



# การปรับปรุงกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ของสายรัดถังน้ำมันรุ่น TMT-925

## Resistance Spot Welding Process Improvement of Band Fuel Tank model TMT-925

สาธิต รุ่งฤทธิ์สมบัติกิจ

**Satit Rungrudesombatkit**

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Industrial Engineering Technology, 1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok, 10250

E-mail: rsatit0555@gmail.com, Tel. 089-7701135, Fax. 02-3214444

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของสายรัดถังน้ำมันรุ่น TMT-925 โดยไม่ทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลงและวิเคราะห์ต้นทุนจากการลดเวลาในการเชื่อม โดยสูงตัวอย่างมากถึง 12 ชั่วโมง แต่ละครั้ง ให้ปรับลดเวลาในการเชื่อมจากเดิม 2 ไซเคิล ทำการเชื่อม 6 ตัวอย่างแรก และวัดขนาดนักเก็ต จำนวนอัตราการซึมลึก ล้วนๆ ก็ 6 ตัวอย่างที่เหลือนำไปวัดแรงดึงเฉือนเพื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของลูกค้า เมื่อวิเคราะห์ ความแปรปรวนแบบสองทางและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือนที่เวลาในการเชื่อมต่างๆ ด้วยการ เปรียบเทียบเชิงพหุของทฤษฎี พบร่วม แรงดึงเฉือนที่เวลาในการเชื่อมต่ำสุดที่เป็นไปได้ที่ 24 ไซเคิล มีค่าไม่แตกต่างจากเวลาในการเชื่อมเดิมที่ 30 ไซเคิล ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีขนาดนักเก็ต และอัตราการซึมลึกสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า และได้แสดงผลการทดสอบอายุการใช้งานหัวเชื่อมเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์ต้นทุน ผลที่ได้คือต้นทุนการผลิตลดลง 84,972 บาท/ปี

### ABSTRACT

The objective of this work was to reduce weld time without decreasing the quality of work piece in resistance spot welding of Band Fuel Tank model TMT-925 and to analyze its cost. Twelve samples were randomly chosen each time; weld time was decreased from the original into a period of two cycles. The first six samples were welded, then their nugget sizes were measured and penetration rates were calculated. Another six samples were taken to measure tensile-shear load and to compare them to customer specifications. Two-way ANOVA and Tukey's Multiple Comparison Test revealed that tensile-shear load of the possible minimum weld time at 24 cycles was not differ from the originally weld time at 30 cycles at the 0.05 level of significance. Its nugget size and penetration rate was conformed to customer specifications. The investigation also showed the result of electrode life test that using for cost analysis and production cost 84,972 bath/year was reduced.

## 1. บทนำ

สืบเนื่องจากผลกระทบของราคาน้ำมัน อัตราดอกเบี้ย และการแข่งขันจากการเปิดเสรีทางการค้า บริษัท ยานภัยฯ จำกัด (มหาชน) จึงได้ดำเนินนโยบายในการผลิต สินค้า ที่มีคุณภาพสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า ควบคู่ไปกับการมีต้นทุนการผลิตต่ำ อย่างไรก็ตาม จาก อดีตที่ผ่านมา เมื่อว่าบริษัทจะสามารถปรับลดต้นทุนให้อยู่ ในเป้าหมายแล้วก็ตาม แต่ก็ไม่ควรหยุดอยู่เพียงเท่านั้น เพราะตามแนวคิดของการลดต้นทุน จะต้องพิจารณาต่อไป อีกว่า จะมีวิธีการปรับลดต้นทุนให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องได้ อย่างไร ดังนั้น จึงควรพิจารณาต่อไปถึงวิธีการอื่นที่ดีกว่าที่ จะลดการใช้วัตถุคิม วัสดุ อุปกรณ์ และพลังงาน [1]

แนวคิดการลดต้นทุนดังกล่าว ได้มีการนำไปใช้ใน การวิจัยข้างแล้ว โดย Silva et. al. (2000) [2] ได้ วิเคราะห์ต้นทุนและคุณภาพของงานเชื่อม ไปพร้อมๆ กัน เพื่อเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสม และสอดคล้องกับ นโยบายด้านการตลาด ส่วน Kelly et. al. (2009) [3] ได้ ทำการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการเชื่อมแบบผสม (เดเซอร์กับไฟฟ้า) เทียบกับการเชื่อมอาร์กไนท์ฟลักซ์ โดย คำนวณหาต้นทุนต่างๆ ได้แก่ แรงงาน วัสดุ และพลังงาน ไฟฟ้า

