



ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อมุมเงยสำหรับกระบวนการเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ Effect of welding parameter on pitch angle for electronic circuit process

ธนพงศ์ ปัญจิต* กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และ กীরติ สุลักษณ์

Thanapong Punchit*, Kontorn Chamniprasart and Keerati Sulaksna

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Received November 2011

Accepted January 2012

บทคัดย่อ

การเชื่อมมีความสำคัญต่อการประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการดังกล่าวมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ต้องควบคุมเพื่อให้การเชื่อมมีคุณภาพ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม การศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อม งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อมุมเงยตัวของชิ้นงานหลังเชื่อม วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคนถูกนำมาใช้ออกแบบการทดสอบ พารามิเตอร์ของเครื่องเชื่อมถูกแปรค่าการทดสอบบนช่วงที่การเชื่อมเกิดขึ้นได้ ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยให้ความสนใจความแปรปรวนเป็นหลัก จากนั้นนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยตัวและพารามิเตอร์การเชื่อม แบบจำลองที่ได้บ่งชี้ถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีต่อมุมเงยตัวซึ่งนำไปสู่การปรับใช้ในกระบวนการเชื่อมได้

คำสำคัญ : การเชื่อม การออกแบบการทดลอง มุมเงย สมการความสัมพันธ์ วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน

Abstract

Laser welding process plays important role in assembling the small component. In the process, there are many parameters that must be controlled in order to yield the good welding quality such as current power, welding time, inert gas feed rate, pressing force, and welding position. An understanding in the characteristics of those parameters makes the engineers to improve the quality of welding. This research studies the effects of those influent parameters to the pitch angle of the welding joints. The Box-Behnken method is investigated for design the experiment. The parameters for controlling the machine are varied within the available range of the welding. The experimental data is taken into account for analyzing

*Corresponding author. Tel.: 044-224-410-1

statistically and the variation of the data is of interest. The experimental data is then taken into account for formulating the correlations between the pitch angle and those welding parameters. The correlations can be used to predict the effect of each parameter to the pitch angle and leading to apply in the welding process.

Keywords : Welding, Design of experiment, Pitch angle, Correlation equation, Box-Behnken method

1. บทนำ

การเชื่อมเป็นกระบวนการประสานเนื้อวัสดุให้เข้ากัน ซึ่งปัจจุบันมีหลายประเภทและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูงในการประกอบ การเชื่อมจึงมักถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ข้อดีคือ มีความแม่นยำในการเชื่อมสูง แต่ด้วยความที่ชิ้นส่วนที่เชื่อมมีขนาดเล็ก ผลกระทบจากการเชื่อมมักทำให้เกิดการโก่งของชิ้นงานที่เรียกว่า การงอตัวขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการเชื่อมเพื่อประกอบวงจรกับแผ่นโลหะ ดังนั้นการศึกษาคูณลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการเชื่อมจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อม โดยอาศัยหลักการการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและจำลองผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมให้อยู่ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปแบบสมการ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง หมายถึงการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางสถิติหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

การออกแบบการทดลองเป็นสิ่งจำเป็นหากต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ ยิ่งถ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลองด้วยแล้ว วิธีการทางสถิติเป็นวิธีเดียวที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ทั้งสองนี้เกี่ยวข้องและสืบเนื่องต่อกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่นำมาใช้ [7]

2.2. แนวทางการออกแบบการทดลอง

แนวทางการออกแบบการทดลองมีขั้นตอนดังนี้ [1] (1) ทำความเข้าใจปัญหา วัตถุประสงค์ของการทดลอง สืบหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (2) เลือกปัจจัยระดับ และขอบเขต เพื่อนำมาใช้แปรค่าในการทดลอง กำหนดขอบเขตการแปรค่าของปัจจัย และกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง (3) เลือกปัจจัยตอบสนองที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ (4) เลือกการออกแบบการทดลอง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับจำนวนการทดลอง ลำดับการทดลองที่ใช้เก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรใช้วิธีบล็อกหรือการสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ (5) ทำการทดลอง ติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวังจนแน่ใจว่าทุกอย่างเป็นไปตามแผน (6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อหาผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ มีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ และ (7) สรุป

