANK
SHAFT PART. ADVISORY COMMITTEE: BANHAN LILA, Ph.D., 86 P. 2016.

This research presents an implementation of design of experiment to improve production quality of the sprocket crank shaft. The study emphasized on identifying key parameters affected the tensile strength resulting from the spot welding process. The preliminary test indicated very low process capability (P_{pk}) of -1.39 with an average tensile strength of 3.2008 kN. The analysis for root causes was performed using SIPOC model and Cause and Effect diagram. Effects of majority number of factors were identified with utilization of the one-factor-at-a-time experimental design except material type, welding current and time. The full factorial experiment was then designed and performed. The appropriate settings were determined to be 11 kA and 2 cycle for the welding current and time, respectively, with SK-85 metal sheet material type. Implementation of the settings led to increment in the average tensile strength to 8.120 kN with the P_{pk} of 0.93. Therefore, it can be concluded that the application of the experimental design in this study assisted to improve the production quality of the Sprocket Crank Shafts significantly.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21
ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนเพื่อลงเพลลาข้อเหวี่ยง.....	22
เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	28
การออกแบบการทดลอง.....	38
การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล.....	44
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
การติดตามผลการประยุกต์ใช้.....	47
การสรุปผลการปรับปรุง.....	48
4 ผลการดำเนินงาน.....	49
การเตรียมการทดลอง.....	49
การดำเนินการทดลอง.....	50
การเก็บข้อมูลค่าความทนแรงดึงของแต่ละรอบการทดลอง.....	50

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
การติดตามผลการยุทธ์ใช้.....	68
5 สรุปและอภิปรายผล.....	73
สรุปผลการดำเนินงาน.....	73
อภิปรายผลการดำเนินงาน.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	78
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ประเภทของรูปแบบการออกแบบการทดลอง.....	16
3-1	ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนด้วยการเชื่อมประสานแบบจุด.....	25
3-2	ผลการทดสอบค่าความทนแรงดึงของชิ้นส่วนจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 และผู้ผลิตเดิมจากอิตาลี.....	29
3-3	ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตครั้งแรก.....	31
3-4	การพิจารณาปัจจัยที่ถูกควบคุมในกระบวนการ.....	37
3-5	การวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าข้อกำหนด ในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด.....	39
3-6	ระดับของปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง.....	45
3-7	ออกแบบการทดลองและค่าปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง.....	45
3-8	แบบบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดลอง.....	46
4-1	ข้อมูลความต้านทานแรงดึงของเฟืองเพลาคู่เหวี่ยงตามการออกแบบการทดลอง.....	51
4-2	ค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่นโลหะชนิด SK-85 ที่ได้จากการคำนวณ.....	63
4-3	ค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่นโลหะชนิด SPCC ที่ได้จากการคำนวณ.....	64
4-4	ค่าความทนแรงดึงจากการทดสอบเปรียบเทียบกับจากการคำนวณ.....	66
4-5	ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนการปรับปรุงแล้ว.....	69
4-6	เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังการควบคุมปัจจัย.....	72

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ลักษณะชิ้นส่วนประกอบของเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง.....	1
1-2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนจากผู้ผลิตเดิมและผู้ผลิตใหม่.....	2
2-1 องค์ประกอบของการเชื่อมประสานแบบจุด.....	5
2-2 ช่วงเวลาการเชื่อมประสานแบบจุด 3 ระยะ.....	5
2-3 รูปร่างมาตรฐานปลายขั้วไฟฟ้า.....	6
2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	7
2-5 สภาวะที่ชิ้นงานโลหะถูกดึงจนกระทั่งขาดออกจากกัน.....	8
2-6 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ SIPOC.....	9
2-7 ลักษณะแผนภาพเหตุและผล.....	12
2-8 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ.....	13
2-9 ผลการตอบสนองแสดงถึงปัจจัยมีอิทธิพลร่วมและไม่มีอิทธิพลร่วม.....	15
3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย.....	21
3-2 ส่วนประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง.....	22
3-3 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง.....	23
3-4 พื้นที่ทำงานการเชื่อมประสานแบบจุด.....	24
3-5 เครื่องทดสอบค่าความทนแรงดึง.....	26
3-6 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง.....	27
3-7 ตัวอย่างกราฟที่บันทึกได้จากการทดสอบแรงดึง.....	28
3-8 สภาพชิ้นงานแตกหลังจบการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง.....	29
3-9 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 และผู้ผลิตเดิมจากอิตาลี.....	30
3-10 ทดสอบการแจกแจงของค่าความต้านทานในการผลิตครั้งแรก.....	32
3-11 ความสามารถของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบในการผลิตครั้งแรก.....	32
3-12 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตด้วยวิธี SIPOC.....	34
3-13 ส่วนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกลึงปาดผิวและเจาะรูเกลียว.....	36
3-14 แผนภาพแสดงเหตุและผล.....	38
3-15 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างเครื่อง NA-100 และ SPA-100.....	41
3-16 ชนิดของหัวเชื่อมที่เลือกใช้ แบบจุด สีเหลืองสีนํ้า และวงกลม.....	42

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-17 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของหัวเชื่อมแบบจุด สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงกลม.....	42
3-18 ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยหัวเชื่อมแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีน้ำเหล็กไหลที่เพียงพอ.....	43
3-19 ลักษณะ Emboss ที่อยู่บนชิ้นส่วนวงโลหะอัดขึ้นรูป.....	43
3-20 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างขนาด Emboss 1.0 และ 1.8 มิลลิเมตร.....	44
4-1 การกระจายตัวแบบปกติของค่าความต้านทานแรงดึง.....	53
4-2 การกระจายตัวแบบฮิสโตแกรมของค่าความต้านทานแรงดึง.....	53
4-3 การกระจายตัวของค่าความทนแรงดึงคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ.....	54
4-4 การกระจายตัวของค่าความต้านทานแรงดึงแสดงความเป็นอิสระต่อกัน.....	54
4-5 แผนภูมิของปัจจัยหลักของชิ้นส่วนต่อความต้านทานแรงดึง.....	58
4-6 แผนภูมิของปัจจัยร่วมของชิ้นส่วนต่อความต้านทานแรงดึง.....	59
4-7 ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่น โลหะชนิด SK-85 ที่ระดับปัจจัยต่างกัน.....	64
4-8 ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่น โลหะชนิด SPCC ที่ระดับปัจจัยต่างกัน.....	65
4-9 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงจากการทดสอบ และจากการคำนวณ.....	67
4-10 ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการคำนวณเทียบกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์.....	67
4-11 ลักษณะชิ้นงานลำดับที่ 9 หลังจากทดสอบมีน้ำเหล็กไหลย่อยออกมาด้านนอก.....	68
4-12 ทดสอบการแจกแจงของค่าความต้านทานแรงดึงหลังปรับปรุง.....	70
4-13 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง.....	71

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตสำคัญแห่งหนึ่งของอุตสาหกรรมยานยนต์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมนี้สร้างมูลค่าและมีส่วนผลักดันให้เศรษฐกิจของประเทศเดินหน้าได้อย่างต่อเนื่อง การแข่งขันของผู้ประกอบการทั้งภายในและข้ามห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยานยนต์มีระดับสูง เนื่องจากเป็นห่วงโซ่ขนาดใหญ่มีมูลค่าทางการตลาดสูง ประกอบกับมีจำนวนสมาชิกที่เกี่ยวข้องหลากหลาย ตั้งแต่ผู้ผลิตวัตถุดิบ ผู้ผลิตชิ้นส่วน ผู้ผลิตยานยนต์ ผู้จัดส่งจัดขายลูกค้า ตลอดจนผู้ให้บริการที่เกี่ยวข้องอีกจำนวนมาก ปัจจัยเหล่านี้ผลักดันให้ผู้ประกอบการต้องพัฒนาและยกระดับผลิตภัณฑ์ของตนเองเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในด้านคุณภาพต่อลูกค้า ภายใต้กรอบของต้นทุนที่เหมาะสมด้วยการจัดการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพอย่างสม่ำเสมอ

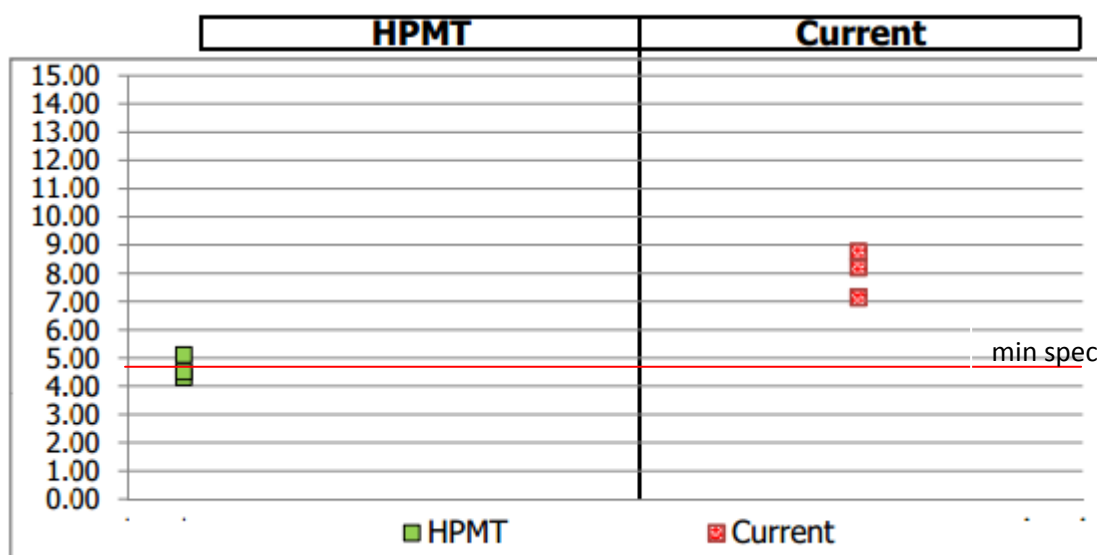
โครงการศึกษาอิสระนี้ศึกษาปัญหาของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งเป็นสมาชิกรายหนึ่งในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยานยนต์ รับผิดชอบพัฒนาชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อนเหวี่ยง (Sprocket crank shaft) ให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับที่เคยผลิตโดยผู้ประกอบการในประเทศอิตาลี

ชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อนเหวี่ยง มี 2 ส่วนประกอบหลัก คือ เฟือง แผ่นโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 1-1 ชิ้นส่วนเฟืองผลิตจากผงโลหะอัดขึ้นรูป ในขณะที่แผ่นโลหะผลิตด้วยกระบวนการปั๊มขึ้นรูป ชิ้นส่วนทั้งสองจะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยวิธีเชื่อมประสานแบบจุด (Spot welding) ชิ้นส่วนเฟืองอัดขึ้นรูปผลิตโดยผู้ส่งมอบ (Supplier) ลำดับที่ 1 การผลิตชิ้นส่วนแผ่นโลหะและการนำไปยึดติดกับเฟืองทำโดยผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 การยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันต้องทำให้ชิ้นส่วนหลังการยึดเข้าด้วยกันควรต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ได้ไม่น้อยกว่า 7 kN



ภาพที่ 1-1 ลักษณะชิ้นส่วนประกอบของเฟืองเพลาค้อนเหวี่ยง

ผู้ศึกษาและผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 ได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนหลังการเชื่อมประสานที่ดำเนินการโดยผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 เปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนหลังการเชื่อมประสานที่ผลิตโดยผู้ผลิตเดิมด้วยชิ้นส่วนตัวอย่างทั้งหมด 6 ชิ้น ระหว่างผู้ผลิตเดิม (Current) จำนวน 3 ชิ้น และผู้ผลิตใหม่ (HPMT) จำนวน 3 ชิ้น ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงมีผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1-2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนจากผู้ผลิตเดิมและผู้ผลิตใหม่

จากผลการทดสอบพบว่าชิ้นส่วนของผู้ผลิตเดิมมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 8.052 kN แต่ผู้ผลิตใหม่ มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 4.633 kN ซึ่งต่ำกว่าของเดิมถึง 42% และต่ำกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำ (LSL = 7 kN) ผู้ศึกษาและผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 จึงต้องการศึกษาและกำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด ปัจจัยของเครื่องจักรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด เพื่อให้ชิ้นส่วนหลังการยึดมีความต้านทานแรงดึงเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงหลังการยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันของเฟืองเพลาคอเหวี่ยง

2. เพื่อเพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิตเฟืองข้อเหวี่ยงเมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานแรงดึงหลังการยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. สามารถนำผลการวิจัยที่ได้มาเป็นปัจจัยในการปรับตั้งในกระบวนการประกอบยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด
2. สามารถลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาความต้านทานแรงดึงของการประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อนเหวี่ยงไม่เป็นไปตามข้อกำหนด โดยมีขอบเขตดังนี้

1. ชิ้นงานที่ศึกษา คือ เฟืองเพลาค้อนเหวี่ยง
2. เครื่องจักร คือ เครื่องเชื่อม Model NA-100, 20000 A
3. บริษัท มิซูกิ จำกัด
4. ระยะเวลาที่ศึกษา 4 เดือน
5. กระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด
6. ทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยชิ้นส่วนผ่านทุกกระบวนการผลิตแล้ว (Finish good)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

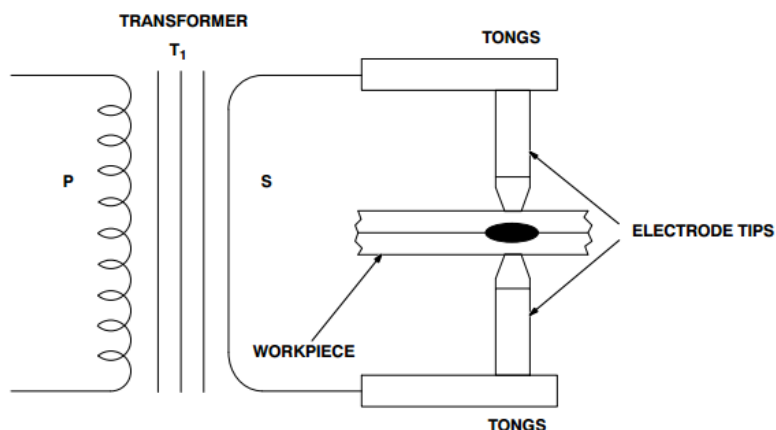
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเชื่อม เพื่อแก้ปัญหา ค่าความต้านทานแรงดึงของ ชิ้นส่วนเพื่อเพลาคือห่วยให้ ได้ผลลัพท์ไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ต้องศึกษาหาความรู้ จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ทั้งทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผู้ศึกษามีความเข้าใจถึงปัญหาอย่าง ถ่องแท้ และสามารถเป็นข้อมูลสนับสนุนในการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา นี้ให้ ได้ตรง ตามวัตถุประสงค์ที่สุด โดยในบทนี้รวบรวมเนื้อหาที่จำเป็นในการศึกษา คือ การเชื่อมประสานแบบ จุด การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ SIPOC Model ดัชนีความสามารถของกระบวนการ การผลิต แผนภาพเหตุและผล และการออกแบบการทดลอง

1. การเชื่อมประสานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW)

การเชื่อมประสานแบบจุด เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่เก่าแก่ชนิดหนึ่งและนิยมใช้ใน อุตสาหกรรมรถยนต์จนถึงทุกวันนี้ อาศัยปัจจัย 3 ประการ คือ ความร้อน แรงกด และเวลาเพื่อ ให้ เกิดรอยเชื่อม

การเชื่อมประสานแบบจุด เป็นการหลอมละลายสำหรับชิ้นงาน โลหะสองชิ้นขึ้นไป เกยติดกัน โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากความต้านทานของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อของชิ้นงานที่ เป็นโลหะและแรงกดจากขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทั้งสองข้าง ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงพอจน โลหะ หลอมเหลวเชื่อมติดกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเวลา การไหลของกระแสไฟฟ้า ความหนา ชนิดของ วัสดุ รวมทั้งขนาดขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับพื้นผิว ต่างเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเชื่อมนี้

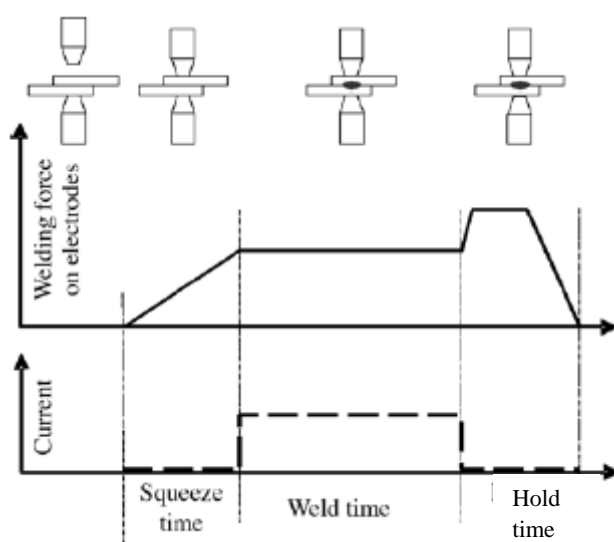
องค์ประกอบของการเชื่อมประสานแบบจุด ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าให้กระแสไฟฟ้าสูงไหล ผ่านความต้านทานการไหลของขั้วไฟฟ้าและรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดทั้งสองข้างของชิ้นงาน ผิวสัมผัสในพื้นที่ที่กระแสเข้มข้นมีความร้อนเพิ่มขึ้น โดยความต่างศักย์ที่มีค่าต่ำและกระแสที่ค่าสูง ในช่วงสั้น ๆ เพื่อทำให้เกิดความร้อนและการหลอมละลายของโลหะเชื่อมบนพื้นที่เล็ก ๆ เมื่อ กระแสเกิดการไหลแรงกดจากขั้วไฟฟ้าจะคงกดนิ่งจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัวและแข็งตัว และ ปลดปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาก่อนข้างสั้น ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบของการเชื่อมประสานแบบจุด

การเชื่อมประสานแบบจุดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ดังภาพที่ 2-2 แบ่งเป็น 3 ระยะ คือ

1. เวลากด (Squeeze time) คือ เวลาแรกเริ่ม ตั้งแต่เวลาที่ขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอจนกว่ากระแสเชื่อมเริ่มถูกปล่อยออกมา
2. เวลาเชื่อม (Weld time) คือ เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยและไหลไปยังชิ้นงาน
3. เวลาค้ำย (Hold time) คือ เวลาหลังจากการเชื่อม โดยที่ขั้วไฟฟ้ายังคงกระทำค้ำยอยู่บนชิ้นงาน ช่วงเวลานี้ถูกปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจนเกิดรอยเชื่อมสร้าง ความแข็งแรงที่จุดประสานกันก่อนจะปล่อยขั้วไฟฟ้าออก



ภาพที่ 2-2 ช่วงเวลาการเชื่อมประสานแบบจุด 3 ระยะ

การพิจารณาเลือกช่วงเวลาการเชื่อมที่เหมาะสมในแต่ละชิ้นงาน เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ถ้าเวลาเชื่อมนานไปอาจทำให้เกิดโลหะหลอมละลายเกิดรอยเชื่อมใหญ่เกินไปและเกิดโพรงอากาศได้ ถ้าเวลาคัดสั้นเกินไปประกอบกับวัสดุโลหะมีปริมาณคาร์บอนสูงอาจทำให้รอยเชื่อมเปราะบางและแตกได้ การเลือกปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญมากส่งผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่ได้กับชิ้นงาน

แรงกด (Electrode force) เป็นตัวแปรสำคัญในการเชื่อมประสานแบบจุด มีจุดประสงค์เพื่อกดชิ้นงานเข้าประชิดกัน การกระทำนี้เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าที่จุดต้องการเชื่อม แต่ไม่ได้มีหน้าที่จับยึดชิ้นงานเข้าหากัน จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้แน่นและอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมก่อนการกดของขั้วไฟฟ้าเสมอ แรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ลดค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น ดังนั้นแรงกดที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานจะนำความร้อนออกจากโลหะเชื่อม ยิ่งกระแสไฟฟ้ามากขึ้นต้องใช้แรงกดมากขึ้น ในทางกลับกัน แรงกดน้อยต้องใช้กระแสไฟฟ้าน้อยลงเช่นกัน สิ่งนี้จึงเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการควบคุมเครื่องจักรเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด จึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง

ขั้วไฟฟ้า (Electrode tip) เป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน ในการเชื่อมประสานแบบจุด เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไปสู่ชิ้นงานเพื่อให้เกิดความต้านทาน ความร้อน การหลอมละลาย และการเชื่อมติดของโลหะ ส่วนใหญ่นิยมใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองแดง ดังภาพที่ 2-3 การเลือกขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในแต่ละชิ้นงานเพื่อรักษาคุณลักษณะของความร้อนและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในระหว่างทำการเชื่อม

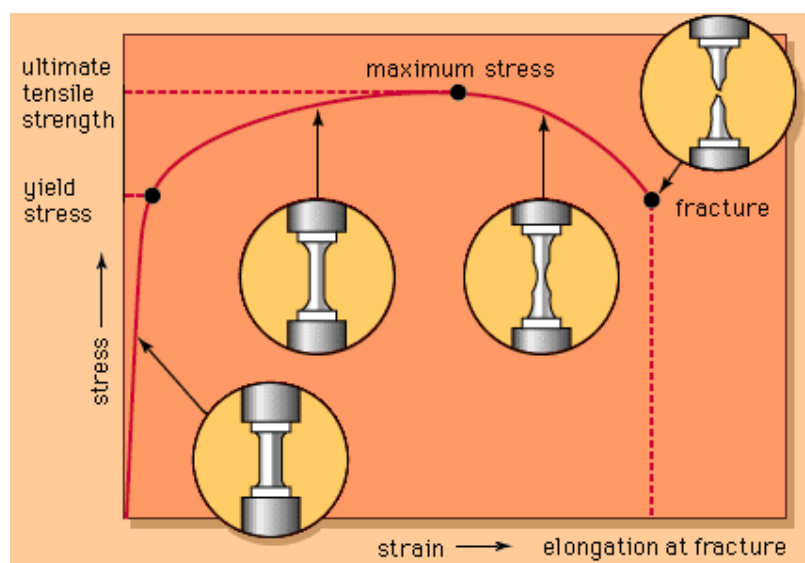


ภาพที่ 2-3 รูปร่างมาตรฐานปลายขั้วไฟฟ้า

2. การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ (Destructive testing of welds)

การทดสอบแบบทำลายสภาพ เป็นการทดสอบที่ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งทางกล ทางฟิสิกส์ และเคมี เป็นการทดสอบที่ให้ผลการตรวจสอบแน่นอนและชัดเจน การทดสอบลักษณะนี้ชิ้นวัสดุทดสอบจะถูกทำลายสภาพ ชำรุดเสียหาย ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนำชิ้นงานมาทำเป็นชิ้นทดสอบ (Specimen) สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล เช่น การหาความแข็งแรง ความเหนียว และอื่น ๆ โดยต้องใช้แรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ (Static load test) จะใช้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบในลักษณะค่อย ๆ เพิ่มแรงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูปหรือแตกหักออกจากกัน

การทดสอบความต้านทานแรงต่อแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบงานเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และกำหนดวัสดุที่เหมาะสมต่อค่าความแข็งแรงที่ต้องการเพื่อกำหนดให้เป็นข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต่อไป การทดสอบนี้แสดงผลเป็นกราฟเส้นโค้งที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain curve) ดังภาพที่ 2-4 บ่งชี้ถึงความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength: UTS) และกำลังคราก (Yield strength) โดยชิ้นงานที่ทดสอบนี้ควรผ่านกระบวนการอบชุบหรือผ่านการทำให้รีดมันต์ขั้นสุดท้ายมาแล้ว เพื่อให้มั่นใจว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาก่อนการทดสอบเป็นการป้องกันรอยตำหนิอันเป็นสาเหตุของการแตกหักก่อนเวลาอันควร



ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

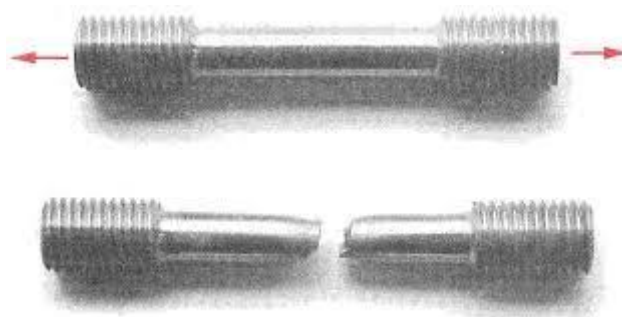
โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ความแข็งแรงในการรับแรงดึงหรือการทนต่อแรงดึง (Ultimate tensile strength: UTS) เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุ เมื่อวัสดุรับแรงดึงจากจุดเริ่มต้นในการทดสอบและจะเสียรูปในลักษณะยืดหยุ่นอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อเราเพิ่มแรงดึงจนถึงความเค้นที่เกิดในวัสดุมีค่าเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น วัสดุจะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก และเมื่อความเค้นในวัสดุเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง วัสดุจะมีความเค้นลดลงเองและระยะยืดตัวจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าวัสดุมีการเกิดคอคอด (Necking) เมื่อการทดสอบผ่านเลยจุดค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงจนเข้าสู่สภาวะแตกหักในที่สุด ดังสมการที่ 2-1

$$\sigma_{UTS} = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (2-1)$$

โดย σ_{UTS} คือ ความแข็งแรงของวัสดุที่ทนแรงดึงสูงสุด

P_{max} คือ ค่าแรงที่กระทำสูงสุด

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน



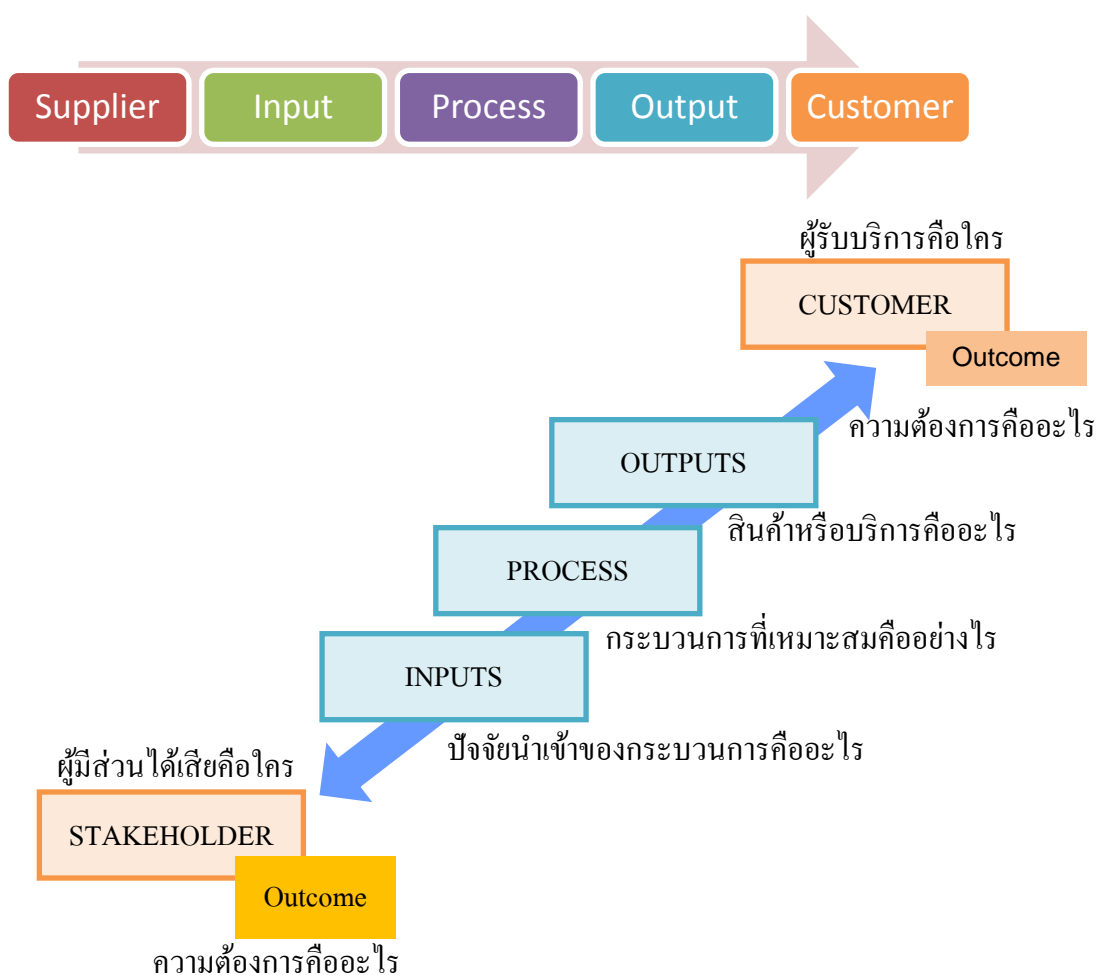
ภาพที่ 2-5 สภาวะที่ชิ้นงานโลหะถูกดึงจนกระทั่งขาดออกจากกัน

วัสดุที่อยู่ภายใต้แรงดึงในช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างถาวร ถ้าปล่อยแรงดึงออกวัสดุจะไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม จุดนี้เป็นจุดที่มีความแข็งแรงทางแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) จนกระทั่งวัสดุเกิดการขาดออกจากกัน (Breaking point) ดังภาพที่ 2-5

3. SIPOC Model

SIPOC เป็นคำย่อมาจาก Supplier input process output customer เป็นการระบุกระบวนการทำงานในภาพใหญ่ ในรูปแบบตารางก่อนเริ่มเขียนแผนภาพ วัตถุประสงค์ หรือทำการพัฒนาส่วนมากใช้ในการพัฒนาหรือปรับปรุงกระบวนการทำงานตามแนวทาง TQM, Kaizen, Lean หรือ Six sigma และจะใช้เมื่อมีความต้องการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพราะต้องเข้าใจขอบเขตของ

การทำงานก่อน เพื่อให้ในแต่ละภาคส่วนเข้าใจขอบเขตของงานว่ามีอะไร หรือมีส่วนใดมาเกี่ยวข้องกับ
 ด้วยก่อนเขียนภาพการทำงาน ดังนั้น SIPOC คือ การทำงานเป็นทีมของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมด
 ของกระบวนการ หรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของกระบวนการในการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยเกี่ยวข้องกับ
 กระบวนการทั้งหมดโดยไม่ตกหล่น ถ้าเป็นการออกแบบกระบวนการใหม่มักจะเริ่มที่ลูกค้า
 ย้อนกลับไปถึงผู้ส่งมอบ เรียกว่า COPIS



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ SIPOC

หลักการนี้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการดำเนินงานขององค์กรที่ต้องอาศัย
 ปัจจัยต้นน้ำส่งมอบคุณค่าไปยังปลายน้ำอย่างเป็นระบบ ทำให้สามารถวิเคราะห์กระบวนการได้
 ชัดเจนและเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดและวางแผนการจัดการกระบวนการ ประกอบด้วยผู้ส่ง
 มอบ (Supplier) นำส่งปัจจัยนำเข้า (Input) มาในระบบที่จำเป็นต่อการทำกระบวนการ (Process)

เพื่อผลิตให้ได้ผลลัพธ์ (Output) หรือผลผลิตในสินค้าและบริการ แล้วส่งมอบให้กับลูกค้า (Customer) ผู้รับบริการต่อไป ดังภาพที่ 2-6 โมเดลนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่คุณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงถึงภาพโดยรวมของกระบวนการทั้งหมดที่เชื่อมโยงกันเพื่อพิจารณาความเกี่ยวข้องและวิเคราะห์ผลกระทบในแต่ละกระบวนการในแต่ละกลุ่มได้อย่างชัดเจน

4. ดัชนีความสามารถของกระบวนการผลิต (Process capability indexes)

การศึกษาความสามารถของกระบวนการผลิตใช้สถิติมาช่วยวัดขีดความสามารถของการผลิตได้ โดยมีกราฟติดตามผลลัพธ์ด้วยวิธีการวัดจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตออกมาในแต่ละกระบวนการ เพื่อประเมินว่ากระบวนการผลิตนั้นจะมีอัตราส่วนของเสียจำนวนเท่าใด และคาดการณ์ได้ด้วยการสังเกตลักษณะพฤติกรรมของการผลิตจะต้องอยู่ในค่าควบคุม โดยของดัชนีความสามารถของกระบวนการผลิต C_{pk} สามารถบ่งบอกความเสถียรในระบบการผลิตได้ ในการวัดความสามารถของกระบวนการผลิต ซึ่งข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

การนำค่าเฉลี่ยเทียบกับค่ากลาง ค่าความผันแปรของกระบวนการ และข้อกำหนดของลูกค้ามาคำนวณร่วมกัน เพื่อสะท้อนถึงขีดความสามารถแค่ไหนเมื่อเทียบกับข้อกำหนดของลูกค้า โดยข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์มี 2 ด้าน คือ ด้านละ $\pm 3\sigma$ ซึ่งถือว่าเป็นขีดความสามารถอ้างอิงของแนวคิดทางคุณภาพดั้งเดิมที่คาดหวังให้กับกระบวนการที่มีค่า C_{pk} เท่ากับ 1.0 โดยในอุดมคติเราคาดหวังให้กระบวนการมีค่า C_{pk} สูงจึงถือว่ากระบวนการมีความเสถียรภาพดี และแสดงถึงความสามารถของกระบวนการสูงและมีโอกาสออกนอกข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์น้อย เราสามารถคำนวณหาดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการด้านเดียว (One-side process capability ratio) ได้ ดังสมการที่ 2-2 สมการที่ 2-3 และสมการที่ 2-4

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (2-2)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (2-3)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad (2-4)$$

โดยที่

C_{pu} คือ อัตราความสามารถของกระบวนการของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ด้านบน

C_{pl} คือ อัตราความสามารถของกระบวนการของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ด้านล่าง

C_{pk} คือ ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการเทียบกับค่ากลางของข้อมูล

μ คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

การปรับปรุงค่า C_{pk} จะมีประโยชน์ในการลดความเสี่ยงของกระบวนการที่ผลิตของเสีย นอกข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ในบางองค์กรคิดออกมาเป็นจำนวนชิ้นส่วนเสียต่อล้านชิ้น (Part per million: PPM) และกำหนดเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถของหน่วยงาน (Key performance Index: KPI) ซึ่งในกรณีที่มีจำนวนมากเกินไป หน่วยงานต้องปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดดัชนีนี้ลง และต้องหาวิธีการแก้ไขอย่างเป็นระบบ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ นั้นมีผลต่อค่าความสามารถของกระบวนการทั้งสิ้น และต้องมีการควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อกระบวนการ และเพิ่มความสามารถของกระบวนการได้

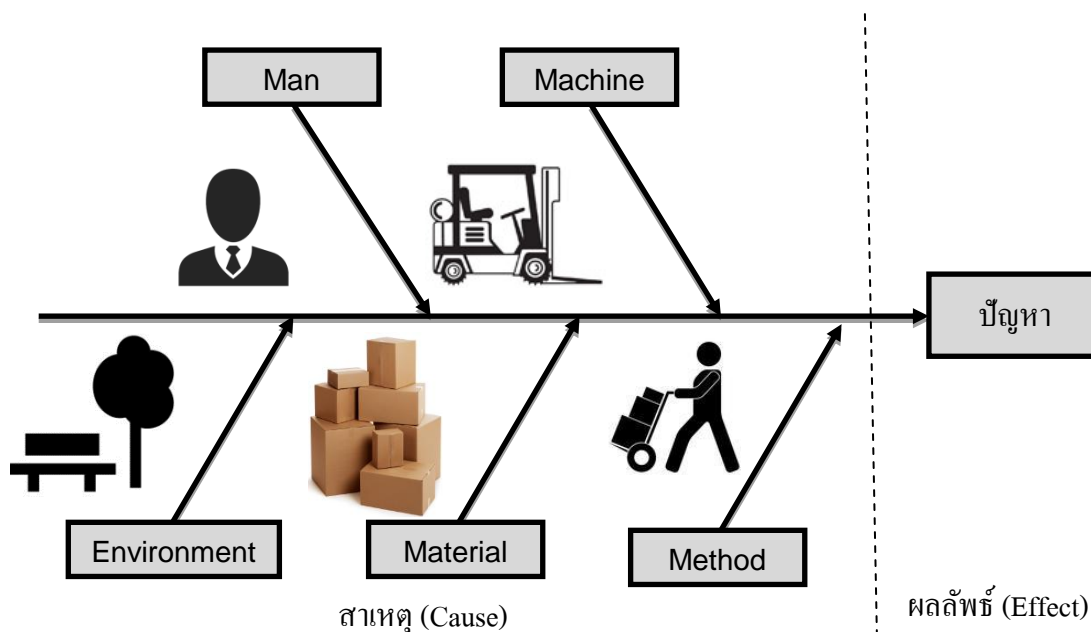
5. แผนภาพเหตุและผล (Cause and effect diagram)

แผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible cause) ซึ่งได้มาจากการระดมความคิดและจำแนกสาเหตุออก แผนภาพเหตุและผลช่วยให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาได้อย่างมีเหตุผล ละเอียด ครอบคลุม ถึงสาเหตุรากเหง้า (Root cause) ได้ และเป็นระบบอันจะนำไปสู่การแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง

ลักษณะแผนภาพเหมือนก้างปลา ซึ่งส่วนของก้างปลามาจาก 4M 1E ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) วัสดุดิบ (Material) และสภาพแวดล้อม (Environment) ที่เป็นปัจจัยหลักของสาเหตุที่อาจทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในกระบวนการและส่งผลโดยตรงกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการได้ มีขั้นตอนดังนี้

- 5.1 กำหนดปัญหาที่จะศึกษา
- 5.2 เลือกกลุ่มผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่เกี่ยวข้องกับประเด็นปัญหา
- 5.3 ระดมสมองเพื่อหาสาเหตุที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น
- 5.4 จัดหมวดหมู่ผลลัพธ์ที่ได้จากการระดมสมองตามหมวดหมู่ต่าง ๆ
- 5.5 เชื่อมโยงสาเหตุและผลลัพธ์เข้าด้วยกันเพื่อแสดงความสัมพันธ์กับข้อมูลในแต่ละ

หมวดหมู่



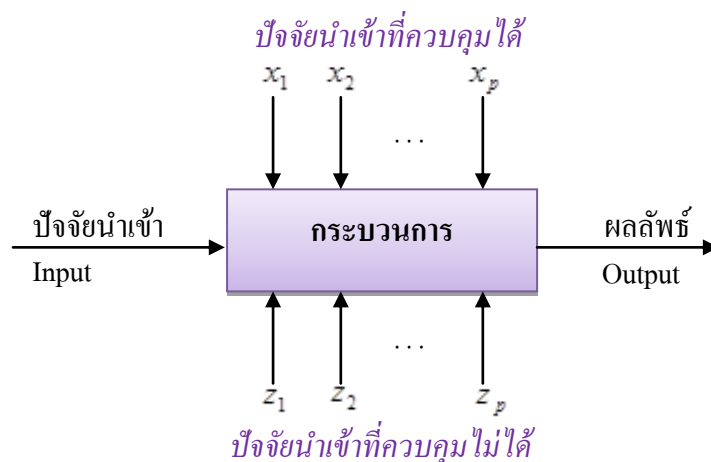
ภาพที่ 2-7 ลักษณะแผนภาพเหตุและผล

เมื่อมีข้อมูลในแผนภาพที่สมบูรณ์แล้วจะทำให้มองเห็นภาพองค์ประกอบทั้งหมดที่อาจจะเป็นสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น แผนภาพเหตุและผลจะช่วยให้รวบรวมความคิดของสมาชิก ทำให้ทราบสาเหตุหลัก ๆ และสาเหตุย่อย ๆ ของปัญหาอย่างเป็นระบบ ทำให้ทราบความเป็นไปได้ของสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำให้มีความเข้าใจ และนำไปใช้วินิจฉัยแก้ไขปัญหาได้ถูกวิธีในที่สุด

6. การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การพัฒนากระบวนการผลิตมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม แต่ในความเป็นจริงแล้วกระบวนการผลิตมีความผันแปรอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้คงที่เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) เป็นตัวเลือกต้น ๆ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยการควบคุมเครื่องจักรให้ได้ผลลัพธ์อันพึงประสงค์ตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการ

เก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและปรับค่าปัจจัย (Factor) อย่างเป็นระบบเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบรับ (Response) ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2-8 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเป็นชุดการทดสอบเพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์ กระบวนการดังภาพที่ 2-8 อธิบายถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการ โดยทั่วไป มีปัจจัย (Factors) ของกระบวนการ x_1, x_2, \dots, x_p เรียกว่าปัจจัยที่ควบคุม (Controllable factors) ได้ ส่วน z_1, z_2, \dots, z_p เรียกว่าปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) ในบางครั้ง ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้นี้เรียกอีกอย่างว่าปัจจัยรบกวน (Noise) สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) คุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality characteristic) ที่สนใจโดยการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าตามแผนการทดลอง ตามจำนวนครั้งในการทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อยืนยันผลและช่วยในการวิเคราะห์ทางสถิติให้มีการคาดการณ์อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในบางครั้งการทดลองแบบสุ่มจะทำให้เราลดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่ว การทดลอง แนวทางการออกแบบการทดลองซึ่งสรุปได้เป็น 7 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการทดลอง (Statement of problem) ระบุว่าเมื่ออุปสรรคอะไรในกระบวนการที่ต้องการศึกษาหาแนวทางการแก้ไข
2. กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของปัจจัย (Choice of factors and levels) ใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์การทำงานหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุว่าปัจจัยใดมีส่วนเกี่ยวข้องและน่าจะมีผลต่อการทดลอง โดยในแต่ละปัจจัยต้องมีช่วงในการทดลองด้วยเช่นกัน

3. กำหนด Response ที่ต้องการศึกษา (Selection of the response variable) เป็นผลลัพธ์ของคุณลักษณะทางคุณภาพการทดลองที่เราสนใจว่าต้องการปรับปรุงสิ่งใดของกระบวนการ

4. เลือกชนิดของการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม (Choice of experimental design) เมื่อกำหนดทริทเมนต์และตัวแปรตอบสนองแล้ว ต้องทำการตัดสินใจเลือกชนิดของการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมรวมทั้งจำนวนการทดลองซ้ำ ข้อจำกัดของการทดลองสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

5. ดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ตามรูปแบบแผนการทดลองที่กำหนดไว้ เพื่อเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองรวมทั้งความผิดพลาดต่าง ๆ อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลองที่จะนำมาปรับปรุงการทดลองต่อไป

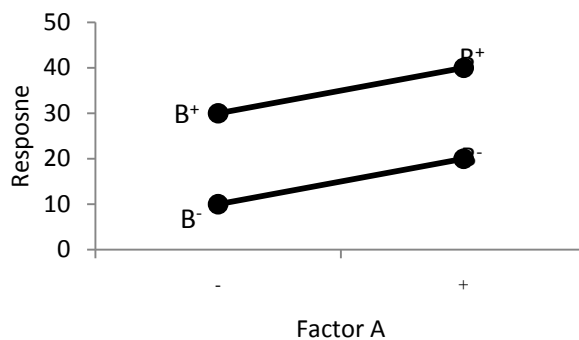
6. วิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบของข้อมูลที่เก็บมาและตัดสินใจความถูกต้องก่อนที่จะตีความข้อมูลเป็นผลลัพธ์ภายใต้ช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA วิเคราะห์กราฟและสมการเส้นถดถอยเพื่อคาดการณ์ผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

7. สรุปผลการทดลองและแนวทางการปรับปรุง (Conclusion and recommendations) เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแล้วต้องสรุปผลการวิเคราะห์และออกแบบวิธีการควบคุมกระบวนการจากการทดลองให้มีความเหมาะสมในแต่ละกระบวนการ เพื่อปรับปรุงและควบคุมกระบวนการผลิตให้สามารถดำเนินการต่อไปอย่างถูกต้อง ควรมีการติดตามผลเพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้งหนึ่ง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน กล่าวคือ การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเพื่อตรวจสอบระดับของปัจจัยมีผลอย่างมากในการทดลองที่สมบูรณ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

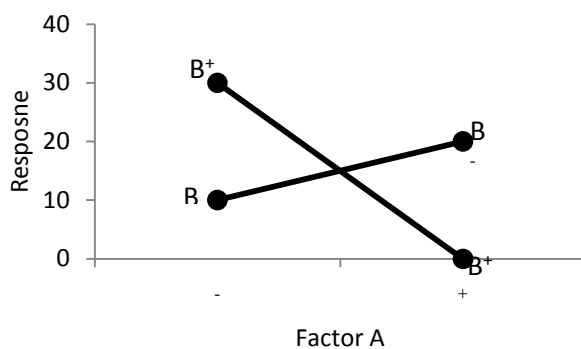
1. อิทธิพลหลัก (Main effect) เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่ง โดยตรงต่อ Response ไม่เกี่ยวกับปัจจัยอื่น ๆ

2. อิทธิพลร่วม (Interaction effect) เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยหนึ่งเมื่อมีอีกปัจจัยเปลี่ยนแปลงร่วมกัน

ตัวอย่างดังภาพที่ 2-9 ถ้าทดลองปัจจัย A และปัจจัย B อย่างละ 2 ระดับเพื่อทดสอบ Response ที่จะได้ a) แสดงผลของปัจจัยไม่มีอิทธิพลร่วม และ b) ผลของปัจจัยมีอิทธิพลร่วม



a) ผลของปัจจัยไม่มีอิทธิพลร่วม



b) ผลของปัจจัยไม่มีอิทธิพลร่วม

ภาพที่ 2-9 ผลการตอบสนองแสดงถึงปัจจัยมีอิทธิพลร่วมและไม่มีอิทธิพลร่วม

ประเภทของการออกแบบการทดลองมีหลายประเภทซึ่งผู้ใช้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลองนั้น ๆ รวมทั้งต้นทุนการทดลองที่ยอมรับได้ในที่นี้ขอกล่าวถึงการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (One factor at a time) และการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

ตารางที่ 2-1 ประเภทของรูปแบบการออกแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single factor	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงสุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองแบบเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2^k Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองแบบเต็มรูปแบบ แต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2^{k-p} Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยแต่ไม่ทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	น้อย	น้อย

1. การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One factor at a time) เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทดลองปรับเปลี่ยนทีละปัจจัย และกำหนดระดับปัจจัยอื่น ๆ ให้คงที่ การทดลองจึงเป็นการออกแบบที่ง่ายที่สุด และมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ผลที่ได้รับอาจจะไม่ใช่คำตอบที่ถูกต้องที่สุดเสมอไปเพราะมุ่งเน้นไปที่อิทธิพลหลัก (Main effect) เพียงอย่างเดียว แต่ไม่ได้พิจารณาถึงอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ซึ่งในบางครั้งการพิจารณาแบบนี้เพื่อคัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปก่อนและลดให้เหลือเพียงปัจจัยที่สำคัญเท่านั้นในการออกแบบการทดลองต่อไป เพราะเป้าหมาย คือ ลดจำนวนครั้งที่ต้องทำการทดลอง ซึ่งในบางครั้งการทดลองมีต้นทุนที่สูงมาก และใช้เวลานานมากจึงต้องมีการคัดกรองปัจจัยก่อน เป็นต้น การทดลองแบบนี้จะให้ผลของการเข้าสู่จุดหมายที่เราต้องการของกระบวนการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลสูงมาก ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วมระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

2. การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) เป็นการทดลองสำหรับปัจจัยที่มีค่าระดับหลาย ๆ ค่าที่เป็นไปได้ (Combinations) ทั้งหมด ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุก ๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งเป็นทุก ๆ ค่าของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทดลองจำนวนครั้งมาก ข้อดี คือ สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองได้ทั้งอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม

แต่การทดลองแบบนี้ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมากขึ้นและระดับของปัจจัยมากขึ้นยังต้องใช้ต้นทุนในการทดลองสูงมากขึ้นตามลำดับ เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนของผู้ทดลองอาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข

เมื่อการทดลองเป็นไปแบบสุ่มแล้วความคลาดเคลื่อนจะถูกกระจายตัวไปทั่วการทดลองนั้นหมายถึงโดยเฉลี่ยแล้วความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้ แต่ควรเกิดขึ้นทางด้านสูงและต่ำในสภาวะที่สมดุลกัน เพื่อให้การทดลองในแต่ละครั้งเป็นอิสระต่อกันและมีคุณสมบัติการแจกแจงแบบปกติมีลักษณะเป็น $NID(0, \sigma^2)$

สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของความผันแปรด้วย ANOVA โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้กันมาก คือ โปรแกรม Minitab เพื่อคำนวณความผันแปรต่าง ๆ และสามารถนำไปวิเคราะห์ตามหลักการทางสถิติได้ คือ อิทธิพลหลัก (Main effect) อิทธิพลร่วม (Interaction effect) ความคลาดเคลื่อน (Error) แสดง ANOVA จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการทดลองหนึ่ง ๆ นั้นมีปัจจัยที่เราควบคุมไม่ได้จำนวนมาก ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่เราสนใจให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลา ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (ϵ_{ijk}) หรือเรียกอีกอย่างว่า Residual หมายถึง สิ่งเหลือหรือสิ่งตกค้าง เป็นดัชนีที่บ่งชี้ว่าผลการทดลองและตัวแบบสมการเส้นถดถอย (Regression model) สามารถทำนายพฤติกรรมของปัจจัยให้เชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด

จากความคลาดเคลื่อนของการทดลองสามารถนำไปสร้างเป็นตัวแบบสมการเส้นถดถอยเพื่อทำนายค่าผลตอบสนองที่ได้ในอนาคตต่อไป

3. ตัวแบบสมการเส้นถดถอย (Regression model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง (Response) ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใด ๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rowland and Jiju (2003) ประยุกต์การออกแบบการทดลองในกระบวนการเชื่อมแบบจุด ได้สังเกตเห็นประโยชน์ของการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีข้อจำกัดในด้านความสามารถในการทำซ้ำ ไม่สามารถวิเคราะห์ปัจจัยภายในของกระบวนการได้ ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นเมื่อกำหนดปัจจัยผิด และค่าใช้จ่ายที่สูงสูญเสียในการทดลอง จากข้อจำกัดต่าง ๆ จึงเลือกวิธีการออกแบบการทดลองแบบสองระดับมาเป็นเครื่องมือเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญของการเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งแรงมีความเปลี่ยนแปลงไปเพื่อใช้ผลการศึกษาใน

การปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการผลิตจริง ในการแก้ไขปัญหาการเชื่อมติดกันของโลหะแผ่นคาร์บอนหนา 3.1 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมจาก 3.1 ถึง 10 มิลลิเมตร ใช้วิธีการระดมสมองและได้ 5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อม คือ ระยะเวลาเชื่อม ขนาดขั้วเชื่อม กระแสเชื่อม และแรงขั้วเชื่อม โดยทำการออกแบบการทดลองและพบว่ากระแสเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากที่สุด และถ้าในกระบวนการควบคุมกระแสเชื่อมไม่ดีจะส่งผลให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไป ด้วยวิเคราะห์ความสูญเสียด้วยฟังก์ชันทาคุชิ (Taguchi's loss function analysis) หลังจากปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะทำให้ความแข็งแรงจากรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น 25%

Teeradej (2010) แก้ปัญหาการเชื่อมชิ้นงานด้วยความต้านทานแบบจุด หลังจากเชื่อมแล้วมีสะเก็ดไฟกระเด็นไปติดกับชิ้นงานทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมชิ้นงาน ส่งผลให้การส่งงานให้กับลูกค้าเกิดความล่าช้าและไม่ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า จึงมีแนวทางการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมด้วยการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะของเครื่องเชื่อมให้เหมาะสม และลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ พิจารณาจาก 4 ปัจจัย คือ ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ความหนาของชิ้นงาน มุมของปืนเชื่อมที่กระทำต่อชิ้นงาน และตำแหน่งเชื่อม ด้วยการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล และทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ โดยวิธีการวัดผลใช้ผู้ชำนาญการด้านการเชื่อมตัดชิ้นงานด้วยสายตา และใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ผลทางสถิติ ANOVA โดยผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าเดี่ยวแบบพัลส์ มุมของปืนเชื่อมที่ตั้งฉากกับชิ้นงาน และตำแหน่งเชื่อมที่จุดกึ่งกลาง เป็นสภาวะที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นลดลงจาก 12% เหลือ 3.67% ด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05

ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และนครินทร์ ศรีสุวรรณ (2554) ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 201 ซึ่งเป็นเหล็กชนิดใหม่ซึ่งกำลังนิยมใช้ในปัจจุบันมาทดแทนเกรด 304 ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนซึ่งต้องใช้สภาวะกระแสไฟที่แตกต่างกันไป จึงต้องหาชนิดของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201 ด้วยการทดลองเชื่อมแบบอาร์กเปรียบเทียบกระแสไฟเชื่อมแบบกระแสตรงต่อขั้ว (DCEN) และกระแสตรงต่อกลับขั้ว (DCEP) ปรับกระแสเชื่อม 5 ระดับ คือ 60 70 80 90 และ 100 แอมแปร์ โดยทดสอบแรงดึง ตรวจโครงสร้างจุลภาคเพื่อวัดขนาดเม็ดเกรน พบว่าการเชื่อมด้วยกระแสตรงต่อขั้วด้วยระดับการเชื่อมต่ำสุด 60 แอมแปร์ เป็นสภาวะที่ดีที่สุดเพราะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงทำให้ขนาดเม็ดเกรนขนาดเล็กกว่าการเชื่อมด้วยกระแสตรงต่อกลับขั้ว เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ทั้งสแตนอเล็กโทรคน้อยเพียง 30% ทำให้มีแนวการเชื่อมเล็กสามารถรับแรงได้ดีและมีโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นน้อยตามขอบเกรนในบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้มีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าการใช้กระแสตรงต่อกลับขั้วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201

สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ (2555) ศึกษาการปรับลดเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของสายรัดน้ำมันเหล็กแผ่นกัลวานีลหนา 2 มม. เกยต่อกัน เพื่อปรับปรุงระยะเวลาการทำงานของพนักงานและยืดอายุการใช้งานของหัวเชื่อม การเชื่อมชิ้นงาน 1 ชิ้นใช้เวลาการเชื่อม 30 รอบ จึงทดลองลดระยะเวลาการเชื่อมครั้งละ 2 รอบ เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดและยังคงคุณภาพตามข้อกำหนดของชิ้นงาน ด้วยการทดสอบการตัดขวางวัดขนาดนักเกตและอัตราการผลิต และการทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงดึงเงื่อนไขด้วยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยการปรับเวลาการเชื่อมและสุมชิ้นงานมาตรวจสอบจนกว่าจะพบความผิดปกติในขณะที่เชื่อมหรือชิ้นงานไม่ตรงตามข้อกำหนดจึงหยุดปรับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาระยะเวลาเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด พบว่าที่เวลาเชื่อม 24 รอบ มีค่าเฉลี่ยแรงดึงเงื่อนไขไม่แตกต่างกับ 30 รอบ และยังคงมีขนาดนักเกตตรงตามข้อกำหนดชิ้นงาน และยังสามารถยืดอายุการใช้งานของหัวเชื่อมได้มากขึ้นจาก 148 จุด เป็น 225 จุด ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงตามไปด้วย ควรศึกษาเพิ่มเติมถ้าสามารถปรับแต่งค่าความผันแปรของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเชื่อมได้อาจจะช่วยลดเวลาการทำงานลงได้อีก

ณัฐกฤต แสงสว่าง และจริยาภรณ์ อุ่นวงษ์ (2555) ศึกษาคุณภาพงานเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และอลูมิเนียมเกรด 5052 ด้วยการทดสอบเชื่อมแผ่นแบบเกยด้วยความหนาชิ้นงาน 1 มิลลิเมตร ออกแบบการทดลองโดยจับคู่เหล็กชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน และทดสอบแรงดึงเงื่อนไข ขนาดของนักเกต และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อจุดเชื่อม ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ General full factorial และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA ในโปรแกรม Minitab พบว่าประเภทเหล็กสามารถยึดติดกันเองได้ดี แต่การเชื่อมเหล็กกับอลูมิเนียมยึดติดกันไม่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร และการทดสอบค่าแรงดึงเงื่อนไขต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดอื่น ๆ และยังพบว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากและเวลาเชื่อมนานจนเกินไปทำให้เกิดสะเก็ดไฟรอบรอยเชื่อม บริเวณผิวหน้ามีรอยไหม้ และโครงสร้างจุลภาคยึดติดกันไม่ดี นักเกตแตกร้าว แรงดึงลดลง ดังนั้นการเชื่อมจึงควรใช้ปริมาณกระแสไฟและเวลาเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีและมีคุณภาพมากที่สุด

สมศักดิ์ แก้วพลอย และกุลยุทธ บุญแข็ง (2557) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองชนิด General full factorial เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบไม้อย่างพาราให้มีความชื้นน้อยลงและตรงตามมาตรฐาน เพื่อลดต้นทุนและลดเวลาการอบในกรณีที่มีความชื้นไม่อยู่ในข้อกำหนด ทำให้เสียเวลาอบนานยิ่งขึ้น โดยพิจารณา 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ เวลา และการเปิด-ปิดปล่องระบายอากาศ พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความชื้นในไม้อย่างพารา คือ อุณหภูมิและเวลา กล่าวคือ ยิ่ง

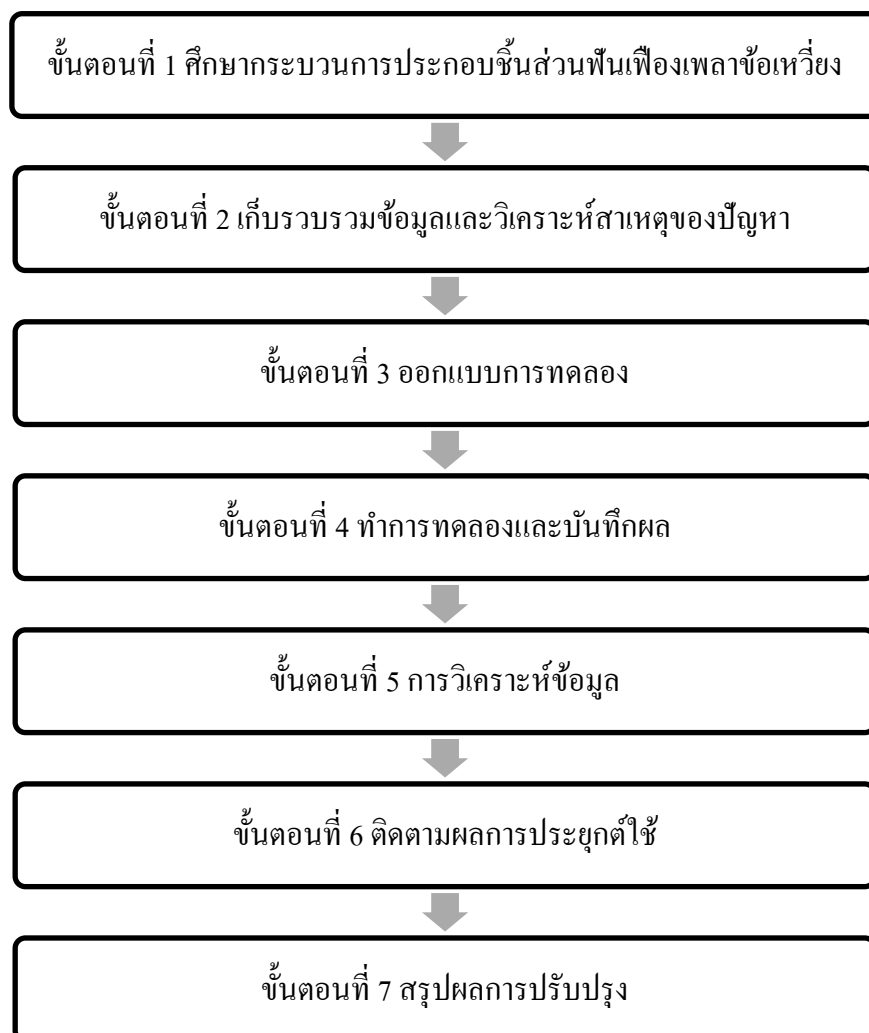
อุณหภูมิสูงและอบด้วยระยะเวลาสั้นจะสามารถลดความชื้นได้ ส่วนปัจจัยร่วมอื่น ๆ ไม่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนองที่สนใจด้วยนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นหาสมการเส้นถดถอยทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์เคน (Box-behken design) และ 99.95% สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย และทำการทดสอบยืนยันสถานะที่ได้จากการทดลองในกระบวนการผลิตจริงพบว่าค่า C_{pk} อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Juraeva, Ryu and Song (2013) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อออกแบบแม่พิมพ์งานพลาสติก และหาสภาวะที่เหมาะสมของเกตทางเข้าของพลาสติกเพื่อให้มีการไหลในแม่พิมพ์อย่างดีที่สุด เพราะเมื่อใช้งานไปนาน ๆ จุดทางเข้านี้จะถูกสัมผัสด้วยแรงอัดจากการฉีดเข้าไปบ่อยทำให้เกิดการสึกหรอได้ง่ายและต้องเปลี่ยนแม่พิมพ์บ่อยครั้ง ผู้ศึกษาใช้ CAE โปรแกรมจำลองทิศทางการไหลของพลาสติก แล้วจึงปรับปรุงออกแบบทางเข้านี้มีความเหมาะสมที่สุด โดยออกแบบการทดลองแบบ General full factorial design และผลตอบสนองที่สนใจ คือ อัตราเฉือน (Shear rate) พิจารณาจาก 4 ปัจจัย คือ ความหนา ความกว้าง ความยาว และมุมของเกตทางเข้า จากนั้นใช้ RSM เพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นขนาดของเกตทางเข้าและสามารถลดอัตราเฉือนได้ 11%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

เนื่องจากผู้ศึกษาต้องการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมประสานแบบจุดที่เหมาะสมในการยึดชิ้นส่วนเฟืองเพลาคือเพื่อให้มีค่าความต้านทานแรงดึงไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ของลูกค้า โดยมีแผนการดำเนินงาน 8 ขั้นตอน ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย

ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง

1. ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 เป็นผู้ผลิตผงโลหะอัดขึ้นรูป (Sintered metal products) สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า และชิ้นส่วนคอมเพรสเซอร์ มีประสบการณ์ทางด้านชิ้นส่วนผงโลหะมากกว่า 10 ปี โดยมีกระบวนการผลิตหลัก คือ การอัดขึ้นรูป (Compacting) และการให้ความร้อน (Sintering) จึงได้รับมอบหมายให้ผลิตเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อส่งมอบให้กับลูกค้าผู้ประกอบการผลิตรถยนต์ทั้งเพื่อขายภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศ

บริษัทผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 เป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนด้วยวิธีกดขึ้นรูปโลหะ (Press) กัด (Lathe) และเชื่อมประสานแบบจุด เพื่อยึดชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงเข้าด้วยกัน

2. ชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง (Sprocket crank shaft)

ในเครื่องยนต์ดีเซลชิ้นส่วนเฟืองประกอบอยู่กับเพลาค้อเหวี่ยง มีหน้าที่ขับเคลื่อนสายพานและชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำหน้าที่จุดแกนเพลาลูกเบี้ยวให้ทำงานเป็นจังหวะสอดคล้องกันสำหรับเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ชนิดยึดเข้าด้วยกัน คือ

2.1 เฟืองผงโลหะอัดขึ้นรูป มีหน้าที่ยึดติดกับเพลาค้อเหวี่ยงและรองรับสายพานทำงานด้วยการหมุนดึงให้สายพานไปขับเคลื่อนระบบอื่น ๆ

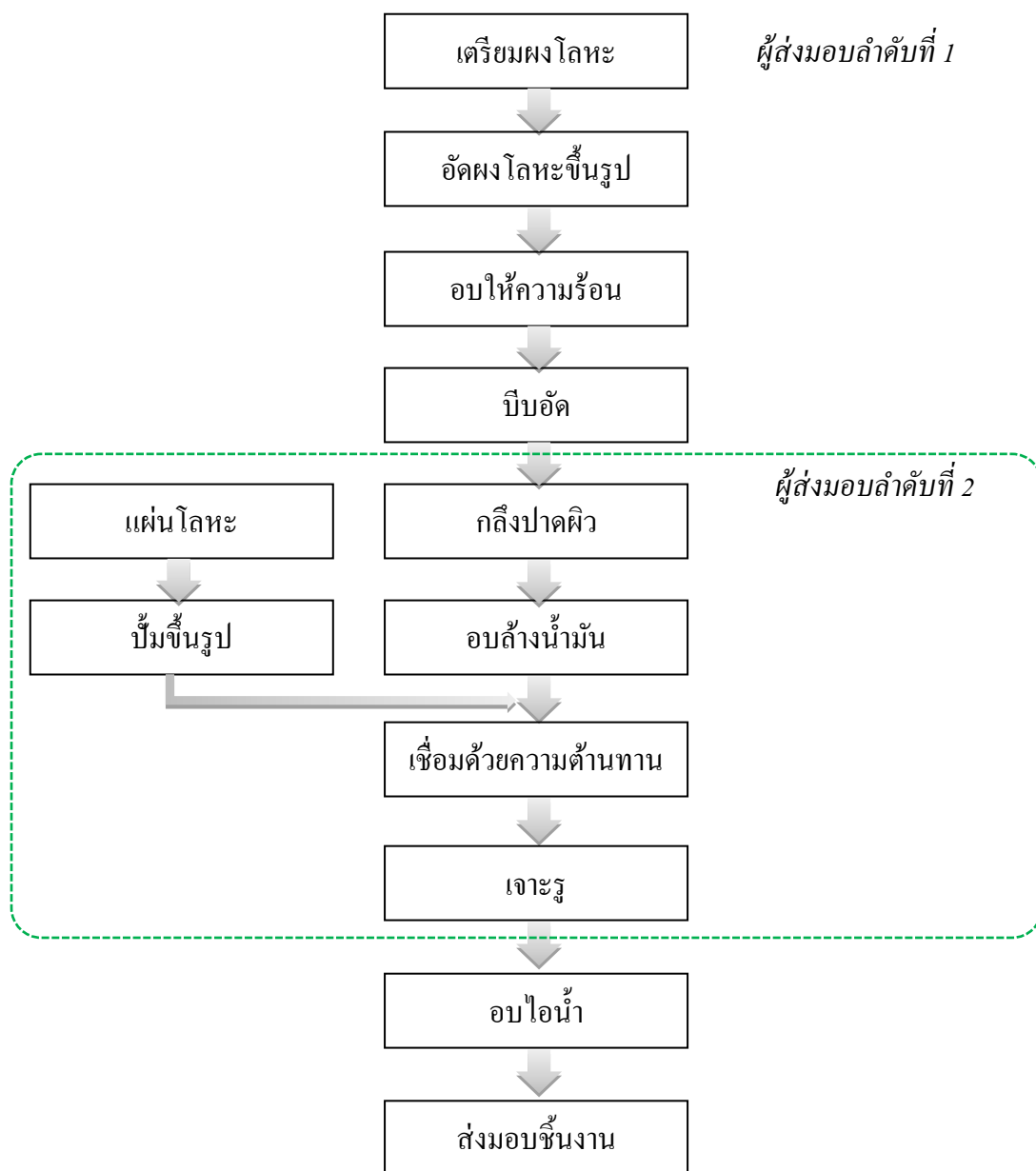
2.2 แผ่นโลหะปั๊มขึ้นรูป ประกอบยึดติดกับพื้นเฟืองด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด มีหน้าที่ประคองสายพานให้อยู่ในตำแหน่งที่เฟืองรองรับได้ ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง

3. กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาช้อเหวี่ยง

การผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาช้อเหวี่ยงต้องผลิตชิ้นส่วนเฟืองวงโลหะอัดขึ้นรูปจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 จากนั้นส่งชิ้นส่วนไปให้ผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 เพื่อยึดติดกับแผ่นโลหะด้วยกรรมวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด โดยมีกระบวนการผลิตดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาช้อเหวี่ยง

4. กระบวนการประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยง

ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงมี 11 งานย่อยดังตารางที่ 3-1 เริ่มตั้งแต่หยิบชิ้นงานใส่ลง Jig ต่าง ปรับชิ้นงานให้ตรงตำแหน่ง ใส่ Jig แกนลึอก วางแผ่นโลหะลงบนชิ้นงานพื้นเฟือง ทำการเชื่อมชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 1-8 จนปลดชิ้นงานออกจาก jig ตรวจสอบรอยเชื่อม และวางชิ้นงานลงในกล่อง จากนั้นส่งงานไปกระบวนการถัดไป ชิ้นงานที่ผลิตแต่ละล๊อตจะถูกสุ่มมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงโดยผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 เนื่องจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 ไม่มีเครื่องมือทดสอบ พื้นที่ปฏิบัติงานเชื่อมประสานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 พื้นที่ทำงานการเชื่อมประสานแบบจุด

ตารางที่ 3-1 ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนด้วยการเชื่อมประสานแบบจุด

ขั้นตอนที่	งานย่อย	วิธีการทำงาน	เหตุผล
1	เตรียมชิ้นงาน	ใช้มือขวาหยิบชิ้นงาน	เพื่อไม่ให้ก้ามเนื้อบาดเจ็บ
2	ใส่ชิ้นงานลงบน Jig ต่าง	ใช้มือขวาจับชิ้นงานหมุนด้าน	ป้องกันการใส่ไม่ตรง Jig

		เฟืองขึ้น ใช้มือซ้ายประคอง ชิ้นงานด้านล่าง แล้วใส่ลงบน Jig	และชิ้นงานมีน้ำหนักมากถือ มือเดียวอาจทำให้ข้อมือล้า และบาดเจ็บได้
3	ปรับชิ้นงานให้ตรงตำแหน่ง	หมุนชิ้นงานให้ลึ้ยู่ตรง ตำแหน่งเริ่ม	เพื่อให้สังเกตได้ง่ายว่าเชื่อม จนครบทุกจุดแล้ว
4	ใส่ Jig แคนล็อก	ใส่ Jig แคนล็อกในร่องคีย์	เพื่อให้ Jig ล่างและ แกนล็อกหมุนพร้อมกัน
5	วางแผนโลหะลงบนชิ้นงาน พื้นเฟือง	แผ่นโลหะด้านที่มีรอยโค้งแล้ว วางลงบนพื้นเฟือง	ป้องกันการประกอบผิดด้าน
6	เชื่อมชิ้นงานที่ตำแหน่งแรก	ใช้มือกดแผ่น โลหะไว้จึงใช้ เท้ากดลงบนแป้น	ระวังไม่ให้แผ่นโลหะขยับ ตำแหน่งและอาจเลื่อนได้
7	ขยับชิ้นงานไปตำแหน่งที่สอง	ใช้มือขวาจับ Jig ล่างยกขึ้น แล้วหมุนไปด้านขวา	เพื่อรักษาตำแหน่งชิ้นงาน ทั้งสองให้ตรงจุดเชื่อมพอดี 1 ตำแหน่งจึงจึงวางลง
8	ทำซ้ำขั้นตอนที่ 6 และขั้นตอน ที่ 7 จนครบทั้ง 8 จุด		แผ่นโลหะอาจหลุดได้ ทำให้ ค่าความทนแรงดึงต่ำ
9	ตรวจสอบชิ้นงาน	ยกชิ้นงานออกจาก Jig และ ตรวจสอบรอยกด ครีบและ น้ำเหล็ก	ชิ้นงานเสียไม่หลุดรอดออก จากกระบวนการ
10	นำ Jig แคนล็อกออก	คว่ำชิ้นงานลง Jig จะหลุด ออกมา	นำ Jig แคนล็อกไปใช้ใน ชิ้นส่วนถัดไป
11	จัดเก็บลงกล่อง	มือซ้ายวางชิ้นงานลงกล่อง	เพื่อไม่ให้ก้ามเนื้อบาดเจ็บ

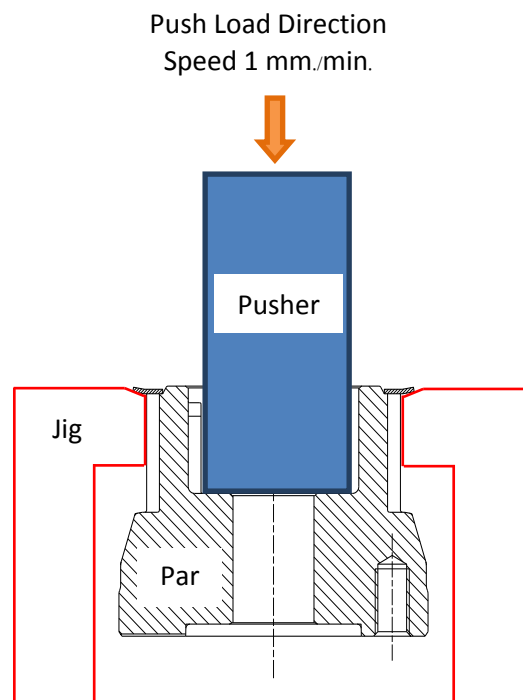
5. การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง

การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเป็นการทดสอบคุณลักษณะทางกลเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบอัตโนมัติและอุปกรณ์จับชิ้นงานดังภาพที่ 3-5 และภาพที่ 3-6 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานออกแบบมาพิเศษใช้สำหรับชิ้นส่วนนี้ โดยเฉพาะ วิธีการใช้งานคือ วางชิ้นงานให้บ่าแผ่นโลหะทาบบน jig มีแกนกลางถูกรับแรงกดจากเครื่องทดสอบ กดส่วนที่

เป็นเพียงลงไปด้านล่างด้วยแรงที่สม่ำเสมอในทิศทางเดียว จนกระทั่งชิ้นงานและแผ่นโลหะขาดออกจากกัน ระหว่างการทดสอบเครื่องวัดการยืดตัวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องแล้วสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการยืดตัวในรูปของกราฟความเค้นและความเครียด

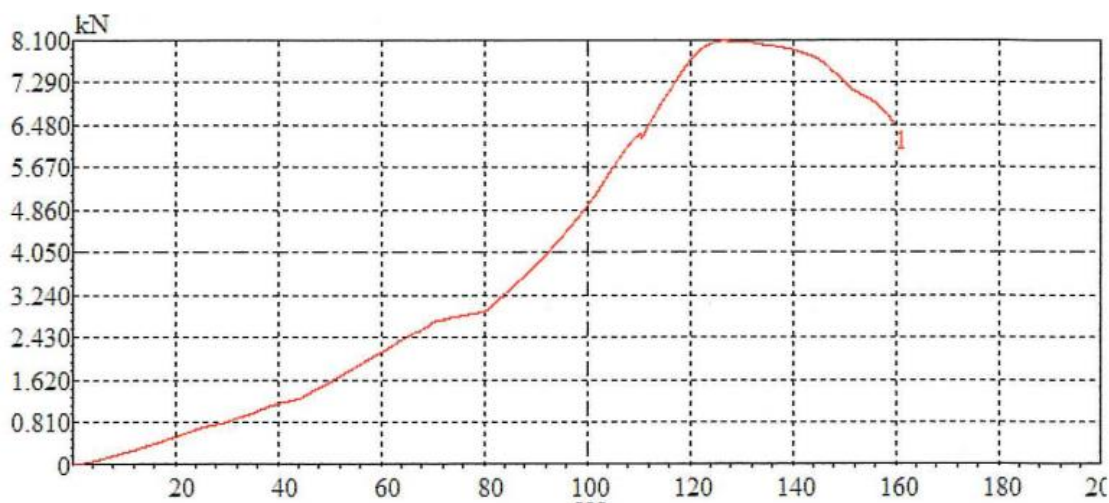


ภาพที่ 3-5 เครื่องทดสอบค่าความทนแรงดึง (Tensile strength)



ภาพที่ 3-6 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง

การทดสอบจะเพิ่มแรงดึงเกินจุดคราก จนชิ้นงานทดสอบขาดจากกัน ตัวอย่างกราฟที่บันทึกได้จากเครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง อ่านค่าจุดสูงสุดของกราฟได้ค่าความทนแรงดึง 8.1 kN ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างกราฟที่บันทึกได้จากการทดสอบแรงดึง

เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

1. ศึกษาปัญหาความสามารถในการผลิตของเฟืองเพลลาข้อเหวี่ยง

จากกระบวนการผลิตข้างต้นผู้ส่งมอบเตรียมกระบวนการผลิตและเริ่มทดลองผลิตชิ้นส่วนเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปทดสอบสมรรถนะของชิ้นส่วน โดยการประกอบบนเครื่องยนต์จริงและเดินเครื่องจริงเป็นระยะเวลามากกว่า 500 ชั่วโมง เพื่อทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของชิ้นส่วนในสภาวะใช้งานจริงพบว่าชิ้นงานส่วนแผ่น โลหะมีสภาพแตกหัก ดังภาพที่ 3-8

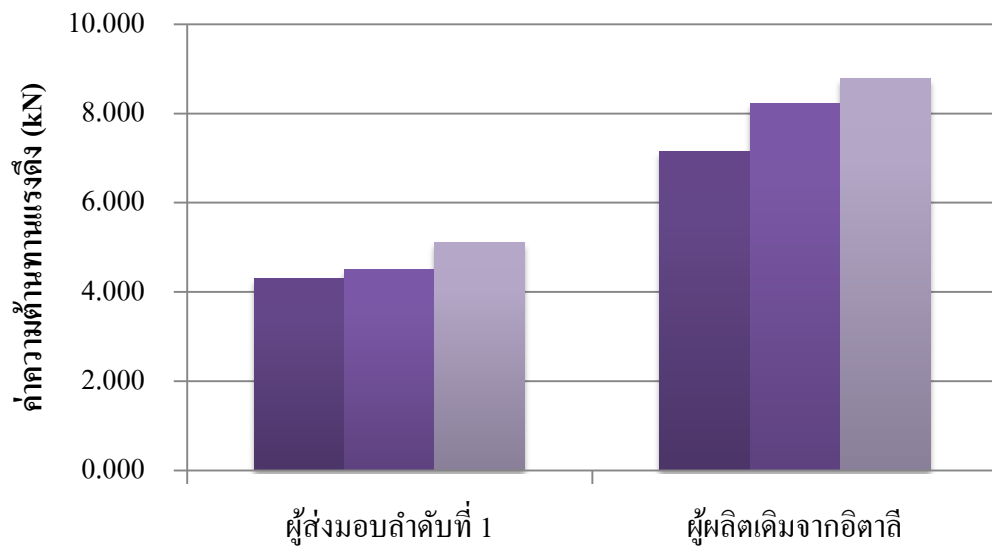


ภาพที่ 3-8 สภาพชิ้นงานแตกหลังจบการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง

ผู้ศึกษาและผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 นำชิ้นส่วนล้อยึดเดียวกับชิ้นส่วนตัวอย่างที่นำไปทดลอง และชิ้นส่วนของผู้ผลิตเดิมจากประเทศอิตาลีมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าชิ้นส่วนผู้ผลิตลำดับที่หนึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 4.633 kN และชิ้นส่วนจากผู้ผลิตเดิม มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 8.052 kN ดังตารางที่ 3-2 และภาพที่ 3-9

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 และผู้ผลิตเดิมจากอิตาลี

ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	
	ผู้ส่งมอบลำดับที่ 1	ผู้ผลิตเดิมจากอิตาลี
1	4.300	7.151
2	4.500	8.224
3	5.100	8.780
เฉลี่ย	4.633	8.052



ภาพที่ 3-9 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงจากผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 และผู้ผลิตเดิมจากอิตาลี

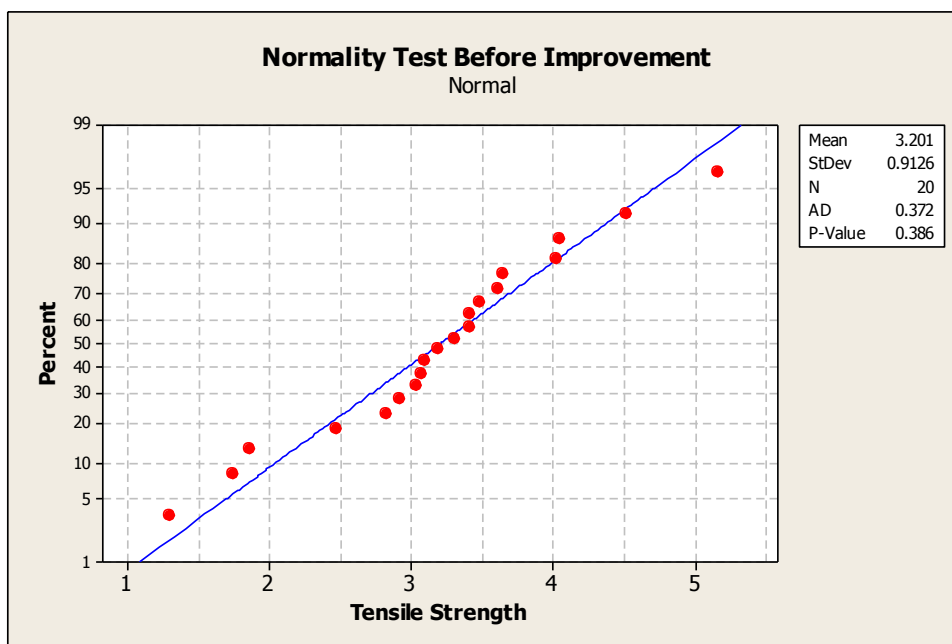
ดังนั้นต้องปรับปรุงกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด เพื่อให้มีค่าความต้านทานแรงดึงของเฟืองเพลาคือหีวยังมีค่าไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ของลูกค้า (7 kN) เพื่อกำจัดปัญหาความล้มเหลวในการใช้งานจริง

คุณลักษณะทางคุณภาพและความสามารถปัจจุบันของกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด มีความผันแปรในกระบวนการเชื่อมจากหลายปัจจัย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ไม่ตรงตามข้อกำหนด ผู้ศึกษาทำการวิเคราะห์ความสามารถปัจจุบันของกระบวนการ เพื่อให้ทราบถึงปัญหาจากกระบวนการผลิตและต้องการหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุง โดยทำการเก็บข้อมูลของชิ้นส่วนตัวอย่างในการผลิตครั้งแรกจำนวน 20 ชิ้น ดังตารางที่ 3-3 มาเพื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถปัจจุบันของกระบวนการผลิต

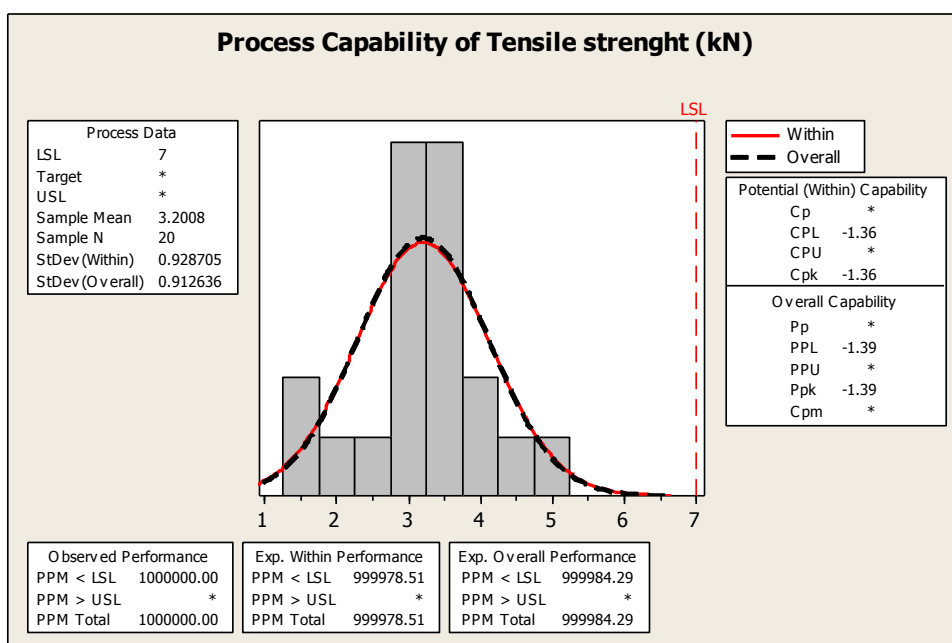
ตารางที่ 3-3 ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตครั้งแรก

ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1	3.060	11	1.742
2	3.401	12	1.860
3	3.182	13	4.037
4	3.407	14	2.470
5	4.515	5	3.609
6	3.298	16	3.640
7	5.156	17	3.092
8	3.033	18	1.292
9	4.012	19	2.821
10	2.913	20	3.476

จากการนำข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงในการผลิตครั้งแรกมาทดสอบการแจกแจงของข้อมูลความต้านทานแรงดึงที่เก็บรวบรวมมา ดังภาพที่ 3-10 พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ด้วยค่า p เท่ากับ 0.386 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จากนั้นวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตดังภาพที่ 3-11 แสดงให้เห็นว่าความสามารถของกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.2008 kN และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 0.928 และมีดัชนีความสามารถ Ppk เท่ากับ -1.39 และซึ่งต่ำมาก พิจารณาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถ Ppk เนื่องจากอยู่ในช่วงการทดลองผลิตยังไม่ Mass production ข้อมูลที่ทดลองยังไม่สามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการได้



ภาพที่ 3-10 ทดสอบการแจกแจงของค่าความต้านทานในการผลิตครั้งแรก



ภาพที่ 3-11 ความสามารถของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบในการผลิตครั้งแรก

2. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกระบวนการผลิต

พิจารณาวิเคราะห์กระบวนการผลิตชิ้นส่วนพื้นเพองเพลลาข้อเหวี่ยง โดยใช้หลักการ SIPOC ช่วยอธิบายใช้ความสัมพันธ์โดยรวมของกระบวนการผลิต ที่ต้องอาศัยปัจจัยต้นน้ำส่งมอบคุณค่าไปยังปลายทางอย่างเป็นระบบ อันได้แก่ Suppliers หรือผู้ส่งมอบ นำส่ง Input หรือปัจจัยนำเข้าต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทำ Process หรือกระบวนการเพื่อผลิตให้ได้ Output หรือผลผลิตในสินค้าบริการแล้วส่งมอบให้ Customers หรือลูกค้า ผู้รับบริการต่อไป

โดยภาพที่ 3-12 สามารถอธิบายกระบวนการผลิตเพองเพลลาข้อเหวี่ยง โดยรวมได้ทั้งหมด เริ่มจากรับคำสั่งซื้อจากลูกค้าเพื่อสามารถวางแผนการผลิต และจัดหาวัตถุดิบผงโลหะในการผลิต ตั้งแต่กระบวนการเตรียมผงโลหะให้ได้ปริมาณเหมาะสมต่อการผลิตล็อตหนึ่ง ๆ แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปให้ได้เป็นชิ้นส่วนรูปร่างที่ต้องการ กระบวนการนี้ค่าความหนาแน่นเป็นสิ่งสำคัญที่สุด แต่ชิ้นส่วนยังเปราะและแตกหักได้ง่าย จึงนำไปอบให้ความร้อนช่วยประสานผงโลหะให้เป็นเนื้อเดียวกันและมีการยึดติดที่ดีขึ้น ซึ่งหลังจากอบแล้วชิ้นส่วนอาจจะขยายตัวขึ้นจึงต้องไปบีบอัดอีกครั้งเพื่อให้ได้ขนาดตรงตามข้อกำหนดมากที่สุด จากนั้นชิ้นส่วนจะถูกส่งไปยังผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 เพื่อดำเนินกระบวนการต่อด้วยการปาดผิวและอบไล่ไอน้ำมันออกจากชิ้นส่วนให้มากที่สุด การยึดเพองและแผ่นโลหะเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมประสานแบบจุดให้ชิ้นส่วนทั้งสองยึดติดกัน เจาะรูเพื่อส่งกลับคืนให้ผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 เพื่อเข้ากระบวนการอบไอน้ำป้องกันสนิมเป็นลำดับสุดท้าย โดยก่อนที่จะส่งมอบชิ้นงานผู้ผลิตต้องมั่นใจว่าชิ้นส่วนมีคุณภาพตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า จึงต้องสุ่มชิ้นส่วนไปวัดขนาดและทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงก่อนที่ส่งมอบชิ้นงานไปให้กับลูกค้า

เนื่องจากการตั้งเครื่องจักรและการติดตั้งแม่พิมพ์เพื่อเปลี่ยนรุ่นในแต่ละครั้งต้องใช้เวลานาน ดังนั้นชิ้นส่วนที่ได้จากการผลิตในแต่ละมีจำนวนมากกว่า 10,000 ชิ้น กล่าวได้ว่าเป็นการผลิตแบบล็อตใหญ่ (Batch) เพราะรอบของการผลิตในกระบวนการเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งต้องมีชิ้นงานที่อยู่ระหว่างกระบวนการผลิต (Work in process: WIP) อีกจำนวนมาก ตั้งแต่กระบวนการเตรียมผงโลหะ อัดผงโลหะขึ้นรูป อบให้ความร้อน และบีบอัด จนกระทั่งส่งต่อไปยังผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 ซึ่งก่อนเริ่มทำงานและระหว่างกระบวนการผลิต จะต้องมีฝ่ายควบคุมคุณภาพตรวจชิ้นงานว่าอยู่ในข้อกำหนดการผลิตก่อนเริ่มงาน สุ่มตรวจเช็คเป็นช่วง ๆ จากฝ่ายควบคุมคุณภาพ ซึ่งผู้ศึกษาได้วิเคราะห์ถึงความผันแปรระหว่างกระบวนการผลิตก่อนที่จะเข้าไปถึงกระบวนการประกอบไว้ดังภาพที่ 3-12

ผู้ส่งมอบ Supplier	ปัจจัยนำเข้า Input	กระบวนการ Process	ผลผลิต Output	ลูกค้า Customer	
				ความคาดหวัง	ลูกค้าของผลผลิต
แผนวางแผนการผลิต	คำสั่งซื้อจากลูกค้า	วางแผนการผลิต Production Plan		ชิ้นงานสำเร็จรูปตรงตาม ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ จำนวน ที่ต้องการ และเวลาส่งมอบ	ลูกค้าภายนอก
แผนกดัดข้อ	ผงโลหะสำเร็จรูป	เตรียมผงโลหะ Preparing	ผงโลหะสำเร็จรูปปริมาณที่ เหมาะสม	ชนิดผงโลหะตามข้อกำหนด ไม่มีสิ่งปนเปื้อน	แผนกดัดผงโลหะขึ้นรูป Compacting
แผนกบุคคล	จัดหาพนักงาน จัดฝึกอบรม	อัดผงโลหะขึ้นรูป Compacting	ชิ้นงานอัดขึ้นรูป	ขนาด น้ำหนักและความ หนาแน่นตรงตามข้อกำหนด ไม่มีรอยแตก	แผนกอบให้ความร้อน Sintering
แผนกซ่อมบำรุง	เครื่องจักรพร้อมใช้งาน ติดตั้ง และซ่อมแซมเครื่องจักร	อบให้ความร้อน Sintering	ชิ้นงานอบประสาน	โลหะเชื่อมประสานกัน ความแข็งแรงและขนาดตรงตาม ข้อกำหนด	แผนกบีบอัด Sizing
แผนกควบคุมคุณภาพ	การทดสอบและแผนการ ควบคุมคุณภาพ	บีบอัด Sizing	ชิ้นงานบีบอัดขนาดแล้ว	ขนาดตรงตามข้อกำหนด ไม่มีรอยแตก	แผนกจัดส่ง
แผนกจัดส่ง	แผนการส่งของ	ขนส่งไปยังผู้ส่งมอบลำดับที่ 2		ชิ้นงานไม่กระแตก และไม่มี รอยแตก	ผู้ส่งมอบลำดับที่ 2
ฝ่ายวางแผนการผลิตของผู้ส่ง มอบลำดับที่ 2	แผนการขาย	การขาย Sales		ชิ้นงานผ่านกระบวนการตรง ตามข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ จำนวนที่ต้องการ และเวลาส่ง มอบ	ผู้ส่งมอบลำดับที่ 1
	ชิ้นงานบีบอัดขนาดแล้ว	กลึงปาดผิว Machining	ชิ้นงานปาดผิวแล้ว	ขนาดรูกลางและความเรียบผิว ตรงตามข้อกำหนด	แผนกล้างน้ำมัน Cleaning
		อบล้างน้ำมัน Cleaning	ชิ้นงานแห้งสนิท	ไม่มีคราบน้ำมัน	แผนกเชื่อมด้วยความต้านทาน Spot welding
	แผ่นโลหะ	เชื่อมด้วยความต้านทาน Spot welding	ชิ้นงานประกอบสำเร็จ	เชื่อมครบทุกจุด ค่าความ หนาแน่นตรงตามข้อกำหนด ชิ้นงานไม่มีช่องว่างหรือเสียรูป	แผนกเจาะรู Tapping
		เจาะรู Tapping	ชิ้นงานเจาะรูเกลียวแล้ว	รูเกลียว 4 รู ขนาด M8 และมีเกลียวสมบูรณ์	แผนกจัดส่ง
แผนกจัดส่ง	แผนการส่งของ	ขนส่งไปยังผู้ส่งมอบลำดับที่ 1		ชิ้นงานไม่กระแตก และไม่มี รอยแตก	ผู้ส่งมอบลำดับที่ 1
	ชิ้นงานเจาะรูเกลียวแล้ว	อบไอน้ำ Steam Treatment	ชิ้นงานสำเร็จรูป	ผิวเคลือบไอน้ำอย่างสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกที่เกิดจากสตีม ค่าความทนแรงดึงตรงตาม ข้อกำหนด	แผนกควบคุมคุณภาพ QA/QC
		ส่งมอบชิ้นงาน Delivery	ชิ้นงานสำเร็จรูป	ชิ้นงานตรงตามข้อกำหนด ไม่มีสิ่งปนเปื้อน ส่งมอบตรงเวลา	ลูกค้าภายนอก

ภาพที่ 3-12 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตด้วยวิธี SIPOC

การเตรียมผงโลหะ (Preparing) ผงโลหะตั้งชื่อมาจากต่างประเทศ เป็นผงโลหะชนิดผสมสำเร็จรูป ทางผู้ผลิตมีหน้าที่ตวงให้ได้ปริมาณที่ต้องการ พักไว้เพื่อรอนำไปใช้ในกระบวนการถัดไป การอัดผงโลหะขึ้นรูป (Compacting) ใช้เวลาการติดตั้งแม่พิมพ์นานมากกว่า 6 ชั่วโมง สำหรับการเปลี่ยนรุ่นแต่ละครั้ง โดยก่อนเริ่มงานพนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพต้องเข้ามาตรวจเช็คขนาดของชิ้นงานและความหนาแน่นเป็นไปตามข้อกำหนดเพื่อรับประกันคุณภาพชิ้นงานก่อนที่นำเครื่องทำงานต่อได้ ซึ่งการผลิตแต่ละครั้ง ๆ ละมากกว่า 10,000 ชิ้น ของเสียที่เกิดจากกระบวนการนี้คือ ขนาดไม่ได้ตามข้อกำหนด ชิ้นงานแตก บิ่น รวมทั้งความหนาแน่นที่อัดในชิ้นงานไม่เพียงพอ

อาจเกิดขึ้นงานมีรูพรุน ส่งผลให้ความแข็งแรงในชิ้นส่วนไม่เพียงพอ แต่จากการทดลองเบื้องต้น ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงตัดปัจจัยที่อาจส่งผลให้ความทนแรงดึงล้มเหลวในกระบวนการนี้ออกไป และมั่นใจได้ว่าชิ้นงานถูกควบคุมปัจจัยเครื่องจักรเดียวกันเนื่องจากเป็นล็อตการผลิตเดียวกัน

การอบให้ความร้อน (Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้ผงโลหะอบประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิในเตาซึ่งเป็นแบบแผนเดียวกันทั้งหมด ซึ่งไม่มีการปรับอุณหภูมิในการผลิตชิ้นงาน สิ่งสำคัญของกระบวนการนี้ คือ การควบคุมอุณหภูมิในแต่ละช่วงต้องอยู่ภายใต้การควบคุมและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ หรือถ้ามีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนแผนอุณหภูมิใหม่ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาถึง 3 วันในการปรับอุณหภูมิใหม่ ทำให้เสียโอกาสในการผลิตชิ้นงาน ผู้ผลิตจึงหลีกเลี่ยงการปรับเปลี่ยนแบบแผนอุณหภูมิภายในเตา และแยกเตาสำหรับชิ้นงานที่ใช้แบบแผนแตกต่างกัน กระบวนการนี้ถูกควบคุมคุณภาพตั้งแต่ชิ้นงานเริ่มเข้าเตาและชิ้นงานสุดท้ายที่ออกจากเตา จึงมั่นใจได้ว่าความผันแปรจากเครื่องจักรจะไม่เกิดในกระบวนการนี้

การบีบอัด (Sizing) ชิ้นงานที่ออกจากเตาอบแล้วอาจมีการยืดขยายตัวเนื่องจากความร้อน และด้วยชิ้นงานมีค่าควบคุมที่แคบมาก จึงมีการเพิ่มกระบวนการบีบอัดขนาดเข้ามาเพื่ออัดชิ้นงานอีกครั้งให้ได้ขนาดสุดท้ายตรงกับข้อกำหนดของลูกค้า