จากข้อมูลทางสถิติการทดสอบทางกลของชิ้นงาน สายรัดถังน้ำมันรุ่น TMT-925 ในกระบวนการเชื่อมความ ต้านทานแบบจุดของบริษัท ยานภัยฯ จำกัด จำนวน 156 ชิ้น พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงเฉือนเท่ากับ 20.7 kN และ ค่าเฉลี่ยของขนาดนักเกตเท่ากับ 10.56 ม.m. ขณะที่ ข้อกำหนดของลูกค้าระบุไว้ว่า แรงดึงเฉือนจะต้องมีค่าไม่ ต่ำกว่า 9.41 kN และขนาดนักเกตจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 5.7 ม.m. ดังนั้น แรงดึงเฉือนและขนาดนักเกตของชิ้นงานที่ ผลิตจากบริษัทฯ จึงมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของลูกค้ามาก

แม้ว่าข้อมูลค่าแรงดึงเฉือน และขนาดของนักเกตที่ ได้จากการพิจารณา จะมีความสอดคล้องกับ ข้อกำหนดของลูกค้าแล้วก็ตาม แต่จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึง เฉือน และขนาดของนักเกตมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของ ลูกค้ามากเกินไป ซึ่ง Pouranvari (2011) [4] กล่าวว่าการ

ที่นักเกตมีขนาดใหญ่ขึ้น ได้นั้น เกิดจากการเพิ่มเวลาในการ เชื่อม และการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ดังนั้นจึงมี แนวคิดที่จะศึกษาการลดต้นทุน ในงานเชื่อมความ ต้านทานแบบจุด ด้วยการปรับลดเวลาในการเชื่อม (กระแสไฟฟ้าไม่สามารถปรับลดได้เนื่องจากเป็นข้อจำกัด ของบริษัทฯ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการเชื่อม ลง โดยที่คุณภาพงานเชื่อมความต้านทานแบบจุดของสาย รัดถังน้ำมันรุ่น TMT-925 ยังมีความสอดคล้องกับ ข้อกำหนดของลูกค้าและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตหลังจาก ปรับลดเวลาในการเชื่อม

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุ ชิ้นงานทดสอบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

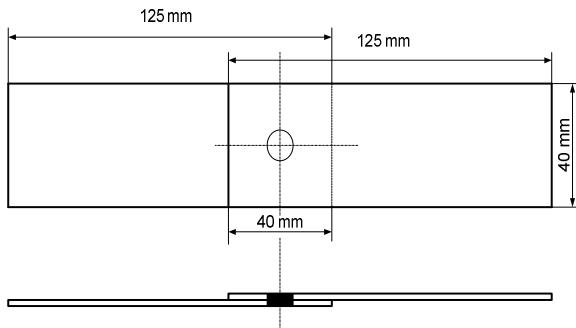
- วัสดุ คือ เหล็กแผ่นกัลวาไนล์ที่ได้จากการให้ความ ร้อนแก่เหล็กเคลือบ (ที่ผ่านกระบวนการจุ่มร้อน) ก่อนการ แข็งตัวของสังกะสี งานทำให้เกิดสารประกอบระหว่างเหล็ก กับสังกะสี (Zinc-Iron Alloys) บนเหล็กแผ่นพื้น [5] ซึ่ง เหล็กแผ่นพื้น (Base Metal) ในที่นี้ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ต่ำ (Low Carbon Steel) มีส่วนผสมทางเคมี คือ คาร์บอน(C) 0.04% แมงกานีส (Mn) 0.13% ฟอสฟอรัส (P) 0.011% ชัลเฟอร์(S) 0.008% และจัดอยู่ในกลุ่ม เดียวกันกับเหล็กกล้ากำลังสูง (High Strength Steels) สำหรับยานยนต์ที่ต้องการน้ำหนักเบา ซึ่งมีค่าความต้านแรง ดึงมากกว่าหรือเท่ากับ 340 MPa [6] โดยสมบัติทางกล ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเหล็กแผ่นพื้นหนา 2 ม.m. [6]

ความเดินจุดคราก (Yield Strength)	ความเดินแรงดึง (Tensile Strength)	ความยืด (Elongation)
249 MPa	340 MPa	46%

ชิ้นงานทดสอบ นำเหล็กแผ่นหนา 2 ม.m. จาก สายการผลิตของสายรัดถังน้ำมัน มาเชื่อมแบบต่อเกยด้วย การเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยกำหนดให้ระยะต่อเกย เท่ากับความกว้างของเหล็กแผ่น ดังรูปที่ 1 ซึ่ง Zhou et.

al. [7] (1999) กล่าวว่าความกว้างของเหล็กแผ่นเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีต่อผลการทดสอบแรงดึงเฉือน การกำหนดระยะต่อเกย์เท่ากับความกว้างเหล็กแผ่นถือว่าเพียงพอแล้ว



รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

- อุปกรณ์ ใช้หัวเชื่อมทองแดงรูปโฉมขนาด 16 ม.m. ที่ผ่านการตรวจสอบให้เป็นรูปกรวยตัด จนได้ผิวน้ำสัมผัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ม.m. ที่ได้มาจากการริมพ์ และใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง ที่ใช้งานอยู่เป็นประจำในโรงงาน โดยตั้งเงื่อนไขในการเชื่อม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการเชื่อม

กระแสเชื่อม(Welding Current)	15 kA
แรงกด(Electrode Force)	0.2 Mpa
เวลาในการเชื่อม(Welding Time)	$\leq 30$ cycle
เวลาดึง(Squeeze Time)	30 cycle
เวลาดึง(Hold Time)	20 cycle

หมายเหตุ : 1 cycle = 50 Hz =  $1/50$  วินาที

- วิธีการทดลอง ทำการปรับลดเวลาในการเชื่อมลงครึ่งละ 2 ไซเคิล โดยเริ่มปรับลดจากค่าที่บริษัทกำหนด (30 ไซเคิล) เป็นต้นไป ในการปรับลดเวลาแต่ละครึ่ง จะสุ่มหยิบเหล็กแผ่นจากล็อตเดียวกันครึ่งละ 12 ชิ้น ไปทำการเชื่อม จากนั้นนำไปทำการทดสอบ ดังนี้

- ทดสอบด้วยการตัดขวาง (Cross-sectioning) โดยนำ 6 ชิ้นแรกไปทำการตัดขวาง แล้วถ่ายภาพด้วยกล้อง

ไมโครสโคปเพื่อวัดขนาดของนักเกต (Nugget Size) และคำนวณอัตราการซึมลึก (Penetration Rate)

2) ทดสอบแรงดึงเฉือน (Tensile-shear Test) นำชิ้นงานที่เหลืออีก 6 ชิ้นไปทดสอบแรงดึงเฉือนด้วยเครื่อง SHIMADZU รุ่น AG-IS 50 กิโลนิวตัน ด้วยอัตราเร็วคงที่ 10 ม.m./นาที โดยหากพบว่า ขนาดของนักเกต แรงดึงเฉือน หรืออัตราการซึมลึกอย่างใดอย่างหนึ่งจากการทดสอบ ไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดลูกค้า [8] ดังตารางที่ 3 หรือเกิดปัญหาขณะที่ทำการเชื่อม เช่น ชิ้นงานติดหัวเชื่อม หรือเกิดรูพรุน จะต้องหยุดทำการทดลองทันที แต่ถ้าผลการทดลองยังสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า หรือไม่พบปัญหาขณะเชื่อม ให้ปรับลดเวลาในการเชื่อมต่อไป

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดของสายรัดถังน้ำมันรุ่น TMT-925

ความหนาของแผ่นเหล็ก	2 ม.m.
ขนาดของนักเกต	$>5.7$ ม.m.
แรงดึงเฉือน	$>9.4$ กิโลนิวตัน
อัตราการซึมลึก	$>20\%$

- ทดสอบอายุการใช้งานของหัวเชื่อม เนื่องด้วย Fukumoto et. al. (2004) [9] กล่าวว่า วิธีการตรวจสอบการเชื่อมสภาพ ของหัวเชื่อมจากพื้นที่ระหว่างหน้าสัมผัส ของหัวเชื่อมกับเหล็กแผ่น เป็นวิธีการตรวจสอบที่มีความเหมาะสมสมมำกที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าว เป็นการศึกษาอายุการใช้งานของหัวเชื่อม โดยอาศัยการวัดน้ำหนักที่สุด ดังนั้น ในที่นี้จึงได้ทำการเชื่อมแบบต่อเนื่องบนเหล็กแผ่น ที่ประกอบกันสองแผ่น แล้วให้พนักงานสังเกตการเสียรูปทรงของหัวเชื่อมจากลักษณะความไม่กลมของรอยเชื่อม ที่ต่อเนื่องบนชิ้นงาน โดยลดเวลาในการเชื่อมลงครึ่งละ 2 ไซเคิล เริ่มจากการปรับลดจากค่าที่บริษัทกำหนด (30 ไซเคิล) เป็นต้นไป เช่น ปรับลดเป็น 28 ไซเคิล แล้วเชื่อมจนกระทั้ง สังเกตเห็นความไม่กลมของรอยเชื่อมบนเหล็กแผ่น (หัวเชื่อมเสื่อมสภาพ) ให้หยุดเชื่อม บันทึกจำนวนที่เชื่อมได้ แต่เนื่องจากโรงงานนำหัวเชื่อมที่ใช้แล้วไป