ผลโดยนำเอาวิธีการทางกราฟมาช่วย นอกจากนี้ควรทำการทดลอง เพื่อยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุป

2.3. แนวทางการออกแบบการทดลอง

สถิติเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวม นำเสนอ และวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ เป็นเครื่องมือช่วยอธิบายลักษณะของข้อมูลประมาณค่าที่แท้จริงของระบบ [3] จัดแบ่งได้ 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

(1) ค่าแนวโน้มศูนย์กลางของข้อมูล (Central tendency) ใช้หาค่ากลางของข้อมูล ค่านี้เกี่ยวข้องกับค่าสถิติ 3 ค่าได้แก่ (1) ค่าเฉลี่ย (Mean) ถูกใช้เพื่อนำไปใช้หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S) ของข้อมูล (2) ค่ามัธยฐาน (Median) คือค่าในตำแหน่งกลางของข้อมูล ถูกใช้เมื่อข้อมูลมีความเบ้มาก และ (3) ค่าฐานนิยม (Mode) เป็นค่าความถี่สูงสุดในข้อมูลชุดนั้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะต้องมีการวิเคราะห์ก่อนว่าข้อมูลมีความเบี่ยงเบนโดยธรรมชาติหรือไม่เพราะจะมีผลต่อค่าแนวโน้มศูนย์กลาง

(2) ค่าการกระจาย (Dispersion) หรือค่าการเปลี่ยนแปลงในระบบ สามารถวัดได้ด้วยค่าทางสถิติหลายค่าด้วยกัน เช่น ค่าพิสัย (Range) ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน (Variance: S^2) เป็นต้น

ค่าสถิติทั้ง 2 กลุ่มจะเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระบบในกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป ซึ่งเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

2.4. แนวทางการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลายวิธี โดยรายละเอียดของการออกแบบการทดลองในการศึกษา

ปัจจัยที่ 3 ระดับ มีดังนี้ (1) 3^{k-p} factorial ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยสามารถประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) และผลกระทบกำลังสอง (Quadratic Effects) ได้ทั้งหมด แต่ไม่เหมาะสมในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด (2) 3^k full factorial ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ต้องใช้งบประมาณมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองสูงกว่าแผนอื่นๆ โดยหากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะต้องทำการทดลองจำนวน 243 การทดลอง (3) Central Composite Designs (CCD) เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพ 1 ปัจจัยก็ยังคงใช้ได้ ซึ่งประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสอง เลือกศึกษาผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ ซึ่งหากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะทำการทดลองจำนวน 20 การทดลอง แต่ในการทดลองจำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เข้ากับรูปแบบการทดลองซึ่งอาจอยู่นอกช่วงการทดลอง จึงไม่ยืดหยุ่นสำหรับใช้ในทางปฏิบัติจริง (4) Box-Behnken ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ และอาจใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพได้ในบางกรณีขึ้นกับจำนวนปัจจัย สามารถประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยได้ทุกค่า หากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะต้องทำการทดลองจำนวน 46 การทดลอง จากที่กล่าวมา จะเห็นว่าแบบการทดลองต่างๆ มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงควรเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับงาน

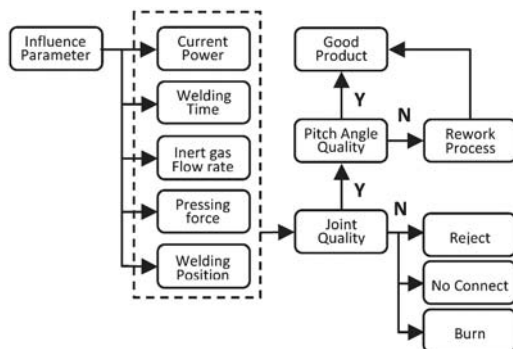
Box-Behnken (1960) ได้นำเสนอการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ

วิธี Box-Behnken จะใช้หลักการของ 2^2 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบบวกกับจุดกึ่งกลางรวมเข้าไป งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธี Box-Behnken เพราะเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขที่มีอยู่คือจำนวนขึ้นทดสอบ อีกทั้งเป็นแบบการทดสอบที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การหาสภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง [4] และการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ สำหรับเหล็กเอสที 37 [6]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1. การเลือกปัจจัย ระดับ ขอบเขต และตัวแปรตอบสนอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ผลกระทบที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อม

การศึกษาพารามิเตอร์ในครั้งนี้มีการคัดกรองโดยอาศัยหลักความเป็นไปได้ในการทดสอบและคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ ได้พารามิเตอร์ที่จะทำการ

ศึกษา 5 ตัวคือ กำลังไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมทั้ง 5 พารามิเตอร์ สามารถปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม สำหรับคุณภาพของงานเชื่อมในขั้นแรกจะพิจารณาความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ว่าเกิดการไหม้บริเวณรอยเชื่อมหรือไม่ หรือรอยเชื่อมไม่ต่อกันระหว่างวงจรที่เชื่อม จากนั้นจึงนำไปตรวจวัดค่ามุมเฉย ซึ่งจะเลือกค่านี้เป็นตัวแปรตอบสนองที่จะนำมาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่อไป และในการกำหนดระดับของพารามิเตอร์เพื่อนำมาเปลี่ยนแปลงค่าในระหว่างทำการทดสอบนั้นเลือกที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) เนื่องจากต้องการศึกษาพารามิเตอร์อย่างละเอียด โดยค่าระดับต่ำคือ ค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ค่าระดับกลางคือ ค่ากลางระหว่างค่าต่ำที่สุดและมากที่สุดที่จะศึกษา และค่าระดับสูงคือ ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งระดับเหล่านี้ถูกเลือกมาจากการปรับค่าจากซอฟต์แวร์ที่สามารถปรับค่าได้ กล่าวคืออยู่ในช่วงที่การเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบของกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัย ระดับและขอบเขตของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับ		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
กำลังไฟฟ้า (A)	1500	1700	1900
เวลาของการเชื่อม (B)	1	1.5	2
อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (C)	45	62.5	80
แรงกดของหัวเชื่อม (D)	170	285	400
ตำแหน่งการเชื่อม (E)	-20	-5	10

3.2 การเลือกการออกแบบการทดลอง

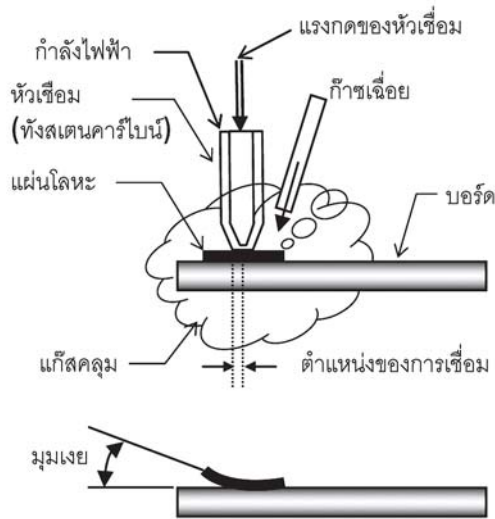
งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อการแยกตัวของวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังเชื่อม และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมแยกตัวกับพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยวิธี Box-Behnken ที่ได้กำหนดระดับของปัจจัยไว้ที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามี 5 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 1 รูปแบบการทดสอบถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม จึงได้รูปแบบการทดสอบทั้งหมด 46 ชุด โดยแต่ละชุดมีการทำซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดและประเมินผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดสอบ ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดสอบทั้งสิ้น 184 การทดสอบดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้ค่าระดับในแต่ละปัจจัย ในตารางที่ 1 แทนตัวเลข -1, 0, +1 เพื่อใช้สร้างรูปแบบการทดสอบ โดยขั้นตอนการทดสอบจะอ้างอิงตามคอลัมน์ Run Order ซึ่งเป็นลำดับการทดสอบที่