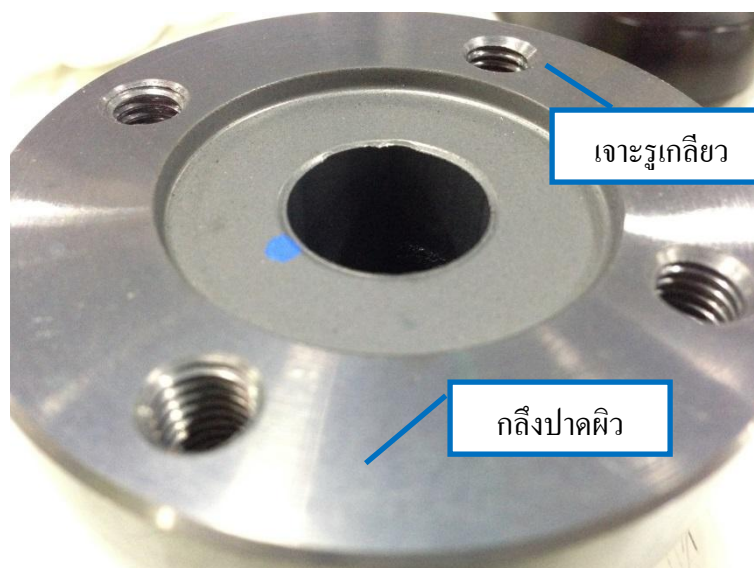
การกลึงปาดผิว (Machining) เป็นการปาดผิวรูด้านใน และหน้าชิ้นงาน ซึ่งเป็นคนละด้านกับที่ถูกเชื่อมประกอบ จึงสามารถตัดปัจจัยจากกระบวนการนี้ไป

การอบล้างน้ำมัน (Cleaning) เป็นการล้างน้ำมันที่ติดชิ้นงานมาจากกระบวนการกลึงปาดผิวให้แห้งสนิท และต้องไม่มีคราบน้ำมันที่ชิ้นงาน ซึ่งในการทดลองช่วงพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม่มีกระบวนการอบล้างน้ำมัน แต่เนื่องจากการทดลองเชื่อมประกอบชิ้นงานจะต้องแห้งสนิท อาจทำให้ชิ้นงานเชื่อมกันไม่ติด ทางผู้ผลิตจึงเพิ่มกระบวนการอบล้างน้ำมันเข้ามา เป็นการช่วยให้การเชื่อมประกอบสามารถมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การเชื่อมประสานแบบจุด (Spot welding) เป็นการเชื่อมประกอบแผ่นโลหะให้ติดกับเฟือง กระบวนการนี้จึงมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับความล้มเหลวในการเชื่อมได้ค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์

การเจาะรู (Tapping) เป็นการเจาะรูเกลียวจำนวน 4 รูขนาด M8 ไปบนหน้าชิ้นงานที่ถูกกลึงปาดผิว ซึ่งอยู่คนละฝั่งกับชิ้นส่วนเชื่อมประกอบ ดังภาพที่ 3-12 จึงไม่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหานี้

การอบไอน้ำ (Steam treatment) เป็นการอบเพื่อให้ไอน้ำเคลือบผิวชิ้นงานให้ทั่ว จุดประสงค์เพื่อป้องกันสนิมที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการจัดเก็บและการขนส่งไปต่างประเทศ



ภาพที่ 3-13 ส่วนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกลึงปาดผิวและเจาะรูเกลียว

จากกระบวนการผลิตทั้งหมดชิ้นงานผ่านกระบวนการผลิตเดียวและผลิตครั้งละมาก ๆ เป็นล็อตใหญ่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเครื่องจักร และพนักงาน วิธีการงาน ที่ถูกกำหนดไว้โดยไม่มี การเปลี่ยนแปลง อีกทั้งชิ้นงานที่ผ่านมาจากแต่ละกระบวนการมีการควบคุมให้ตรงกับข้อกำหนดไว้ ทุกประการแล้ว ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับการยึดติดไม่สมบูรณ์ คือ กระบวนการ เชื่อมประสานแบบจุด เพราะจากการทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นส่วนผงโลหะตรงตาม ข้อกำหนด แต่จุดที่เชื่อมไม่ดีพอทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นส่วนได้ ผู้ศึกษาจึงมุ่งไปที่กระบวนการ เชื่อมประสานแบบจุดและนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุในลำดับต่อไป สรุปได้ดังตารางที่ 3-4

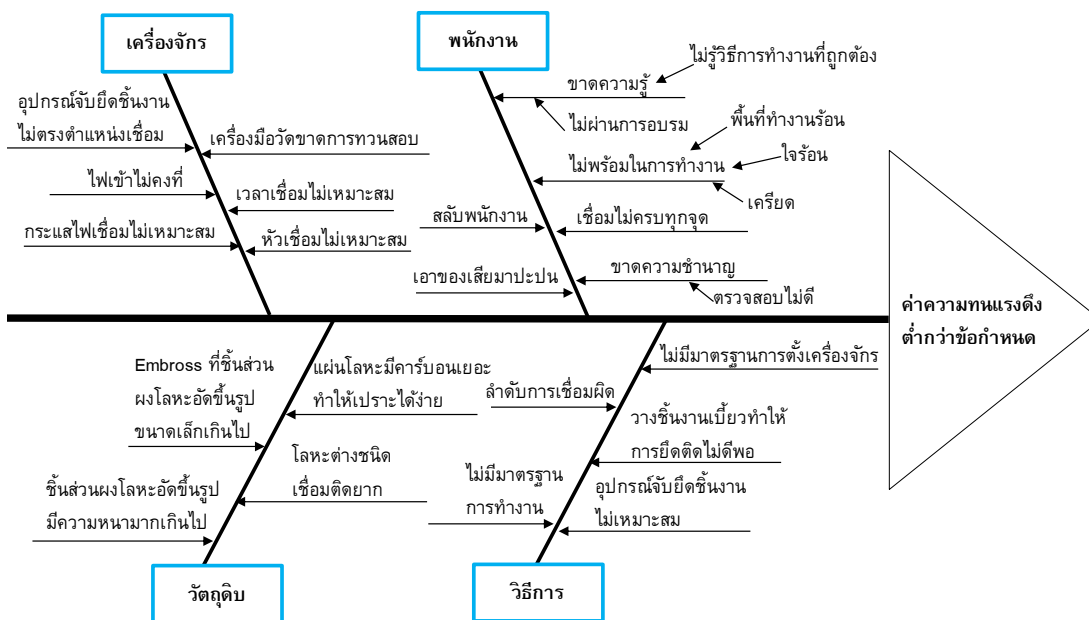
ตารางที่ 3-4 การพิจารณาปัจจัยที่ถูกควบคุมในกระบวนการ

กระบวนการ	ปัจจัยที่ถูกควบคุม	เหตุใดจึง ควร/ไม่ควรพิจารณา
เตรียมผงโลหะ Preparing	- ผงโลหะชนิดผสมสำเร็จรูป - ปริมาณผงโลหะ - ระยะเวลาการจัดเก็บเท่ากัน	- ใช้วัตถุดิบล็อตเดียวกันทั้งหมด - ใช้เวลาผลิตนาน จึงผลิตล็อต ขนาดใหญ่เพื่อทยอยแบ่งส่งไปยัง
อัดผงโลหะ ขึ้นรูป Compacting	- ขนาด - ความหนาแน่นของเฟืองอัดขึ้นรูป - ลักษณะภายนอก	ผู้ส่งมอบลำดับที่ 2 - ผลการตรวจสอบคุณภาพภายใน และหลังจากกระบวนการผลิต ทั้ง
อบให้ความร้อน Sintering	- ควบคุมอุณหภูมิในเตา - แบบแผนเดียว ไม่เปลี่ยนแปลง - ความแข็ง - ลักษณะภายนอก	ขนาด ลักษณะชิ้นงาน ตรงตาม ข้อกำหนด - ค่าความหนาแน่นของเฟืองได้ มากกว่าข้อกำหนด
บีบอัด Sizing	- ขนาด - Tooth profile - ลักษณะภายนอก	- ค่าความแข็งตรงตามข้อกำหนด - ผลการทวนสอบไม่พบ ความผิดปกติระหว่างกระบวนการ ไม่พิจารณา
กลึงปาดผิว Machining	- ขนาด	คนละด้านกับพื้นที่ถูกเชื่อม ไม่พิจารณา
อบล้างน้ำมัน Cleaning	- แห้งสนิท ไม่มีน้ำมันตกค้าง - ระยะเวลาอบ	ช่วยในการยึดติดตอนเชื่อม ไม่พิจารณา
เชื่อมด้วย ความต้านทาน Spot welding	- ค่าความต้านทานแรงดึง - ขนาด - ลักษณะภายนอก	จุดประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน เกิดค่าความต้านทานแรงดึง พิจารณา
เจาะรู Tapping	- ขนาดรู	คนละด้านกับพื้นที่ถูกเชื่อม ไม่พิจารณา
อบไอน้ำ Steam Treatment	- แบบแผนการอบเดียวกัน - การควบคุมอุณหภูมิ	Fixed ไม่พิจารณา

การออกแบบการทดลอง

1. การกำหนดปัจจัยเพื่อออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์สาเหตุการเกิดความผันแปรของค่าความต้านทานแรงดึงที่กระบวนการเชื่อมประสานแบบจุดด้วยวิธีการประชุมกลุ่มเพื่อช่วยกันระดมสมองของทีมงานพัฒนาชิ้นส่วนและฝ่ายผลิตจากประสบการณ์พิจารณาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่อาจส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงไม่ตรงตามมาตรฐานด้วยแผนภาพเหตุและผล (Cause and effect diagram) ทำการทดสอบเพื่อคัดกรองกำหนดปัจจัยสำคัญและความสัมพันธ์ร่วมเพื่อออกแบบการทดลองต่อไป ในเบื้องต้นได้ดำเนินการทดสอบพบว่าปัจจัยใดมีผลกับค่าความต้านทานแรงดึงด้วยวิธีแบบการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One-factor-at-a-time) เพื่อกรองปัจจัยที่สามารถตัดออกไปได้ก่อนโดยจะส่งผลให้การดำเนินงานมีความรวดเร็วมากขึ้นไม่ต้องไปเสียเวลาตรวจสอบทุกปัจจัย เพื่อให้เหลือจำนวนปัจจัยในการออกแบบการทดลองที่แท้จริงเท่านั้น



ภาพที่ 3-14 แผนภาพแสดงเหตุและผล

ผลการวิเคราะห์แผนภาพเหตุและผล พบว่ามีสาเหตุที่เป็นไปได้และสามารถส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานด้วย 4M ด้วยสาเหตุจากระดมสมองดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 การวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าข้อกำหนดในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด

สาเหตุที่เกิด	ปัจจัยที่เป็นไปได้	การดำเนินการแก้ไข
พนักงาน	1. ขาดความรู้	1. จัดอบรมให้กับพนักงานที่มีหน้าที่ทำงานในงานเชื่อม
	2. ไม่พร้อมในการทำงาน	2. จัดอบรมให้กับพนักงานที่มีหน้าที่ทำงานในงานเชื่อม
	3. ขาดความชำนาญ	3. จัดอบรมให้กับพนักงานที่มีหน้าที่ทำงานในงานเชื่อม
	4. เชื่อมไม่ครบทุกจุด	4. จัดทำ Jig เพื่อเรียงลำดับการเชื่อมหมุนวนให้ครบทุกจุด
	5. สลับพนักงาน	5. กำหนดพนักงานประจำเครื่องคนเดียว
	6. เอาของเสียมาปะปน	6. ชิ้นส่วนที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดทั้งหมด
วิธีการ	1. ไม่มีมาตรฐานการทำงาน	1. ออกมาตรฐานการทำงาน
	2. วางชิ้นงานเบี้ยวทำให้ยึดติดไม่ดี	2. Jig ประกอบต้องร่วมศูนย์กัน
	3. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานไม่เหมาะสม	3. ทำ Jig ขึ้นมาใหม่ด้วยวัสดุที่คงทนและแม่นยำกว่าเดิม
	4. ลำดับการเชื่อมผิด	4. กำหนดจุดเริ่มต้นเชื่อมและหมุนตามเข็มนาฬิกาจนครบทุกจุด
	5. ไม่มีมาตรฐานการตั้งเครื่องจักร	5. รวบรวมการทดสอบและกำหนดเป็นมาตรฐานการตั้งเครื่องจักร

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

สาเหตุที่เกิด	ปัจจัยที่เป็นไปได้	การดำเนินการแก้ไข
เครื่องจักร	1. อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไม่ตรงจุดเชื่อม	1. ทำ Jig ขึ้นมาใหม่ด้วยวัสดุที่แม่นยำขึ้น
	2. ไฟเข้าไม่คงที่	2. ติดตั้งสายไฟเข้าที่เครื่องจักรเครื่องเดียวไม่แบ่งไปใช้ร่วมกับเครื่องอื่น
	3. กระแสไฟเชื่อมไม่เหมาะสม	3. ทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสม
	4. เวลาเชื่อมไม่เหมาะสม	4. ทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสม
	5. หัวเชื่อมไม่เหมาะสม	5. เปลี่ยนชนิดหัวเชื่อมใหม่
	6. เครื่องมือวัดขาดการทวนสอบ	6. ตรวจสอบเครื่องวัดการทวนสอบเครื่องทดสอบแรงดึง
	7. เครื่องจักรที่ใช้ไม่เหมาะสม	7. ทดสอบกับเครื่องจักรที่ใกล้เคียง
วัสดุคืบ	1. ชนิดแผ่น โลหะมีคาร์บอนเยอะ ทำให้เปราะได้ง่าย	1. ทดสอบแผ่น โลหะชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับตัวเดิม
	2. Emboss ที่ขึ้นส่วนผงโลหะอัดขึ้นรูปขนาดเล็กเกินไป	2. ขยายขนาด Emboss ให้ใหญ่ขึ้น โดยต้องปรับที่แม่พิมพ์ที่ผงโลหะอัดขึ้นรูป
	3. ขึ้นส่วนผงโลหะอัดขึ้นรูปมีความหนาเกินไป	3. ไม่สามารถปรับปรุงได้เนื่องจากเป็นข้อกำหนดจากลูกค้า
	4. โลหะต่างชนิดเชื่อมติดยาก	4. ไม่สามารถปรับปรุงได้เนื่องจากเป็นข้อกำหนดจากลูกค้า

จากผลการวิเคราะห์สาเหตุที่คาดว่าจะเป็นไปได้และการดำเนินการแก้ไขไปบางส่วนเบื้องต้นแล้ว เช่น การจัดการอบรมพนักงาน การกำหนดพนักงานประจำเครื่อง การจัดทำอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานใหม่ การติดตั้งระบบไฟฟ้าเข้าเครื่องจักรโดยตรงและใช้เพียงเครื่องเดียว เป็นต้น ทำให้เหลือเพียงไม่กี่ปัจจัยสรุปได้ดังนี้

สาเหตุที่ 1 หัวเชื่อมไม่เหมาะสม

สาเหตุที่ 2 เครื่องจักรที่ใช้ไม่เหมาะสม

สาเหตุที่ 3 ขนาด Emboss ที่ขึ้นส่วนผงโลหะอัดขึ้นรูปขนาดเล็กเกินไป

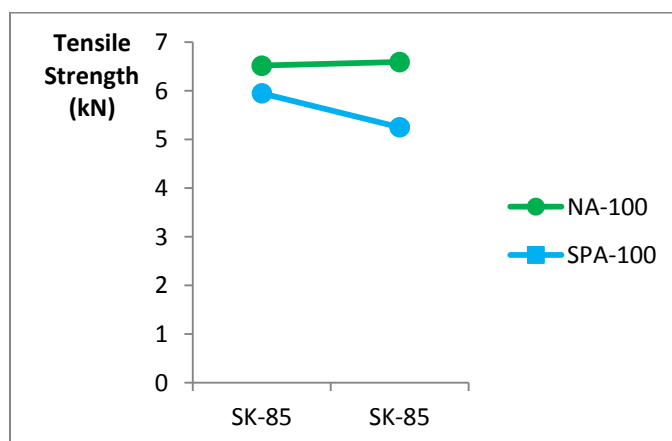
สาเหตุที่ 4 กระแสไฟเชื่อม ไม่เหมาะสม

สาเหตุที่ 5 เวลาเชื่อม ไม่เหมาะสม

สาเหตุที่ 6 ชนิดแผ่นโลหะมีคาร์บอนเยอะทำให้เปราะได้ง่าย

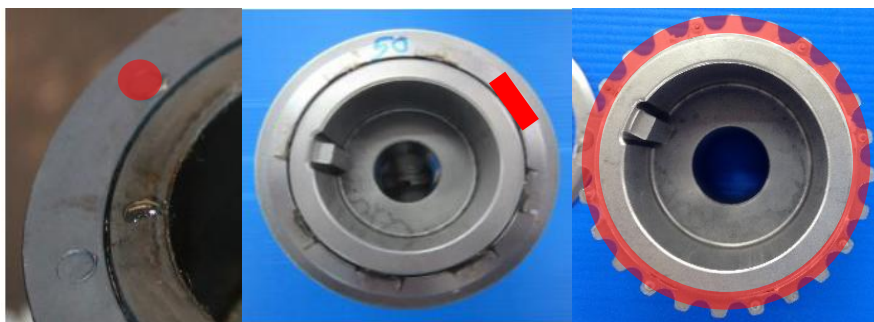
จากปัจจัยที่เหลือนี้ผู้ศึกษายังคาดว่าจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าข้อกำหนด ดังนั้นจึงทำการทดลองแบบการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One-factor-at-a-time) ในปัจจัยที่เหลือ เช่น เครื่องจักรที่ใช้ ขนาด Emboss และชนิดของหัวเชื่อม

การทดสอบเครื่องจักรที่ใช้ในบริษัทผู้ผลิต คือ NA-100 ผู้ศึกษาต้องการทราบว่าเปลี่ยนเครื่องจักรแล้วอาจทำให้ผลลัพธ์ดีขึ้นหรือไม่ จึงทำการทดลองขึ้น โดยการนำชิ้นงานไปขึ้นผลิตกับเครื่องจักร SPA-100 และตั้งค่าเครื่องจักรเหมือนกันทุกประการ ผลลัพธ์ คือ เครื่องจักร NA-100 ที่กำหนดให้ใช้ในกระบวนการผลิตดีกว่าเครื่องจักรใกล้เคียง จึงสามารถตัดปัจจัยด้านเครื่องจักรที่ใช้ ออกไปได้ ดังภาพที่ 3-15



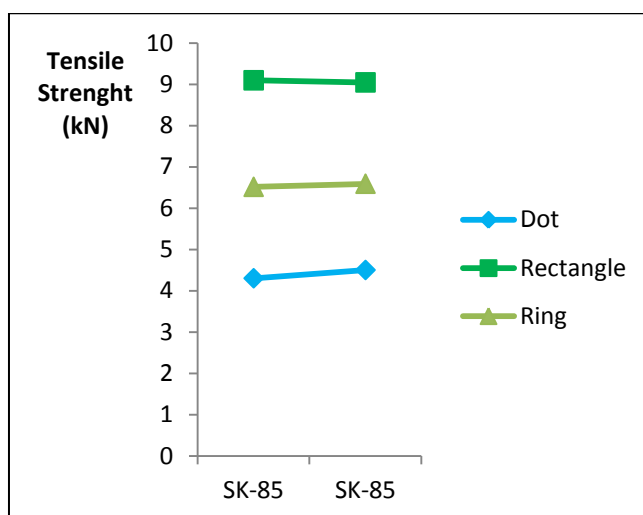
ภาพที่ 3-15 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างเครื่อง NA-100 และ SPA-100

การทดสอบหัวเชื่อม ในการออกแบบหัวเชื่อมที่ใช้ในครั้งแรกผู้ผลิตเลือกใช้หัวเชื่อมแบบจุดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร เพื่อเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน จึงต้องการทดลองเปลี่ยนชนิดหัวเชื่อมให้เป็นรูปแบบอื่น ซึ่งเลือกมา 2 ชนิด คือ ลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 8x3 มิลลิเมตร และชนิดวงกลมเพื่อเชื่อมได้ครบทั้ง 8 จุดในครั้งเดียว ดังภาพที่ 3-15

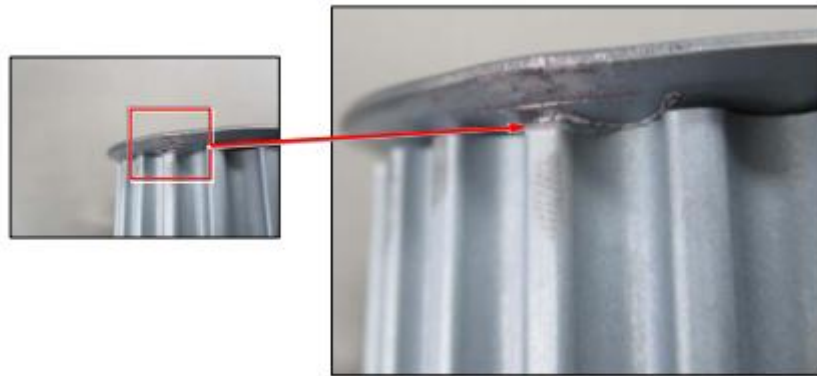


ภาพที่ 3-16 ชนิดของหัวเชื่อมที่เลือกใช้ แบบจุด สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงกลม

จากการทดสอบหัวเชื่อมทั้งสองชนิดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบวงกลม พบว่าหัวเชื่อมแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าแบบวงกลม ดังภาพที่ 3-16 แต่ยังมีบางส่วนของน้ำเหล็กไหลลงมายังหน้าพื้นเพียงพอ ดังภาพที่ 3-17 ซึ่งชิ้นงานลักษณะนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะอาจทำให้ส่วนเกินที่ไหลออกมาไปสัมผัสกับสายพานเครื่องยนต์เมื่อนำไปประกอบและใช้งานจริงและทำให้สายพานเสียหายจนขาดได้ ซึ่งในการทดสอบนี้เห็นว่าหัวเชื่อมแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดีกว่าหัวเชื่อมแบบวงกลมแต่ยังคงต้องหาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสม ป้องกันน้ำเหล็กไหลช้อยอีกเช่นกัน



ภาพที่ 3-17 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของหัวเชื่อมแบบจุด สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงกลม



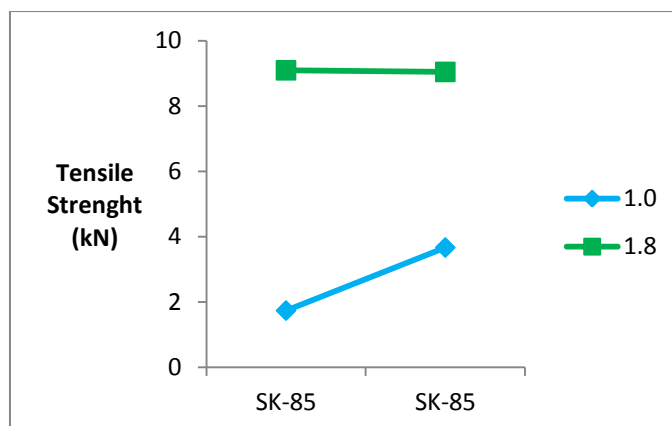
ภาพที่ 3-18 ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยหัวเชื่อมแบบสั้เหลี่ยมผืนผ้ามีน้ำเหล็กที่เฟือง

การทดสอบขนาด Emboss จุดประสงค์ของ Emboss คือ เป็นจุดที่ทำให้หลอมละลายในกระบวนการเชื่อมให้ชิ้นส่วนทั้งสองติดกัน ลักษณะดังภาพที่ 3-19 ผู้ศึกษาคิดว่าขนาดของจุด Emboss เล็กเกินไปซึ่งแต่เดิมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร จึงเพิ่มขนาดขึ้นเป็น 1.8 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มเนื้อที่การสัมผัสและเพิ่มปริมาณเนื้อ โลหะให้หลอมละลายติดกันมากยิ่งขึ้น ในการปรับขนาดนี้ต้องแก้ขนาดที่แม่พิมพ์ในกระบวนการอัดผงโลหะขึ้นรูปซึ่งต้องใช้เวลาแก้แม่พิมพ์ 2 อาทิตย์ ผู้ศึกษาจึงทำการทดลองก่อนและหลังการแก้แม่พิมพ์ ผลลัพธ์ที่ได้ภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 ลักษณะ Emboss ที่อยู่บนชิ้นส่วนผงโลหะอัดขึ้นรูป

การทดสอบขนาด Emboss พบว่าความต้านทานแรงดึงของ Emboss ขนาด 1.8 มิลลิเมตร ดีกว่าขนาด 1.0 อย่างแตกต่าง จึงใช้ขนาด 1.8 มิลลิเมตรในการทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3-20 ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างขนาด Emboss 1.0 และ 1.8 มิลลิเมตร