ตารางที่ 2 รูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่ได้จากโปรแกรม Minitab

Std Order	Run Order	A	B	C	D	E
98	1	0	0	1	-1	0
103	2	0	1	0	0	1
57	3	0	1	0	0	1
164	4	1	0	0	-1	0
114	5	0	1	-1	0	0
...	...	...	...	...	...	...
108	183	1	0	1	0	0
35	184	-1	0	0	0	1

3.3 การทดสอบ

การทดสอบดำเนินการตามแผนการทดลองของ Box-Benken ซึ่งมีรูปแบบและระดับการทดสอบดังตารางที่ 2 และลักษณะงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2 โดยขั้นตอนการเชื่อมจะเริ่มจากหัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของการเชื่อมที่เซตไว้ โดยตำแหน่งนี้วัดเทียบกับแนวกึ่งกลางแผ่นโลหะ ซึ่งมีค่าบวกเมื่อวัดไปทางขวาและเป็นลบเมื่อวัดไปทางซ้าย จากนั้นหัวเชื่อมจะกดลงไปยังแผ่นโลหะที่วางตัวอยู่บนบอร์ดด้วยขนาดแรงกดที่กำหนดไว้ กำลังไฟฟ้าหน่วยมิลลิวัตต์ ถูกปล่อยจากแหล่งจ่ายส่งผ่านเข้าสู่หัวเชื่อมซึ่งทำจากทังสเตนคาร์ไบน์ ความต้านทานไฟฟ้าในเนื้อวัสดุของหัวเชื่อมจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยส่วนปลายหัวเชื่อมจะเกิดความร้อนสูงสุดเพราะมีพื้นที่หน้าตัดเล็กสุด กำลังไฟฟ้าจะถูกปล่อยด้วยช่วงเวลาที่กำหนดด้วยขนาดมิลลิวินาที ความร้อนก่อให้เกิดการหลอมแผ่นโลหะเชื่อมติดกับวงจรของบอร์ด แก๊สเฉื่อยซึ่งในที่นี้ใช้ในโตรเจนถูกใช้เพื่อคลุมบริเวณเชื่อมป้องกันมิให้ออกซิเจนและความชื้นในอากาศเข้าไปรวมตัวกับรอยเชื่อม ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการข้างต้นถูกเซตจากเครื่องเชื่อมและการทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติ หลังการเชื่อมเสร็จแผ่นโลหะจะเกิดการโก่งตัวขึ้นด้วยขนาดมุมที่เรียกว่ามุมแยก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดและต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ



รูปที่ 2 กระบวนการเชื่อมแผ่นซีป

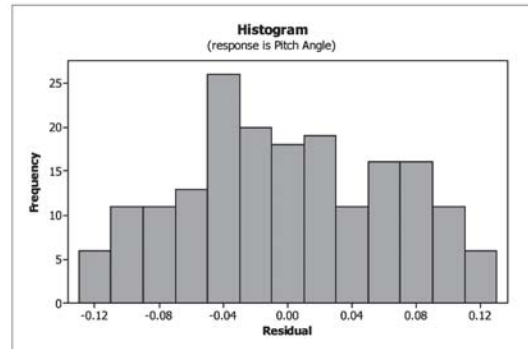
4. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MINITAB เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อกระบวนการเชื่อม โดยในที่นี้กำหนดตัวแปรต่างๆ แทนพารามิเตอร์การเชื่อมดังนี้ A แทนกำลังไฟฟ้า (mW) B แทนเวลาของการเชื่อม (ms) C แทนอัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (kg/h) D แทนแรงกดของหัวเชื่อม (mN) และ E แทนตำแหน่งของการเชื่อม (mm) ผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ การตรวจสอบข้อมูล ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฉยกับพารามิเตอร์การเชื่อม และการทดสอบความเหมาะสมของสมการ

4.1 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดสอบ

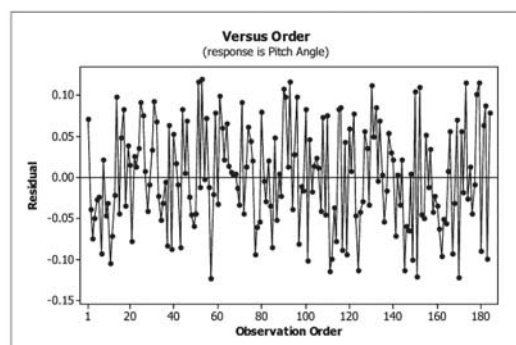
ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการทางสถิติที่อาศัยการนำกราฟเข้ามาช่วยวิเคราะห์ข้อมูล โดยนิยมทำการตรวจสอบ 3 ส่วน ได้แก่ การตรวจสอบการ

กระจายแบบแจกแจงปกติ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน ดังนี้



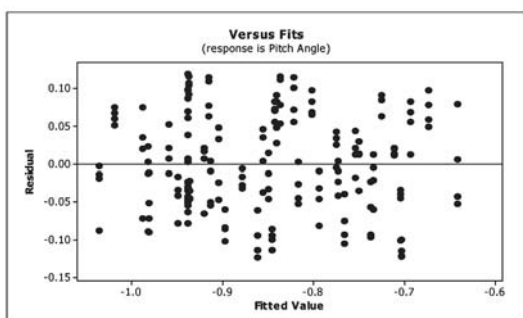
รูปที่ 3 ฮิสโตแกรมแสดงกระจายของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยใช้แผนภูมิการกระจายสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4 ส่วนตกค้าง (Residual) คือค่าประมาณความคาดเคลื่อนที่ข้อมูลเบี่ยงเบนไปจากสมการความสัมพันธ์ และลำดับของข้อมูล (Observation Order) จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบแกนอ้างอิงศูนย์ ไม่เอนเอียงไปส่วนใดส่วนหนึ่ง แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล

การตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคาดเคลื่อน จากรูปที่ 5 พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายรอบแกนอ้างอิงศูนย์ในบางข้อมูล แต่ยังมีอีกหลายชุดข้อมูลที่มีการกระจายรอบแกนอ้างอิงที่ไม่คงที่ อันเนื่องมาจากสาเหตุผลลัพธ์ของค่ามุมเงยในแต่ละครั้งที่ได้จากการทดสอบในกระบวนการทำซ้ำมีความแตกต่างกันมากเกินไป จึงก่อให้เกิดความแปรปรวนที่ไม่คงที่



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย

4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า SS_{Regr} และค่า SS_T ดังนั้น R จึงเป็นตัวระบุเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมุมเงยที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (1)$$

เมื่อ SS_{Regr} เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายได้ SS_E เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายไม่ได้ SS_T เป็นผลรวมระหว่าง SS_{Regr} กับ SS_E

ในทางปฏิบัติค่า R จะมีความไวในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อจำนวนตัวแปรอิสระในสมการเพิ่มขึ้น ค่า R จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงใช้ค่า R ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{MSE}{MST} \quad (2)$$

เมื่อ

$$MST = \frac{SST}{n-1} \quad (3)$$

เมื่อ MSE เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองที่สมการอธิบายไม่ได้ และ MST เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองทั้งหมด

ซึ่งค่านี้ใช้อธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมุมเงย ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการเช่นกัน เมื่อพิจารณา R จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 72.0% และมีค่าเท่ากับ 68.56% จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง

4.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยและพารามิเตอร์การเชื่อม

ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติ ได้ถูกนำมาสร้างสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงย () และพารามิเตอร์การเชื่อมได้ดังสมการที่ 4 ซึ่งสมการประกอบไปด้วยส่วนของผลกระทบหลัก ส่วนของผลกระทบร่วม และส่วนของผลกระทบกำลังสอง

$$\begin{aligned} \theta = & 12.6794 - 2.7347B - 3.3019BB \times 10^{-1} \\ & - (1.0223A + 6.1426C + 2.2765E) \times 10^{-2} \\ & - (8.1170D - 1.0166AB - 7.6955BC + 1.5711BD) \times 10^{-3} \\ & + (1.9181CC) \times 10^{-4} + (1.4143AC + 1.7322AE) \times 10^{-5} \\ & + (1.9376AA + 2.0762DD + 5.1256AD) \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (4)$$

จากสมการจะเห็นว่าพารามิเตอร์เวลาของการเชื่อม (B) มีผลกระทบต่อมุมเงยมากที่สุด ส่วนพารามิเตอร์กำลังไฟฟ้า (A) อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (C) แรงกดของหัวเชื่อม (D) และตำแหน่งของการเชื่อม (E) มีผลกระทบต่อมุมเงยเช่นกัน โดยเป็นความสัมพันธ์ของผลกระทบหลักและความสัมพันธ์ของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองทางสถิติในการศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อการเงยตัวในกระบวนการเชื่อมวงจรกับแผ่นโลหะของการประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยปัจจัยที่ศึกษามี 5 ปัจจัยได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ จากนั้นนำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยตัวกับพารามิเตอร์การเชื่อม และพบว่าพารามิเตอร์เวลาของการเชื่อมมีผลกระทบต่อการเงยตัวของชิ้นงานมากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ (I/UCRC) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chutima P. Design of Experiments. 1th ed. Chulalongkorn University; 2002. (In Thai).
- [2] Ploypanichcharoen K. Statistics for engineers. 6th ed. Technology Promotion Association (Thailand-Japan); 2002. (In Thai).
- [3] Sudasna-na-Ayudthya P, Luangpaiboon P. Design and Analysis of Experiments. 1th ed. Top; 2008. (In Thai).
- [4] Ampaiboon A. Optimization of MAG-M Welding Condition Using Experriment Design Technique. IE Network Conference. 2008 Oct 20-22.
- [5] Ampaiboon A. Optimization of Gas Metal Arc Welding Factor. IE Network Conference. 2007 Oc Oct 24-26.
- [6] Ampaiboon A. Optimal parameters of the flux core welding for steel ST 37. IE Network Conference. 2005 Oc Oct 20-22.
- [7] Montgomery, D.C. 2009. Design and analysis of experiment. (7th Edition), The United States of America: John Wiley & Sons.
- [8] Box, G.E.P., Behnken, D.W. 1960; Some new three level designs for the study of quantitative variable, Technometrics 2, 455-475.

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย MINITAB

The analysis was done using coded units.					
Estimated Regression Coefficients for PSA					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Cons.	12.6794	1.21948	10.397	0.000	
A	-0.0102	0.00106	-9.650	0.000	
B	-2.7347	0.34738	-7.872	0.000	
C	-0.0614	0.01007	-6.101	0.000	
D	-0.0081	0.00149	-5.435	0.000	
E	-0.0228	0.01118	-2.037	0.043	
A*A	0.0000	0.00000	6.850	0.000	
B*B	0.3302	0.04526	7.296	0.000	
C*C	0.0002	0.00004	5.192	0.000	
D*D	0.0000	0.00000	2.427	0.016	
E*E	0.0000	0.00005	0.286	0.775	
A*B	0.0010	0.00017	6.083	0.000	
A*C	0.0000	0.00000	2.962	0.004	
A*D	0.0000	0.00000	7.054	0.000	
A*E	0.0000	0.00001	3.109	0.002	
B*C	0.0077	0.00191	4.029	0.000	
B*D	-0.0016	0.00029	-5.405	0.000	
B*E	0.0014	0.00223	0.624	0.533	
C*D	0.0000	0.00001	1.091	0.277	
C*E	-0.0001	0.00006	-1.260	0.210	
D*E	0.0000	0.00001	1.153	0.251	