จากผลการวิเคราะห์ตามแผนภาพเหตุและการทดลองแบบการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า ซึ่งถูกปรับปรุงให้กระบวนการผลิตถูกควบคุมด้วยมาตรฐานการผลิตที่ควบคุมได้ แต่บางสาเหตุที่ยังคงเหลืออยู่และอาจจะส่งผลกับค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยังคงต้องพิจารณาต่อไป สรุปปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อชิ้นงานเพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าข้อกำหนด คือ

ปัจจัยที่ 1 กระแสไฟเชื่อม

ปัจจัยที่ 2 เวลาเชื่อม

ปัจจัยที่ 3 ชนิดแผ่นโลหะ

การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

จากการกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงทั้ง 3 ปัจจัย เพื่อออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) เพื่อทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อผลลัพธ์ได้ ดังตารางที่ 3-6 มีทั้งสองระดับและสามระดับ

ตารางที่ 3-6 ระดับของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

ลำดับ	ปัจจัยที่ใช้ทดลอง	คุณลักษณะ		ค่าตัวเลข			หน่วย
		ชนิด 1	ชนิด 2	น้อย	กลาง	มาก	
1	ชนิดแผ่นโลหะ	SK-85	SPCC	-	-	-	-
2	กระแสไฟ	-	-	9	10	11	kA
3	เวลาเชื่อม	-	-	1	2	3	Cycle

คุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ (Response) คือ ค่าความต้านทานแรงดึงของเฟืองเพลลาข้อเหวี่ยงหลังจากจบกระบวนการผลิตทั้งหมดแล้ว มีหน่วยวัดเป็นกิโลกรัมนิวตัน และทำการทดลอง 3 ครั้งในแต่ละ Combination (n = 3) ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ออกแบบการทดลองและค่าปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง

Run	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม
1	SK-85	9	1
2	SK-85	9	2
3	SK-85	9	3
4	SK-85	10	1
5	SK-85	10	2
6	SK-85	10	3
7	SK-85	11	1
8	SK-85	11	2
9	SK-85	11	3
10	SPCC	9	1
11	SPCC	9	2
12	SPCC	9	3
13	SPCC	10	1
14	SPCC	10	2
15	SPCC	10	3

ตารางที่ 3-7 (ต่อ)

Run	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม
16	SPCC	11	1
17	SPCC	11	2
18	SPCC	11	3

จากการออกแบบการทดลองเพื่อดำเนินการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยการทดลองต่าง ๆ อย่างสุ่ม โดยทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ รวมทั้งสิ้นต้องทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง และจดบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงลงในตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 แบบบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดลอง

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

ตารางที่ 3-8 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
17				
18				
19				
20				
21				
.				
.				
.				
54				

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้เราทราบสาเหตุทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการผลิตที่มีผลกระทบมากที่สุดจนถึงน้อยที่สุด สามารถวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main effect) และการเกิดความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ที่ทำให้ผลลัพธ์ของกระบวนการผลิตแตกต่างออกไปจากผลลัพธ์ที่เกิดจากปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียว โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเลือกสาเหตุมาวิเคราะห์โดยพิจารณาจากคะแนนและใช้การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) การวิเคราะห์ตัวแบบสมการเส้นถดถอย (Regression equation) และการวิเคราะห์ค่าคาดหวัง (Expected value) เพื่อคาดเดาผลลัพธ์ที่จะได้หลังจากการทดลองด้วยการปรับตั้งค่าของเครื่องจักรตามปัจจัยที่ได้

การติดตามผลการประยุกต์ใช้

ขั้นตอนนี้เป็นการประยุกต์ใช้การปรับตั้งค่าของเครื่องจักรตามปัจจัยที่ทดลองได้นำไปใช้กับหน้างานกระบวนการผลิตจริง ติดตามดูผลลัพธ์ที่ได้จากการผลิตเป็นเวลา 4 เดือน เพื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (Capability analysis) ซึ่งเป็นการวัดประสิทธิภาพของข้อมูล

การสรุปผลการปรับปรุง

การสรุปผลหลังการปรับปรุงด้วยการเปรียบเทียบผลความสามารถของกระบวนการผลิต และทำการควบคุมสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแปรปรวนต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยจัดทำ เอกสารในการปฏิบัติงาน เพื่อสร้างมาตรฐานให้กระบวนการผลิตทำงานเป็นมาตรฐานเดียวกัน

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

การศึกษาผลการดำเนินงานเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของการยึดชิ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด โดยทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตรงตามข้อกำหนดของลูกค้ำที่มากกว่า 7 kN ขึ้นไป และศึกษาปัจจัยในการผลิตที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงในชิ้นงานสำเร็จรูปแล้ว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริง และกำหนดเป็นพารามิเตอร์ควบคุมในการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนเริ่มงาน การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลผลลัพธ์ที่ได้เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานการผลิตต่อไป

จากการออกแบบการทดลอง และนำไปดำเนินการทดลองสามารถบันทึกผลการทดลองและรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

การเตรียมการทดลอง

1. การเตรียมชิ้นส่วนประกอบของเฟืองเพลาคู่หัวยิง

จากตารางที่ 3-5 ออกแบบการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง เตรียมชิ้นส่วนประกอบหลักชนิดเดียว คือ เฟือง 54 ชิ้น แผ่น โลหะชนิด SK-85 จำนวน 27 ชิ้น และแผ่น โลหะชนิด SPCC จำนวน 27 ชิ้น ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบหลักต้องผ่านการตรวจสอบขนาดและคุณสมบัติด้านอื่นให้ตรงตามข้อกำหนดก่อนจึงนำมาทำการทดลองได้ เพื่อป้องกันความแตกต่างที่อาจเกิดขึ้นจากการทดสอบ

2. การเตรียมเครื่องเชื่อมและสภาวะการทดสอบ

ผลจากการวิเคราะห์ตามแผนภาพเหตุและผลทำให้สามารถกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ดังนี้ พนักงานที่ทำการทดสอบคนเดียวและต้องผ่านการฝึกอบรมตามมาตรฐานการทำงานอย่างถูกต้อง เครื่องเชื่อม NA-100 ใช้หัวเชื่อมชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และขนาด Emboss 1.8 มิลลิเมตร

3. การเตรียมเครื่องมือวัด

เครื่องทดสอบแรงดึง Universal testing machine รุ่น GT-7001-LS50 สามารถทดสอบที่แรงสูงสุดเท่ากับ 500 kN มีการแสดงผลเป็นแบบดิจิทัล ได้รับการสอบเทียบเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2558 และมีรอบการสอบเทียบปีละครั้ง โดยผลการสอบเทียบครั้งล่าสุดผ่านการทดสอบด้วย -1.05% ของความแม่นยำ (Accuracy) ที่ระดับแรงดึงน้อยกว่า 100 kN ด้วยระดับนัยสำคัญที่ 95% จึงถือว่าเครื่องมือวัดมีกระบวนการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ แสดงข้อมูลที่เชื่อถือได้ บ่งชี้ถึงผลลัพธ์ที่ได้ความถูกต้องและแม่นยำเช่นกัน

การดำเนินการทดลอง

นำชิ้นส่วนประกอบหลักทั้งสองชิ้นที่เตรียมไว้ไปทดสอบเชื่อมประสานแบบจุดโดยพนักงานคนปัจจุบันที่ผ่านการอบรมและมีหน้าที่ปฏิบัติงานตามขั้นตอนของงานเชื่อมชิ้นส่วนนี้โดยตรง ทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรชิ้นส่วนป้อนเข้าไปในสายการผลิตแบบคู่ตามตารางการออกแบบการทดลองที่ 3-5 อย่างไม่เป็นลำดับ จากนั้นส่งชิ้นส่วนไปยังกระบวนการถัดไปเพื่อผลิตชิ้นส่วนให้เป็นชิ้นส่วนสำเร็จ ต่อไป

การเก็บข้อมูลค่าความทนแรงดึงของแต่ละรอบการทดลอง

นำชิ้นส่วนเพื่อทดลองเชื่อมมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงและบันทึกค่าความต้านทานแรงดึงของแต่ละชิ้น เก็บบันทึกข้อมูลตัวอย่างดังตารางที่ 4-1 โดยเก็บข้อมูลทั้งหมดจำนวน 54 ครั้ง และผลข้อมูลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงทั้งหมดในภาคผนวก ก

ตัวอย่างเช่น ในการทดลองครั้งที่ 1 เราจะต้องใช้แผ่นโลหะชนิด SK-85 ปรับกระแสไฟที่ 10 และเวลาเชื่อม 2 และบ่งชี้ชิ้นงานด้วยลำดับการทดลอง ซึ่งในการทดลองครั้งแรกได้ค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 8.073 kN จากนั้นปรับพารามิเตอร์ของเครื่องเชื่อมตามลำดับที่ 2 คือใช้วัสดุ SPCC ปรับกระแสไฟที่ 11 และเวลาเชื่อม 3 โดยได้ค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 11.411 kN และรวบรวมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลความต้านทานแรงดึงของเฟืองเพลาช่อเหวี่ยงตามการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1	SK-85	10	2	8.073
2	SPCC	11	3	11.411
3	SK-85	9	3	5.119
4	SK-85	9	3	5.140
5	SPCC	11	1	4.935
6	SK-85	11	3	7.443
7	SPCC	11	1	3.325
8	SPCC	9	1	5.990
9	SPCC	10	3	6.474
10	SPCC	9	3	9.950
11	SK-85	9	3	5.031
12	SPCC	10	2	6.420
13	SPCC	9	1	4.461
14	SK-85	10	1	6.169
15	SK-85	10	3	5.598
16	SPCC	10	1	3.332
17	SPCC	10	2	5.784
18	SPCC	11	2	9.549
19	SK-85	9	1	4.728
20	SPCC	9	2	8.175
.
.
.
54	SK-85	10	3	7.460

การวิเคราะห์ข้อมูล

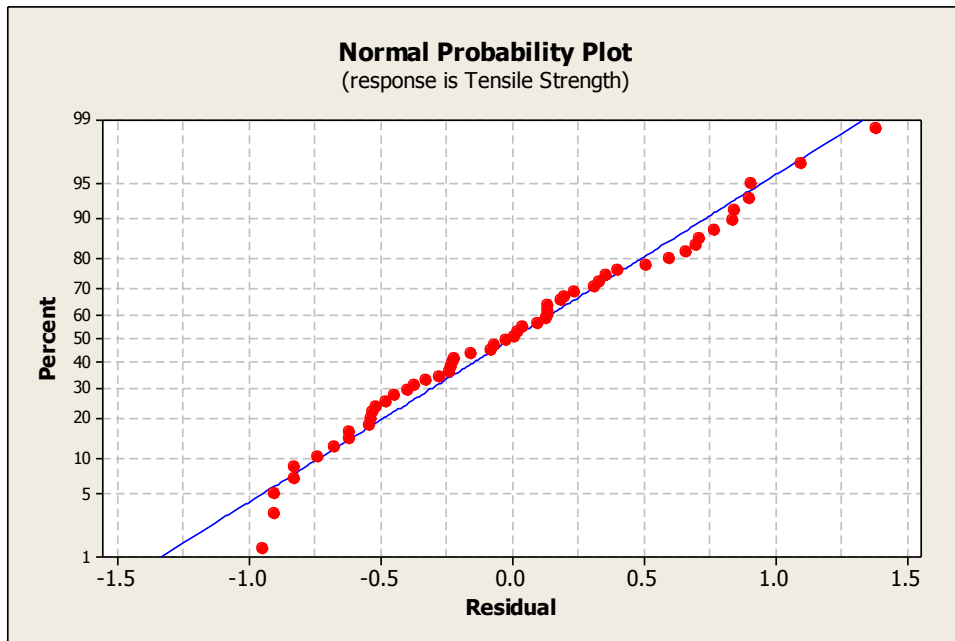
เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนแล้ว วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab โดยเริ่มจากการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติการกระจายตัว ความผันแปร และความเป็นอิสระต่อกันของความคลาดเคลื่อน

การทดสอบการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน โดยพิจารณากราฟการกระจายตัวแบบปกติ (Normal probability plot) และฮิสโตแกรม (Histogram) ดังภาพที่ 4-1 และภาพที่ 4-2 ตามลำดับ มีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง และแผนภูมิฮิสโตแกรมมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ถือว่าการกระจายตัวของข้อมูลค่าความทนแรงดึงจากการทดสอบมีการแจกแจงแบบปกติ

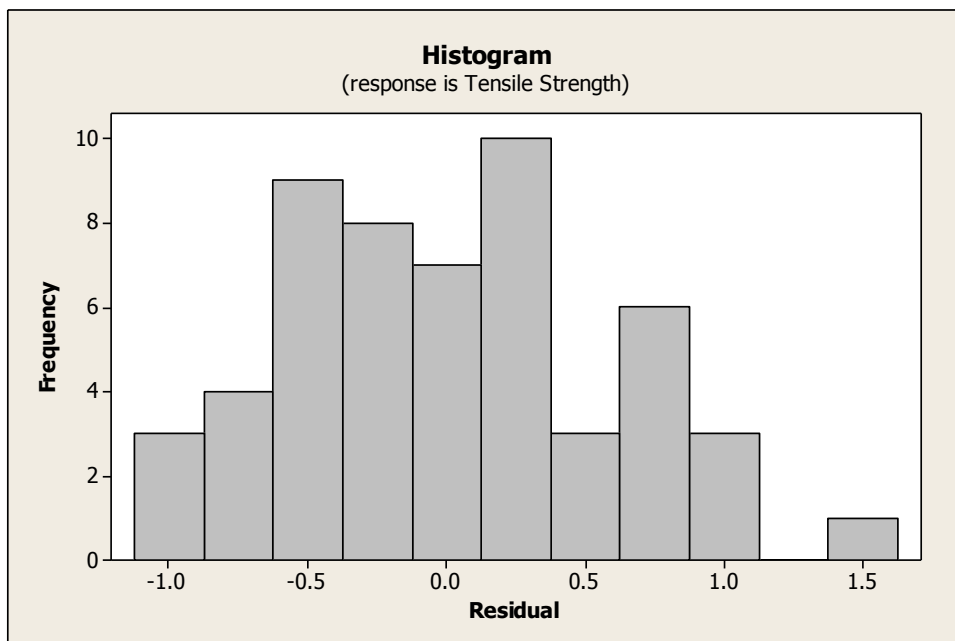
การทดสอบความคลาดเคลื่อนต้องเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4-3 พิจารณาจากพิสัยของ Residual และ Fitted value ว่ามีการกระจายตัวอย่างไม่มีแบบแผนและไม่เท่ากัน จึงถือว่าความคลาดเคลื่อนถูกกระจายตัวและเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

การทดสอบความอิสระต่อกันของข้อมูล ดังภาพที่ 4-5 พิจารณาจากแต่ละชุดข้อมูลมีค่าความคลาดเคลื่อนที่แนวโน้มไม่ไปในทิศทางเดียวกัน ไม่เท่ากันและไม่แสดงเป็นแบบแผน จึงถือว่ามีความเสถียร เนื่องจากรูปแบบการกระจายตัวของ Residual มีลักษณะแบบสุ่ม

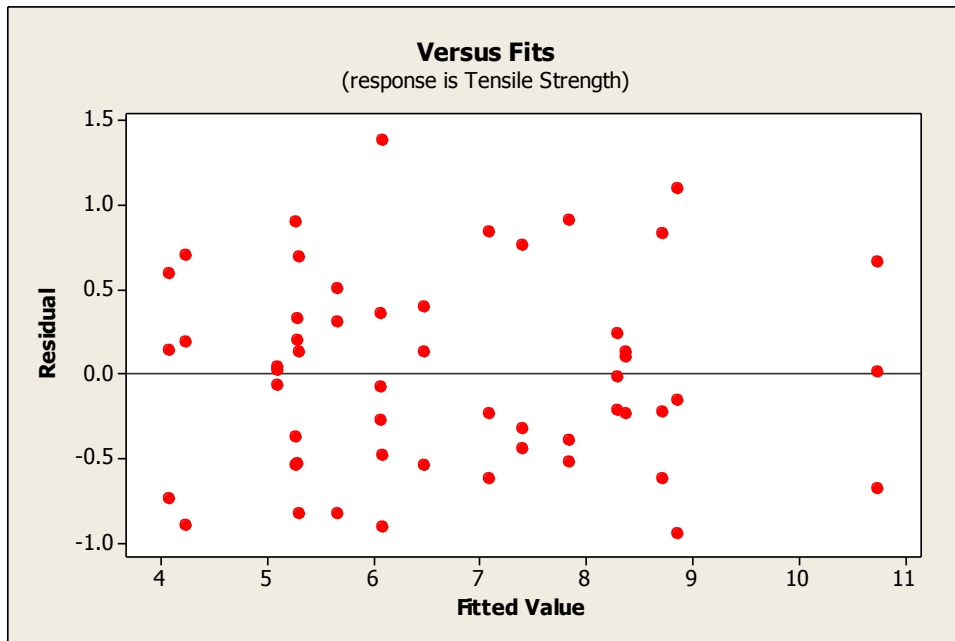
จากการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบ ซึ่งแสดงว่ามีความอิสระกันของข้อมูล นอกจากนั้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ดำเนินการทดลอง และจากการทดลองข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ



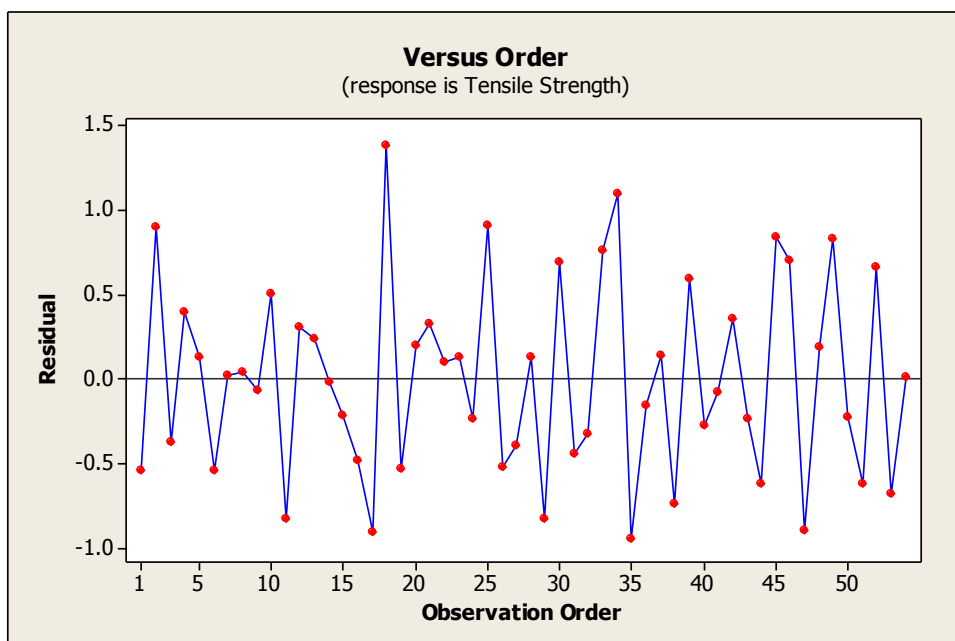
ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวแบบปกติของค่าความต้านทานแรงดึง



ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวแบบฮิสโตแกรมของค่าความต้านทานแรงดึง



ภาพที่ 4-3 การกระจายตัวของค่าความทนแรงดึงคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 4-4 การกระจายตัวของค่าความต้านทานแรงดึงแสดงความไม่เป็นอิสระต่อกัน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ที่ได้จากการทดสอบ

General Factorial Regression: Tensile versus Material, Current, Time

Factor information

Factor levels values

Material 2 -1, 1

Current 3 9, 10, 11

Time 3 1, 2, 3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	167.878	9.8752	20.36	0.000
Linear	5	103.646	20.7292	42.74	0.000
Material	1	2.805	2.8053	5.78	0.021
Current	2	18.382	9.1910	18.95	0.000
Time	2	82.459	41.2293	85.01	0.000
2-Way interactions	8	62.472	7.8090	16.10	0.000
Material*Current	2	14.649	7.3246	15.10	0.000
Material*Time	2	30.574	15.2871	31.52	0.000
Current*Time	4	17.249	4.3123	8.89	0.000
3-Way interactions	4	1.760	0.4399	0.91	0.470
Material*Current*Time	4	1.760	0.4399	0.91	0.470
Error	36	17.460	0.4850		
Total	53	185.338			

Model summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.696422	90.58%	86.13%	78.80%

การวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการทดสอบดังตารางที่ได้ออกแบบไว้ พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 90.58% หมายความว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี 100% แล้วความแปรปรวนของข้อมูล 90.58%² สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือสามารถอธิบายได้เนื่องจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้ จากนั้นพิจารณาค่า R^2 ที่ได้รับการปรับค่า (Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 86.13%) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าจำนวนข้อมูลมีเพียงพอเพื่อนำมาวิเคราะห์การทดลอง

จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อด้วย ANOVA ที่รันจาก Minitab เพื่อศึกษาความมีอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่าง ๆ ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลหลัก ในที่นี้กำหนดระดับของนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจากในตาราง ANOVA พบว่าค่า P-Value ของปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ ชนิดแผ่นโลหะ กระแสเชื่อม และเวลาการเชื่อม มีค่า P เท่ากับ 0.021, 0.000 และ 0.000 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยร่วม 2 ระดับ (Two-way interaction) คือ ชนิดแผ่นโลหะ กระแสเชื่อม ชนิดแผ่นโลหะ เวลาเชื่อม กระแสเชื่อม เวลาเชื่อม มีค่า P เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 แสดงว่าปัจจัยร่วม 2 ระดับทั้ง 3 ต่างมีผลต่ออิทธิพลของค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เช่นกัน

ปัจจัยร่วม 3 ระดับ (Three-way interaction) คือ ชนิดแผ่นโลหะ กระแสเชื่อม เวลาเชื่อม มีค่า P เท่ากับ 0.470 ซึ่งมากกว่า $\alpha = 0.05$ ต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วน แสดงว่าปัจจัยร่วม 3 ระดับนี้ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการลดรูปอีกครั้งเพื่อปลดปัจจัยร่วม 3 ระดับออกไปรวมกับค่าความคลาดเคลื่อนดังผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลกับความทนแรงดึง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลกับความทนแรงดึง

General factorial regression: Tensile versus material, Current, Time

Factor information

Factor levels values

Material 2 -1, 1

Current 3 9, 10, 11

Time 3 1, 2, 3

Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	166.118	12.7783	26.59	0.000
Linear	5	103.646	20.7292	43.14	0.000
Material	1	2.805	2.8053	5.84	0.020
Current	2	18.382	9.1910	19.13	0.000
Time	2	82.459	41.2293	85.81	0.000
2-Way Interactions	8	62.472	7.8090	16.25	0.000
Material*Current	2	14.649	7.3246	15.24	0.000
Material*Time	2	30.574	15.2871	31.82	0.000
Current*Time	4	17.249	4.3123	8.97	0.000
Error	40	19.220	0.4805		
Lack-of-Fit	4	1.760	0.4399	0.91	0.470
Pure Error	36	17.460	0.4850		
Total	53	185.338			

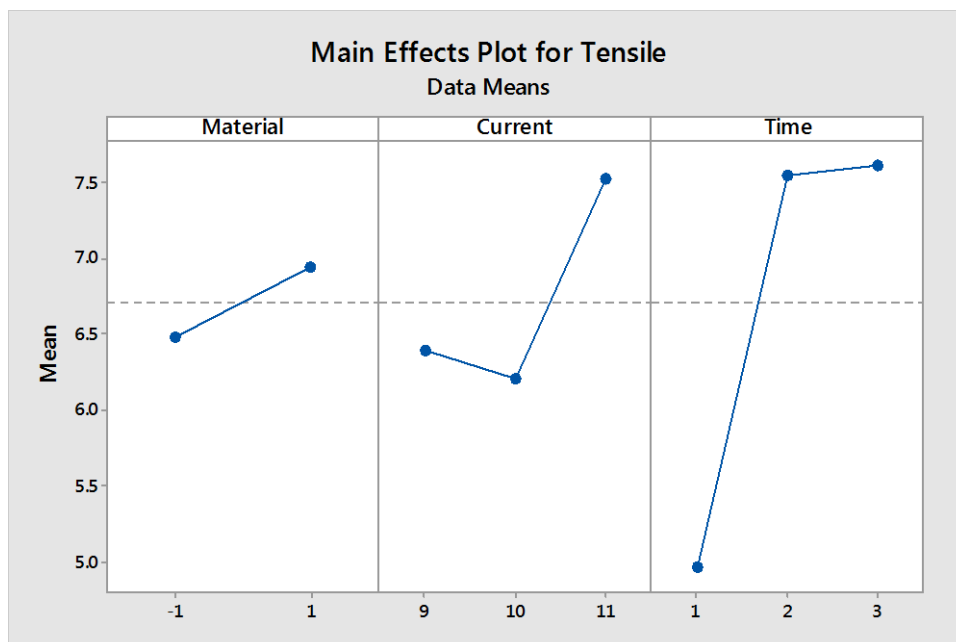
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.693178	89.63%	86.26%	81.10%

การวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบความทนแรงดึงหลังจากตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนแรงดึงแล้ว พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 89.63% ลดลงจากก่อนลดรูป คือ 90.58% แตกต่างกันเล็กน้อย จากนั้นพิจารณาค่า R^2 ที่ได้รับการปรับค่ามีค่าเท่ากับ 86.26% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 ที่ได้รับการปรับค่ามาก่อนหน้านี้ คือ 86.13%

เพื่อตรวจสอบความมีอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้ จึงวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้วยแผนภาพดังภาพที่ 4-5 แสดงถึงปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือ ชนิดแผ่น โลหะชนิด SPCC มีความสามารถทนต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่าชนิด SK-85 กระแสเชื่อมที่ 11 สามารถทนต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่า 9 และ 10 เวลาเชื่อม 2 และ 3 สามารถทนต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่า 1 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล

จึงกำหนดให้ทุกปัจจัยอยู่ในระบบเชิงตัวเลขทั้งหมด กล่าวคือ ปัจจัยชนิดแผ่นโลหะแบ่งได้เป็น 2 ระดับ จึงกำหนดให้แผ่น โลหะชนิด SK-85 มีค่าเป็น -1 และ SPCC มีค่าเป็น 1 ตามลำดับ

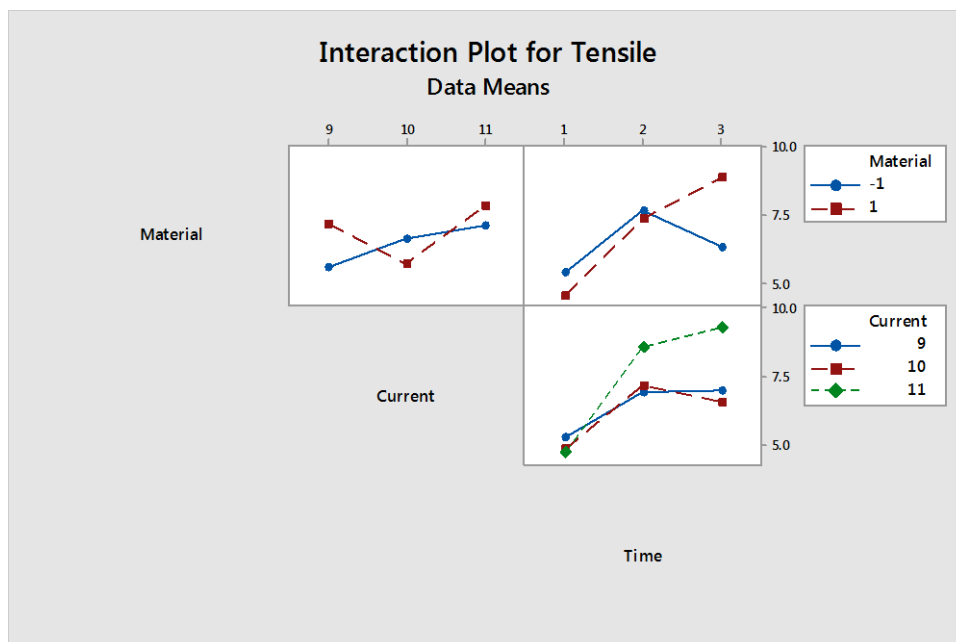


ภาพที่ 4-5 แผนภูมิของปัจจัยหลักของชิ้นส่วนต่อความต้านทานแรงดึง

เช่นเดียวกันกับปัจจัยหลักจึงต้องพิจารณาปัจจัยร่วมภายในที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเป็นแผนภาพดังภาพที่ 4-6 สามารถอ่านผลลัพธ์ได้ดังนี้

1. ปัจจัยร่วมระหว่างชนิดแผ่นโลหะและกระแสเชื่อมมีอิทธิพลร่วมต่อกันเนื่องจากเส้นกราฟตัดกัน โดยแผ่น โลหะชนิด SK-85 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่แผ่น โลหะชนิด SPCC มีลักษณะเป็นเส้น โค้งหงายและความทนแรงดึงจะลดลงเมื่อใช้กระแสเชื่อมที่ 10
2. ปัจจัยร่วมระหว่างชนิดแผ่นโลหะและเวลาเชื่อมมีอิทธิพลร่วมต่อกันเนื่องจากเส้นกราฟทั้งสองเส้นตัดกันที่เวลาเชื่อม 3 ของแผ่นโลหะชนิด SK-85 ใช้เวลาเชื่อมมากเกินไปทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงต่างกับแผ่น โลหะชนิด SPCC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและยังสามารถทนต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีที่เวลาเชื่อม 3
3. ปัจจัยร่วมระหว่างกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมมีอิทธิพลร่วมต่อกันเนื่องจากเส้นกราฟตัดกัน คือ กระแสเชื่อม 9 และ 10 มีลักษณะเส้นกราฟคล้ายกันโดยกระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นเวลาเชื่อมเพิ่มมากขึ้นตามแต่เมื่อเพิ่มเวลาเชื่อมเป็นระดับ 3 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงไม่แตกต่างกัน

กันมากกับเวลาเชื่อมระดับ 2 แตกต่างกับกระแสเชื่อม 11 สามารถทำงานได้ดีกับเวลาเชื่อมเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 4-6 แผนภูมิของปัจจัยร่วมของชิ้นส่วนต่อความต้านทานแรงดึง

การวิเคราะห์เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มากที่สุด ทำโดยการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบสมการถดถอยในโปรแกรม Minitab ดังแสดงในผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการของค่าความต้านทานแรงดึง

ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการของค่าความต้านทานแรงดึง

General Linear Model: Tensile versus Current, Time, Material

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor information

Factor type levels values

Material fixed 2 -1, 1

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Current	1	3.761	3.7608	2.57	0.116
Time	1	7.962	7.9622	5.43	0.024
Material	1	0.074	0.0741	0.05	0.823
Current*Time	1	12.117	12.1169	8.27	0.006
Current*Material	1	0.373	0.3728	0.25	0.616
Time*Material	1	0.076	0.0762	0.05	0.821
Current*Time*Material	1	0.021	0.0206	0.01	0.906
Error	46	67.416	1.4656		
Lack-of-Fit	10	49.956	4.9956	10.30	0.000
Pure Error	36	17.460	0.4850		
Total	53	185.338			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.21061	63.63%	58.09%	52.52%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12.61	5.36	2.35	0.023	
Current	-0.855	0.534	-1.60	0.116	7.00
Time	-5.78	2.48	-2.33	0.024	151.00
Material					
-1	-1.20	5.36	-0.22	0.823	1057.00
Current*Time	0.711	0.247	2.88	0.006	157.00
Current*Material					
-1	0.269	0.534	0.50	0.616	1057.00
Time*Material					
-1	-0.57	2.48	-0.23	0.821	1057.00
Current*Time*Material					

-1 -0.029 0.247 -0.12 0.906 1057.00

Regression Equation

Material

-1 Tensile = 11.41 - 0.586 Current - 6.34 Time + 0.681 Current*Time

1 Tensile = 13.81 - 1.124 Current - 5.21 Time + 0.740 Current*Time

Fits and diagnostics for unusual observations

Obs Tensile Fit Resid Std Resid

44 6.474 9.123 -2.649 -2.30 R

ทดสอบด้วย General linear model ด้วยการตั้งปัจจัยชนิดของแผ่น โลหะเป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง ตั้งค่าปัจจัยของกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมเป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง (Continuous variable) พิจารณาผลลัพธ์ของ ANOVA ในผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการของค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าปัจจัยหลักของกระแสเชื่อม เวลาเชื่อม และชนิดแผ่น โลหะมีค่า P เท่ากับ 0.116, 0.024 และ 0.823 ตามลำดับ ที่ปัจจัยร่วม 2 ระดับ กระแสเชื่อม เวลาเชื่อมมีค่า P เท่ากับ 0.006 และผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญเพียงตัวเดียว ส่วนปัจจัยร่วม 2 ระดับอื่น ๆ และปัจจัยร่วม 3 ระดับมีค่า P เท่ากับ 0.616, 0.821 และ 0.906 ซึ่งไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงจึงทำการตัดปัจจัยนี้ในการวิเคราะห์ออกอีกครั้ง เพื่อกำหนดให้ไปรวมกับค่าความคลาดเคลื่อนทำให้ได้สมการที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นดังผลการวิเคราะห์สมการถดถอยหลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลกับความทนแรงดึง

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยหลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลกับความทนแรงดึง

General Linear Model: Tensile versus Current, Time, Material

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor Type Levels Values

Material Fixed 2 -1, 1

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Current	1	3.761	3.7608	1.93	0.171
Time	1	7.962	7.9622	4.08	0.049
Material	1	2.805	2.8053	1.44	0.236
Current*Time	1	12.117	12.1169	6.21	0.016
Error	49	95.550	1.9500		
Lack-of-Fit	13	78.090	6.0069	12.39	0.000
Pure Error	36	17.460	0.4850		
Total	53	185.338			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.39643	48.45%	44.24%	37.40%

Coefficients

Term	Coef	SE	Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12.61	6.18	2.04	0.047		
Current	-0.855	0.616	-1.39	0.171	7.00	
Time	-5.78	2.86	-2.02	0.049	151.00	
Material						
-1	-0.228	0.190	-1.20	0.236	1.00	
Current*Time	0.711	0.285	2.49	0.016	157.00	

Regression Equation

Material

$$-1 \quad \text{Tensile} = 12.38 - 0.855 \text{ Current} - 5.78 \text{ Time} + 0.711 \text{ Current*Time}$$

$$1 \quad \text{Tensile} = 12.84 - 0.855 \text{ Current} - 5.78 \text{ Time} + 0.711 \text{ Current*Time}$$

Fits and diagnostics for unusual observations

Std

Obs	Tensile	Fit	Resid	Resid
34	9.950	6.989	2.961	2.28

จากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยหลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลกับความทนแรงดึง ได้ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความต้านทานแรงดึงแบ่งตามชนิดของแผ่น โลหะ 2 ชนิด ออกมาเป็น 2 สมการ คือ สมการที่ 4-1 ใช้สำหรับแผ่น โลหะชนิด SK-85 และสมการที่ 4-2 ใช้สำหรับแผ่น โลหะชนิด SPCC

1. แผ่น โลหะชนิด SK-85

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานแรงดึง} = & 12.38 - (0.855 \times \text{กระแสเชื่อม}) - (5.78 \times \text{เวลาเชื่อม}) \quad (4-1) \\ & + (0.711 \times \text{กระแสเชื่อม} \times \text{เวลาเชื่อม}) \end{aligned}$$

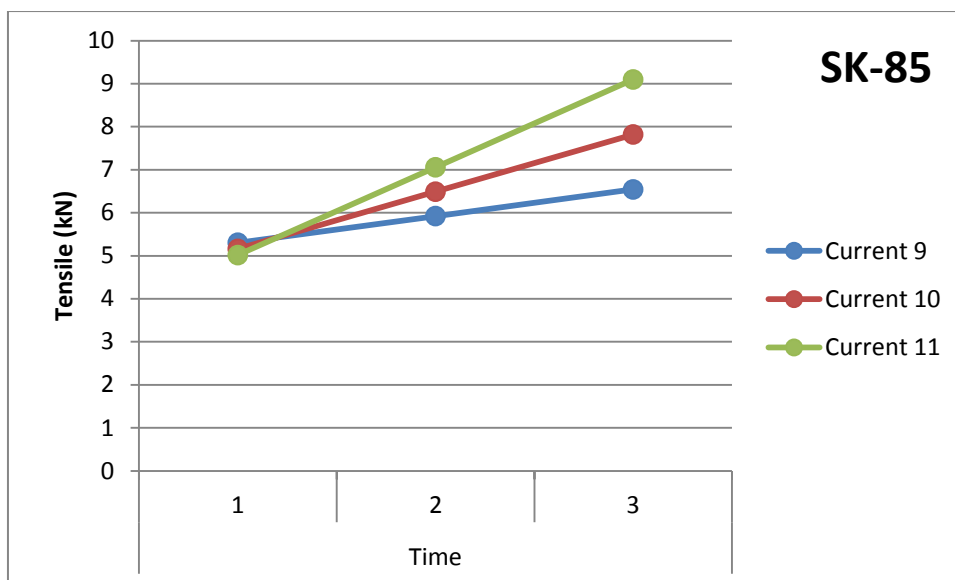
2. แผ่น โลหะชนิด SPCC

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานแรงดึง} = & 12.84 - (0.855 \times \text{กระแสเชื่อม}) - (5.78 \times \text{เวลาเชื่อม}) \quad (4-2) \\ & + (0.711 \times \text{กระแสเชื่อม} \times \text{เวลาเชื่อม}) \end{aligned}$$

นำสมการคาดการณ์ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณต่อกับปัจจัยที่ใช้จริงทั้ง 3 ชนิด เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงจากการคำนวณดังตารางที่ 4-2 และตารางที่ 4-3 ตามชนิดของแผ่น โลหะ

ตารางที่ 4-2 ค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่น โลหะชนิด SK-85 ที่ได้จากการคำนวณ

ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	เวลาเชื่อม (Cycle)			
	1	2	3	
กระแสเชื่อม (kA)	9	5.304	5.923	6.542
	10	5.16	6.49	7.82
	11	5.016	7.057	9.098

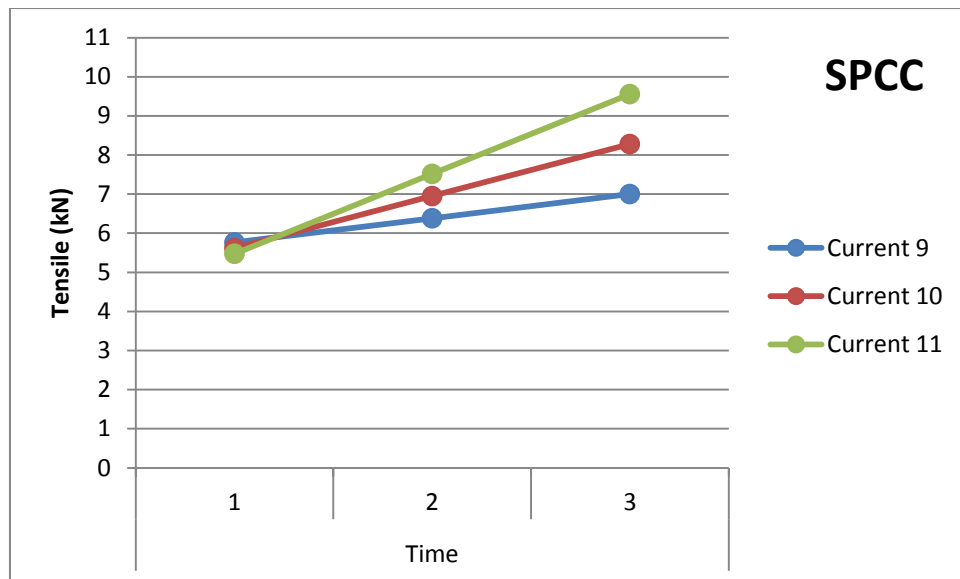


ภาพที่ 4-7 ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่น โลหะชนิด SK-85 ที่ระดับปัจจัยต่างกัน

จากสมการถอดของแผ่น โลหะชนิด SK-85 นำผลการคำนวณมาสร้างกราฟเพื่อดู ลักษณะและทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่ปัจจัยกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมที่แตกต่างทำให้ค่า ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังภาพที่ 4-7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน แรงดึงที่ผันแปรตามกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ยิ่งใช้กระแสเชื่อมและเวลา เชื่อมมากขึ้นทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงมากขึ้นด้วยเช่นกัน และกระแสเชื่อมที่ 11 kA ทำให้มี ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด

ตารางที่ 4-3 ค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่น โลหะชนิด SPCC ที่ได้จากการคำนวณ

ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	เวลาเชื่อม (Cycle)			
	1	2	3	
กระแสเชื่อม (kA)	9	5.764	6.383	7.002
	10	5.62	6.95	8.28
	11	5.476	7.517	9.558



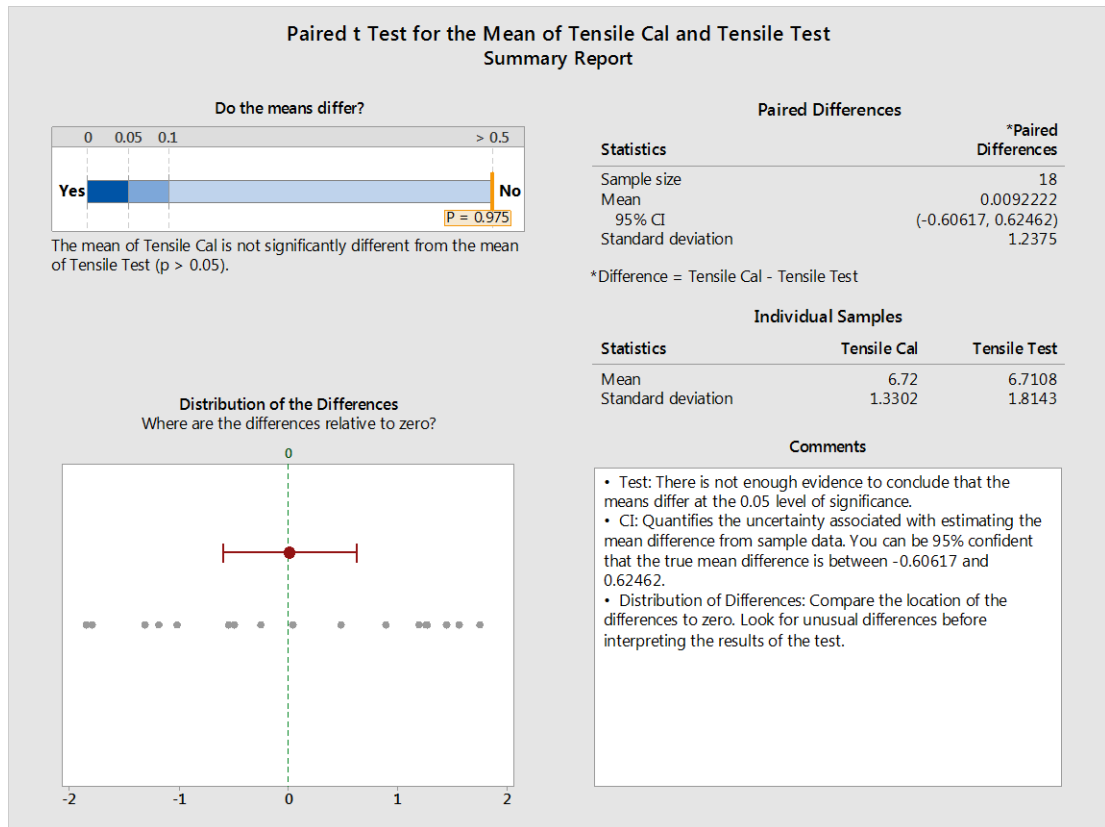
ภาพที่ 4-8 ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่น โลหะชนิด SPCC ที่ระดับปัจจัยต่างกัน

เช่นเดียวกับสมการถอดของแผ่น โลหะชนิด SPCC มีลักษณะและทิศทาง การเปลี่ยนแปลงที่ปัจจัยกระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมที่แตกต่างทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงดึงที่ผันแปรตามกระแส เชื่อมและเวลาเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ยิ่งใช้กระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมมากขึ้นทำให้ได้ค่า ความต้านทานแรงดึงมากขึ้นด้วยเช่นกัน และกระแสเชื่อมที่ 11 kA ทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึง มากที่สุด ความสัมพันธ์ของปัจจัยและค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีลักษณะคล้ายกับแผ่น โลหะ ชนิด SK-85 จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจริงต่อไปดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-4 ค่าความทนแรงดึงจากการทดสอบเปรียบเทียบกับจากการคำนวณ

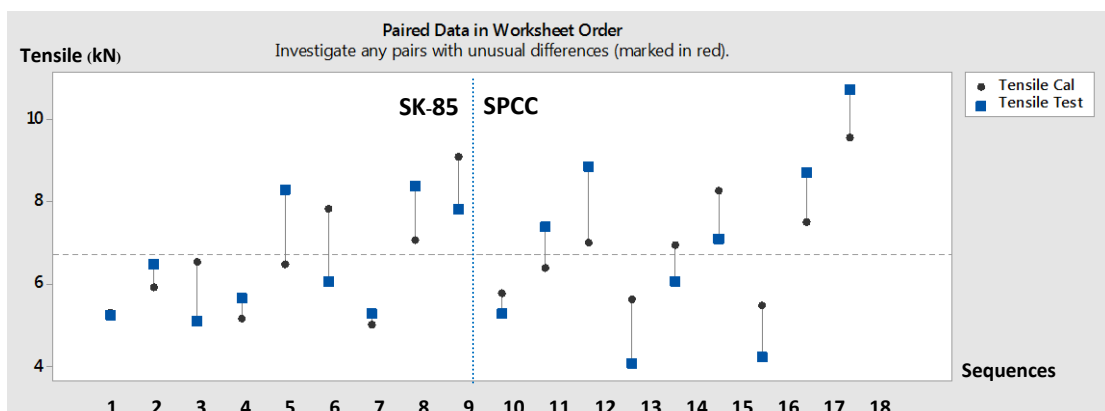
ลำดับ	ค่าความต้านทานแรงดึง จากการทดสอบ (kN)	ค่าความต้านทานแรงดึง จากการคำนวณ (kN)	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	5.264	5.304	-0.04
2	6.471	5.923	0.548
3	5.097	6.542	-1.445
4	5.658	5.16	0.498
5	8.289	6.49	1.799
6	6.076	7.82	-1.744
7	5.278	5.016	0.262
8	8.377	7.057	1.32
9	7.836	9.098	-1.262
10	5.29	5.764	-0.474
11	7.406	6.383	1.023
12	8.853	7.002	1.851
13	4.067	5.62	-1.553
14	6.062	6.95	-0.888
15	7.09	8.28	-1.19
16	4.224	5.476	-1.252
17	8.71	7.517	1.193
18	10.746	9.558	1.188

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบและจากการคำนวณมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.0092 ซึ่งถือว่าน้อยมาก เพื่อให้แน่ใจในผลลัพธ์ของสมการถดถอยจึงทำการทดสอบสมมติฐานด้วย t-test ด้วยโปรแกรม Minitab ดังภาพที่ 4-9 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงจากการทดสอบและจากการคำนวณไม่แตกต่างกัน โดยมีค่า $P = 0.975$ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0092 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.2375



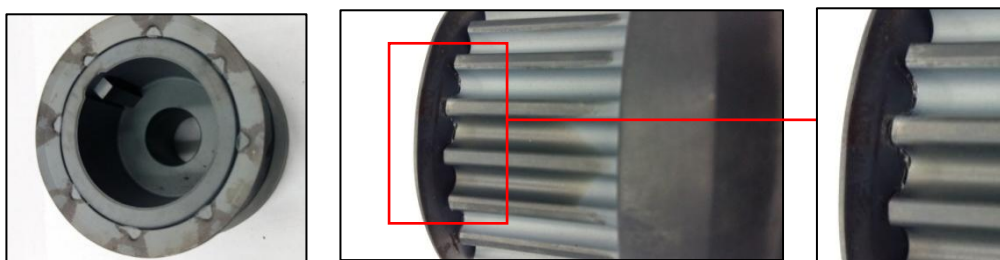
ภาพที่ 4-9 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงจากการทดสอบและจากการคำนวณ

จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการคำนวณมาแสดงผลเป็นลักษณะรูปภาพเพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าลำดับปัจจัยใดมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ของลูกค้า (มากกว่า 7 kN) ได้แก่ ลำดับที่ 8, 9, 12, 15, 17 และ 18 ดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการคำนวณเทียบกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