S = 0.0668503 PRESS = 0.934190
R-Sq = 72.00% R-Sq(pred) = 64.09%
R-Sq(adj) = 68.56%

Analysis of Variance for PSA

Sour.	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regr.	20	1.87276	1.87276	0.093638	20.95	0.000
Lin.	5	0.75139	0.63783	0.127567	28.55	0.000
A	1	0.05607	0.41618	0.416177	93.13	0.000
B	1	0.00173	0.27696	0.276955	61.97	0.000
C	1	0.02460	0.16635	0.166355	37.22	0.000
D	1	0.00372	0.13199	0.131987	29.53	0.000
E	1	0.66526	0.01855	0.018545	4.15	0.043
Squ.	5	0.42803	0.42803	0.085606	19.16	0.000
A*A	1	0.11160	0.20970	0.209705	46.92	0.000
B*B	1	0.18186	0.23787	0.237871	53.23	0.000
C*C	1	0.10757	0.12046	0.120462	26.96	0.000
D*D	1	0.02663	0.02632	0.026318	5.89	0.016
E*E	1	0.00037	0.00037	0.000366	0.08	0.775
Int.	10	0.69334	0.69334	0.069334	15.51	0.000
A*B	1	0.16536	0.16536	0.165360	37.00	0.000
A*C	1	0.03920	0.03920	0.039204	8.77	0.004
A*D	1	0.22236	0.22236	0.222360	49.76	0.000
A*E	1	0.04321	0.04321	0.043207	9.67	0.002
B*C	1	0.07255	0.07255	0.072546	16.23	0.000
B*D	1	0.13057	0.13057	0.130572	29.22	0.000
B*E	1	0.00174	0.00174	0.001742	0.39	0.533
C*D	1	0.00532	0.00532	0.005320	1.19	0.277
C*E	1	0.00709	0.00709	0.007090	1.59	0.210
D*E	1	0.00594	0.00594	0.005939	1.33	0.251
Re.E.	163	0.72844	0.72844	0.004469		
LOF	20	0.54398	0.54398	0.027199	21.08	0.000
P.E.	143	0.18446	0.18446	0.001290		
Tot.	183	2.60120				

Estimated Regression Coefficients for PSA using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	12.6794
A	-0.0102230
B	-2.73466
C	-0.0614256
D	-0.00811696
E	-0.0227648
A*A	1.93765E-06
B*B	0.330188
C*C	0.000191814
D*D	2.07616E-06
E*E	1.43870E-05
A*B	0.00101661
A*C	1.41428E-05
A*D	5.12555E-06
A*E	1.73219E-05
B*C	0.00769551
B*D	-0.00157108
B*E	0.00139140
C*D	9.06053E-06
C*E	-8.01902E-05
D*E	1.11688E-05

เมื่อ

Coef = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์

SE Coef = ค่าความคาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

T-Value = ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน t-distribution

P-Value = เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานโดยเปรียบเทียบกับค่า α ในที่นี้ใช้ $\alpha = 0.05$ R-Sq = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)R-Sq(adj) = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ทำการปรับค่า (R^2_{adj})

Seq SS = ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน

Adj SS = ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่ทำการปรับค่าแล้ว

Adj MS = ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองที่ทำการปรับค่าแล้ว

F = ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน F-distribution

Lin. = การวิเคราะห์ผลกระทบทงเชิงเส้น

Squ. = การวิเคราะห์ผลกระทบทงกำลังสอง

Int. = การวิเคราะห์ผลกระทบทงรวมระหว่างปัจจัย

LOF = การทดสอบความเหมาะสมของสมการ