ในกรณีการทดลองนี้ทดสอบชนิดของแผ่นโลหะสองชนิด คือ SK-85 และ SPCC แต่ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์นั้นให้ใช้แผ่นโลหะชนิด SK-85 จึงพิจารณาที่ลำดับที่ 8 และ 9 ซึ่งผลจากแผ่นโลหะชนิด SPCC นั้นทดสอบมาเพื่อเป็นผลอ้างอิงได้เนื่องจากมีต้นทุนถูกกว่าเพื่อผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์สามารถนำไปพิจารณาได้ในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปลี่ยนชนิดแผ่นโลหะควรมีการทดสอบอย่างละเอียดเพื่อยืนยันผลอีกครั้ง



ภาพที่ 4-11 ลักษณะชิ้นงานลำดับที่ 9 หลังจากทดสอบมีน้ำเหล็กไหลย่อยออกมาด้านนอก

เนื่องจากสภาวะเครื่องเชื่อมของการทดลองลำดับที่ 8 และ 9 มีความแตกต่างกันที่เวลาเชื่อม ซึ่งชิ้นงานลำดับที่ 9 มีน้ำเหล็กไหลย่อยออกมาด้านนอก ดังภาพที่ 4-11 แสดงถึงเวลาการเชื่อมที่นานเกินไปทำให้ลักษณะภายนอกที่ไม่พึงประสงค์ต่อลูกค้า จึงอาจต้องเพิ่มกระบวนการกำจัดน้ำเหล็กขึ้นมาอีกกระบวนการหนึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น จึงพิจารณาที่ลำดับที่ 8 เพราะมีลักษณะของชิ้นงานที่ดีกว่าและไม่มีน้ำเหล็กไหลออกมา

ดังนั้นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่เหมาะสม ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงตรงกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ คือ

ชนิดแผ่นโลหะ SK-85

กระแสเชื่อม 11 kA

เวลาเชื่อม 2 Cycle

การติดตามผลการประยุกต์ใช้

การประยุกต์ใช้การปรับตั้งค่าของเครื่องจักรตามปัจจัยที่ทดลองได้นำไปใช้กับหน้างานกระบวนการผลิตจริง ติดตามดูผลลัพธ์ที่ได้จากการผลิตเป็นเวลา 4 เดือน (มิถุนายน-กันยายน 2558) ดังตารางที่ 4-5 เพื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการวัดประสิทธิภาพของข้อมูล

โดยการสร้างมาตรฐานการผลิต (Work instruction) และอบรมให้กับพนักงานสามารถเริ่มทำงานได้ รวมทั้งมีการกำหนดในเอกสารควบคุมกระบวนการผลิต (Control plan) โดยชิ้นงานต้องถูกทดสอบเพื่อยืนยันผลของค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน ดังนี้

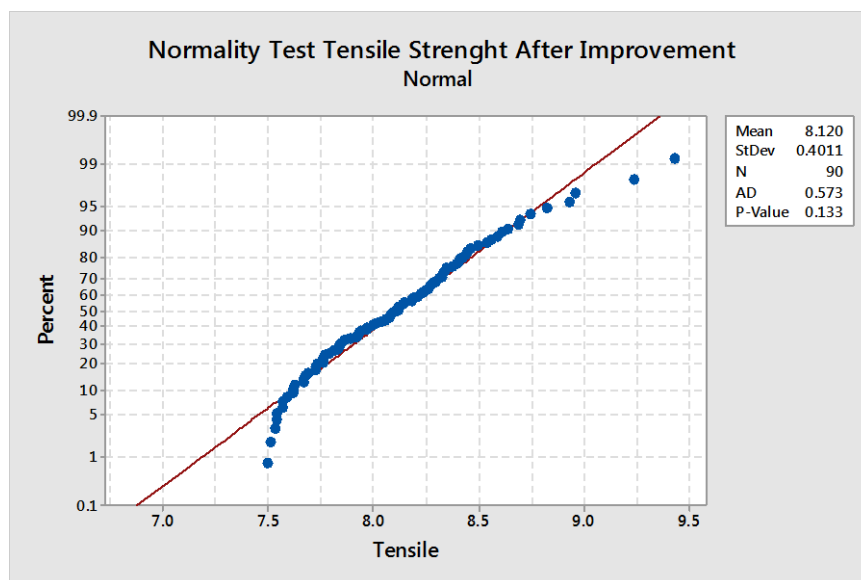
1. ระหว่างการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด 1 ชิ้นต่อ 30 นาที
2. ก่อนส่งมอบให้กับผู้ผลิตลำดับที่ 1 จำนวน 3 ชิ้นต่อล็อต
3. ผู้ผลิตลำดับที่ 1 รับมอบชิ้นงานต้องทดสอบ 3 ชิ้นต่อล็อต
4. ชิ้นงานผ่านทุกกระบวนการแล้วทดสอบ 3 ชิ้นต่อล็อต
5. ก่อนส่งมอบชิ้นงานให้กับลูกค้าทดสอบ 3 ชิ้นต่อล็อต

ถ้าชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนดต้องปฏิเสธล็อตและต้องมีการสอบกลับเพื่อยืนยันผลอีกครั้งในทุกครั้งที่ทดสอบ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องฝ่ายคุณภาพและฝ่ายผลิตต้องลงมือปรับปรุงแก้ไขในทันทีทันใด และตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2558 จนถึงปัจจุบัน (มกราคม 2559) ยังไม่มีปัญหาในด้านค่าความทนแรงดึงน้อยกว่ามาตรฐานเลย

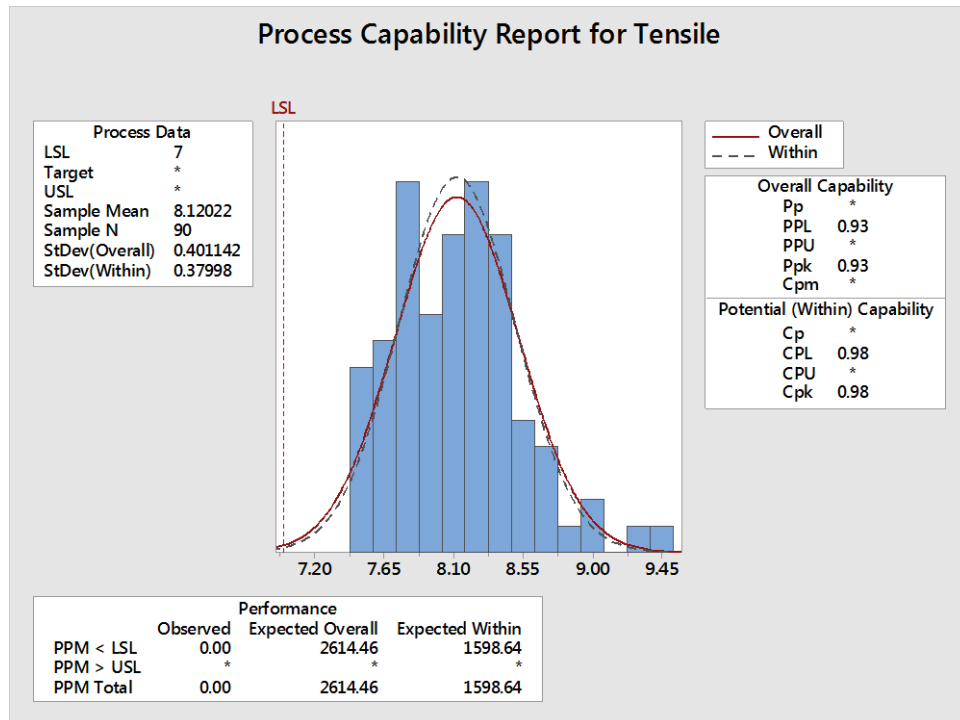
ตารางที่ 4-5 ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนการหลังปรับปรุงแล้ว

ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1	7.500	12	8.406
2	7.762	13	8.245
3	8.460	14	7.865
4	7.939	15	7.994
5	8.076	16	8.222
6	8.115	17	8.285
7	7.931	18	8.062
8	8.436	.	.
9	8.329	.	.
10	7.764	.	.
11	8.423	90	8.827

จากการนำข้อมูลค่าความทนแรงดึงในการผลิตหลังปรับปรุง ผลข้อมูลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงทั้งหมดในภาคผนวก ข มาทำการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลดังภาพที่ 4-12 พบว่าค่า P เท่ากับ 0.133 ถือว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตดังภาพที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าความสามารถของกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุดหลังปรับปรุงกระบวนการและกำหนดปัจจัยเครื่องเชื่อมให้เป็นมาตรฐานแล้วมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น แสดงดังผลลัพธ์การทดสอบทุกค่าอยู่ในข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ (มากกว่า 7 kN) ทำให้หลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.120 kN และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.380 แสดงถึงการกระจายตัวของข้อมูลที่ทดสอบ อยู่ห่างจากค่าเฉลี่ยโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.380 ซึ่งยังคงมีค่ามากกว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์อยู่ รวมทั้งความสามารถกระบวนการผลิต (Ppk) เท่ากับ 0.93








ภาพที่ 4-12 ทดสอบการแจกแจงของค่าความต้านทานแรงดึงหลังปรับปรุง



ภาพที่ 4-13 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในกระบวนการผลิตก่อนการควบคุมปัจจัยดั่งที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และหลังการควบคุมปัจจัยเพื่อยืนยันผลการทดลอง พบว่าก่อนปรับปรุงกระบวนการ ไม่มีชิ้นส่วนใดสูงกว่าข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ ด้วยค่าเฉลี่ย 3.2008 kN ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.928 และมีความสามารถของกระบวนการเท่ากับ -1.36 ทำให้คาดการณ์ชิ้นส่วนเสียเท่ากับ 999,984 PPM และหลังจากการปรับปรุงกระบวนการ ชิ้นส่วนผ่านการทดสอบทั้งหมด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.1202 kN ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.380 ความสามารถของกระบวนการเท่ากับ 0.93 และคาดการณ์ชิ้นส่วนเสียเท่ากับ 1,598 PPM โดยรวมแล้วหลังปรับปรุงกระบวนการได้รับการพัฒนาดีขึ้นกว่าก่อนปรับปรุงสรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังการควบคุมปัจจัย

ข้อมูล	ก่อนควบคุมปัจจัย	หลังควบคุมปัจจัย
จำนวนการทดสอบ	20	36
ผ่านเกณฑ์ทดสอบมาตรฐาน	0	36 
ค่าเฉลี่ย	3.2008	8.1202 
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.928	0.380 
ความสามารถของกระบวนการ (Ppk)	-1.39	0.93 
PPM	999,984	1,598 

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนให้ตรงตามข้อกำหนดผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งพึงประสงค์ที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนควรดำเนินการให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ชิ้นส่วนเฟืองเพลาคู่เหวี่ยงมีการย้ายฐานการผลิตจากประเทศอิตาลีมาผลิตที่ประเทศไทย ดังนั้นการพัฒนาชิ้นส่วนใหม่นี้จึงต้องมีความสามารถเทียบเท่ากับชิ้นส่วนเดิม ผลิตภัณฑ์สำเร็จนี้ประกอบไปด้วยชิ้นส่วน 2 ชนิด คือ เฟืองและแผ่นโลหะ ยึดติดกันด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบจุด ชิ้นส่วนหลังการยึดเข้าด้วยกันควรมีค่าความต้านทานแรงดึง ได้ไม่น้อยกว่า 7 kN ตามข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ กอปรกับช่วงทดลองทำชิ้นส่วนตัวอย่างมีปัญหาค่าความทนแรงดึงไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า ผู้ศึกษาและผู้ผลิตจึงใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง และหาปัจจัยของเครื่องจักรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด ให้ค่าความต้านทานแรงดึงได้ตรงตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โดยหลังจากการปรับปรุงมีการติดตามผลการดำเนินงานเป็นเวลา 4 เดือน เพื่อยืนยันผลการทดลองหลังปรับปรุงมีความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นอย่างแท้จริง

สรุปผลการดำเนินงาน

1. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงไม่ตรงตามข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงชิ้นส่วนมี 3 ปัจจัย คือ

- 1.1 ชนิดแผ่นโลหะ
- 1.2 กระแสไฟเชื่อม
- 1.3 เวลาเชื่อม

ระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุดของชิ้นส่วนเฟืองเพลาคู่เหวี่ยงนี้ ต้องใช้ชนิดแผ่นโลหะชนิด SK-85 ซึ่งถูกกำหนดในข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ของลูกค้า และตั้งค่าเครื่องเชื่อมที่กระแสเชื่อม 11 kA และเวลาเชื่อมที่ 2 Cycle จึงจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงตรงกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

2. หลังจากนำผลที่ได้จากการศึกษาเพื่อกำหนดปัจจัยการตั้งค่าเครื่องจักรนำไปใช้จริง โดยมีการติดตามผลการดำเนินงานในทุกล็อตการผลิตเป็นเวลา 4 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน-กันยายน 2558 พบว่าหลังจากการควบคุมกระบวนการผลิตแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.120 kN

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.380 ความสามารถของกระบวนการ (Ppk) เพิ่มขึ้นเป็น 0.93 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเดิมก่อนการควบคุมมีค่าเฉลี่ย 3.2008 kN ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.928 และความสามารถของกระบวนการเท่ากับ -1.39

3. จากการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างก่อนการควบคุมสามารถคาดการณ์ของเสียในกระบวนการที่จะเกิดขึ้น คือ 999,984 PPM และหลังจากการควบคุมกระบวนการคาดการณ์ของเสียในกระบวนการที่จะเกิดขึ้น คือ 1,598 PPM ซึ่งถือว่าสามารถลดของเสียได้ถึง 99.8% เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังควบคุมกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด

อภิปรายผลการดำเนินงาน

ในการทำวิจัยครั้งนี้ไม่มีฐานข้อมูลเดิมจากการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มาก่อนจึงเป็นการเริ่มต้นศึกษาใหม่ทั้งหมดของทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่ชนิดของโลหะที่ใช้ให้เหมาะสม รวมทั้งกระบวนการเชื่อมโลหะแบบจุดพารามิเตอร์ของการตั้งค่าเครื่องเชื่อมควรมีความเหมาะสม ผู้ส่งมอบลำดับที่ 1, 2 และผู้ศึกษาลองผิดลองถูกหลายครั้ง แต่ไม่ประสบผลสำเร็จ จึงได้นำหลักการของการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้และได้ผลลัพธ์ที่ดี

ผลดีของการออกแบบการทดลอง คือ ได้ผลลัพธ์ภายในระยะเวลาอันสั้น แต่ต้องปรับปรุงกระบวนการให้มีมาตรฐานเสียก่อน ควบคุมปัจจัยภายนอกที่สามารถควบคุมได้ เช่น ความรู้ความสามารถของพนักงาน วิธีการทำงาน อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน อุปกรณ์เชื่อม และเครื่องจักรให้มีความพร้อม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น และกรองปัจจัยที่มีความซับซ้อนด้านอิทธิพลต่อผลลัพธ์ด้วยการทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละปัจจัย (One-factor-at-a-time) กำหนดการควบคุมปัจจัยที่สามารถบ่งชี้อิทธิพลต่อผลลัพธ์ได้ชัดเจนและการทดลองด้วยรูปแบบการทดลองที่เหมาะสมเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ยังไม่สามารถบ่งชี้อิทธิพลต่อผลลัพธ์ได้ต่อไป

สมการตัวแบบถดถอยเพื่อคาดเดาผลลัพธ์ในอนาคต ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าเครื่องจักรในกระบวนการเชื่อมประสานแบบจุด สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่นโลหะชนิด SK-85 เท่ากับ $12.38 - (0.855 \times \text{กระแสเชื่อม}) - (5.78 \times \text{เวลาเชื่อม}) + (0.711 \times \text{กระแสเชื่อม} \times \text{เวลาเชื่อม})$ และค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับแผ่นโลหะชนิด SPCC เท่ากับ $12.84 - (0.855 \times \text{กระแสเชื่อม}) - (5.78 \times \text{เวลาเชื่อม}) + (0.711 \times \text{กระแสเชื่อม} \times \text{เวลาเชื่อม})$ โดยสามารถทดลองผลิตตามปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปและควรพิจารณาลักษณะภายนอกของชิ้นงานหลังจากเชื่อมด้วย เพราะในบางครั้งอาจเกิดคุณลักษณะที่ไม่ต้องการเช่น น้ำเหล็กไหลย้อย เป็นต้น

แนวทางการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับ Rowland and Jiju (2003) และ ณัฐกฤต แสงสว่าง และจริยาภรณ์ อุ่นวงษ์ (2555) ซึ่งเป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาและกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด เช่นเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านค่าใช้จ่ายในการทดลอง การหาค่าความต้านทานแรงดึงเป็นการทดสอบแบบทำลายจึงมีค่าใช้จ่ายในการทดลองต่อชิ้นสูง จึงมีจำนวนชิ้นงานที่ทดลองน้อยเกินไป โดยการทดสอบ Power curve ด้วยจำนวนทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะการทดลอง $n = 3$ จะได้ค่า Power เท่ากับ 0.214 ซึ่งถือว่ามีความต่ำอยู่ แต่หากต้องการทดลองที่มีประสิทธิภาพแม่นยำและแน่นอนมากกว่านี้ควรเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำตามลำดับ

2. การตั้งค่าเครื่องเชื่อมไม่มีลักษณะตายตัว ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ต้องเชื่อมติดกัน โลหะชนิดเดียวกันสามารถเชื่อมติดกันได้ดี เพราะคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกัน โลหะสามารถผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี แตกต่างกับโลหะคนละชนิดกันไม่สามารถผสมกันได้อย่างเต็มที่ ดังเช่น การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองกับชิ้นส่วนวงโลหะอัดขึ้นรูป ยึดติดกับแผ่นโลหะชนิด SK-85 และ SPCC ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกัน โดยสิ้นเชิง ไม่สามารถยึดเกาะกันได้อย่างสมบูรณ์ ควรหาสภาวะที่เหมาะสมชิ้นงานให้ตรงกับของข้อกำหนดในแต่ละกรณีไป

3. การควบคุมกระแสเชื่อมในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะกระบวนการผลิตต่างมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมไม่ได้และสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ถ้าในกระบวนการควบคุมกระแสเชื่อมไม่ดีจะส่งผลให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไป

4. ควรมีการพิจารณาการออกแบบแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance sampling plan) เพื่อการพัฒนาเฝ้าติดตามอย่างต่อเนื่องในระยะยาว จำนวนชิ้นส่วนของกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาทดสอบสามารถเป็นตัวแทนของกลุ่มชิ้นงานที่ผลิตมาทั้งหมดได้อย่างเหมาะสม

บรรณานุกรม

- จรัส ทรัพย์เสรี. (2550). เรื่องวุ่น ๆ ของการวิเคราะห์ขีดความสามารถของกระบวนการ.
เข้าถึงได้จาก <http://www.tpa.or.th>.
- ณัฐกฤต แสงสว่าง และจริยาภรณ์ อุ่นวงษ์. (2555). คุณภาพงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของ
เหล็กกล้าปิวไนซ์กับอลูมิเนียมเกรด 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304.
อุบลราชธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และนครินทร์ ศรีสุวรรณ. (2554). อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมใน
กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตน ที่มีผลต่องานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201.
กรุงเทพฯ: วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.
- บรรหาญ ดิลลา. (2555). การออกแบบการทดลองเบื้องต้น. เข้าถึงได้จาก
<http://www.eng.buu.ac.th/~banhan/DOE/>.
- มงคล เพิ่มฉลาด. (2556). วิศวกรรมการเชื่อม (*Welding Engineering*). (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ:
โอเดียนสโตร์.
- เมธิ พลพันธ์. (2555). *แผนผังก้างปลา*. เข้าถึงได้จาก <http://macs.crma.ac.th/~maetee/>.
- วชิรพงษ์ สาลีสิงห์. (2558). *ลดของเสียในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง*.
สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. เข้าถึงได้จาก <http://www.ftpi.or.th/>
- สมศักดิ์ แก้วพลอย และกลยุท นุญชง. (2557). *การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่
เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพารา*. ขอนแก่น: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.
- สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ. (2555). *การลดต้นทุนในงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของสายรัดถักนํ้ามัน
รุ่น TMT-925*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต.
- Computational Mechanics Research Center. (2015). *Uniaxial tensile testing*
Retrieved from: <http://www.cmerc.engr.tu.ac.th/classes.htm>.
- Douglas C. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*, Fifth Edition. USA:
John Wiley & Sons, Inc.

- Juraeva, M., Ryu J.K., & Song D.J., (2013). *Gate Shape Optimization using Design of Experiment to Reduce the Shear Rate Around the Gate*. International Journal of Automotive Technology, Volumn 14, No. 4 (p. 659-666). Korea: School of Mechanical Engineering, Yeungnam University.
- MillerWelds.com. (2012). *Handbook for Resistance Spot Welding*.
Retrieved from: <http://www.MillerWelds.com>.
- Rowlands H. & Jiju A. (2003). *Application of design of experiments to a spot welding process, Assembly Automation*, volumn 23 (3) (p.273-279). UK: MCB UP Limited.
- Teeradej Wuttiornpun. (2010). *Analysis of Welding Factors to Determine an Optimal Condition of Resistant Spot Welding*. Bangkok: Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางข้อมูลผลการวิจัยตามการออกแบบการทดลอง

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตามการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1	SK-85	10	2	8.073
2	SPCC	11	3	11.411
3	SK-85	9	3	5.119
4	SK-85	9	3	5.140
5	SPCC	11	1	4.935
6	SK-85	11	3	7.443
7	SPCC	11	1	3.325
8	SPCC	9	1	5.990
9	SPCC	10	3	6.474
10	SPCC	9	3	9.950
11	SK-85	9	3	5.031
12	SPCC	10	2	6.420
13	SPCC	9	1	4.461
14	SK-85	10	1	6.169
15	SK-85	10	3	5.598
16	SPCC	10	1	3.332
17	SPCC	10	2	5.784
18	SPCC	11	2	9.549
19	SK-85	9	1	4.728
20	SPCC	9	2	8.175
21	SPCC	11	3	10.070
22	SPCC	9	2	6.962
23	SK-85	9	2	6.874
24	SPCC	10	1	4.206
25	SK-85	11	3	8.747

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
26	SK-85	10	2	8.268
27	SK-85	11	2	8.477
28	SK-85	11	2	8.142
29	SK-85	11	1	4.750
30	SK-85	10	1	4.832
31	SK-85	9	2	6.606
32	SPCC	11	2	8.485
33	SPCC	11	3	10.758
34	SPCC	10	2	5.982
35	SPCC	9	3	8.700
36	SPCC	10	3	7.938
37	SPCC	10	1	4.663
38	SPCC	9	2	7.081
39	SK-85	10	1	5.972
40	SK-85	9	1	4.895
41	SK-85	9	1	6.169
42	SK-85	11	1	5.608
43	SPCC	10	3	6.858
44	SK-85	11	1	5.477
45	SK-85	10	2	8.526
46	SK-85	10	3	5.171
47	SK-85	9	2	5.932
48	SPCC	11	1	4.413
49	SPCC	9	1	5.419
50	SPCC	9	3	7.908

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

ลำดับ	ชนิดแผ่นโลหะ	กระแสไฟ	เวลาเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
51	SK-85	11	2	8.511
52	SPCC	11	2	8.095
53	SK-85	11	3	7.318
54	SK-85	10	3	7.460

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนการหลังปรับปรุง

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนในกระบวนหลังปรับปรุง

ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	ชิ้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
1	7.500	27	7.840
2	7.762	28	7.690
3	8.460	29	7.729
4	7.939	30	8.104
5	8.076	31	7.729
6	8.115	32	8.407
7	7.931	33	7.767
8	8.436	34	7.569
9	8.329	35	8.324
10	7.764	36	8.119
11	8.423	37	8.313
12	8.406	38	8.271
13	8.245	39	8.263
14	7.865	40	8.336
15	7.994	41	8.088
16	8.222	42	7.670
17	8.285	43	7.965
18	8.062	44	7.789
19	8.963	45	8.589
20	8.081	46	8.349
21	8.180	47	7.809
22	7.918	48	8.214
23	7.510	49	7.572
24	7.532	50	7.846
25	8.011	51	8.540
26	8.054	52	7.621

ตารางภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

ชั้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)	ชั้นส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึง (kN)
53	7.621	72	8.149
54	8.034	73	8.138
55	8.697	74	7.623
56	8.241	75	8.449
57	8.641	76	7.667
58	7.929	77	7.540
59	8.373	78	7.679
60	7.590	79	9.427
61	8.746	80	8.327
62	7.543	81	8.191
63	7.837	82	8.611
64	8.273	83	8.563
65	9.236	84	8.119
66	7.759	85	8.931
67	7.832	86	8.294
68	8.399	87	7.734
69	8.183	88	8.685
70	7.892	89	8.498
71	7.966	90	8.827