ปรับแต่งแล้วนำกลับมาใช้ใหม่อีก 1 ครั้ง จึงได้นำหัวเขื่อมที่ปรับแต่งนั้นกลับมาเชื่อมอีกรัง จนหัวเขื่อมเลื่อนสภาพบันทึกจำนวนจุดที่เชื่อมได้หลังนำกลับมาใช้ใหม่ จากนั้นทำการทดสอบต่อไปในทำนองเดียวกัน โดยลดเวลาในการเชื่อมไปอีกรังละ 2 ไซเกลิ ทั้งนี้ในระหว่างทำการทดสอบหากพบปัญหาในการเชื่อม จะต้องหยุดเชื่อมทันที

## 2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

- การวิเคราะห์คุณภาพของชิ้นงาน

1) วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยการตัดขวาง โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดนักเกต และอัตราการซึมลึกเมื่อปรับลดเวลาในการเชื่อม แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของลูกค้า

2) วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงเฉือน เมื่อได้ข้อมูลแรงดึงเฉือน ที่เวลาในการเชื่อมต่างๆแล้ว วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงดึงเฉือนเมื่อปรับลดเวลาในการเชื่อมลง และนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของลูกค้าจากนั้น จึงนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทาง (Two-Way Analysis of Variance) เพื่อทดสอบว่า เวลาในการเชื่อมที่แตกต่างกัน จะทำให้แรงดึงเฉือน

ตารางที่ 4 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิต	สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต
1. ค่าวัสดุ - ต้นทุนหัวเชื่อมคล่อง ( $\Delta Ce$ ) : จำนวนหัวเชื่อมที่ลอดลง ( $\Delta Qe$ )	$\Delta Ce = \Delta Qe \times Pe$ บาท/เดือน $\Delta Qe = [(Pm \times pt)/n]_{\text{ก้อน}} - [(Pm \times pt)/n]_{\text{หลัง}}$ หัว/เดือน
2. ค่าแรงงาน - ต้นทุนแรงงานในการเชื่อมคล่อง ( $\Delta Cl$ ) - ต้นทุนแรงงานในการปรับแต่งหัวเชื่อมคล่อง ( $\Delta Ca$ ) : เวลาในการเชื่อมที่ลอดลง ( $\Delta tw$ ) : เวลาในการปรับแต่งหัวเชื่อมที่ลอดลง ( $\Delta ta$ )	$\Delta Cl = \Delta tw \times s / (8 \times 60 \times 60)$ บาท/เดือน $\Delta Ca = \Delta ta \times s / (8 \times 60 \times 60)$ บาท/เดือน $\Delta tw = Pm \times pt \times (t_1 - t_2) / f$ วินาที/เดือน $\Delta ta = ta \times \Delta Qe \times 60$ วินาที/เดือน
3. ค่าไฟฟ้า - ต้นทุนค่าไฟฟ้าลอดลง ( $\Delta EPC$ ) : พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมคล่อง ( $\Delta W$ )	$\Delta EPC = \Delta W \times Pel$ บาท/เดือน $\Delta W = I \times V \times \Delta tw / (60 \times 60)$ กิโลวัตต์ชั่วโมง/เดือน

$Pe$  = ราคาหัวเชื่อม (บาท/หัว);  $Pm$  = ยอดผลิตต่อเดือน (ชิ้น/เดือน);  $pt$  = จำนวนจุดที่เชื่อมบนชิ้นงานหนึ่งชิ้น (จุด/ชิ้น)  $n$  = จำนวนจุดที่เชื่อมໄດ້ต่อหัวเชื่อมหนึ่งหัว (จุด/หัว);  $s$  = ค่าแรงงาน (บาท/วัน);  $t_1$  = เวลาในการเชื่อมก่อนปรับลดเวลาในการเชื่อม (ไซเกลิ/จุด);  $t_2$  = เวลาในการเชื่อมหลังปรับลดเวลาในการเชื่อม (ไซเกลิ/จุด);  $f$  = ความถี่ไฟฟ้า (Hz);  $t_a$  = เวลาในการปรับแต่งหัวเชื่อม (นาที/หัว);  $Pel$  = ค่าไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง);  $I$  = กระแสไฟฟ้า (กิโลแอมป์);  $V$  = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์); พนักงานทำงานวันละ 8 ช.ม. =  $8 \times 60 \times 60$  วินาที;

แตกต่างกันหรือไม่ และหากพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่เวลาในการเชื่อมต่างกัน จึงจะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแรงดึงเฉือนที่เวลาในการเชื่อมต่างๆด้วยวิธี Tukey's Multiple Comparison Test ( $P\text{-value} < 0.05$ ) ซึ่ง Annoni และ Carboni (2011) [10] ได้ใช้วิธีเดียวกันนี้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดึงเฉือนเมื่อทำการเพิ่มระดับแคมป์ลิกูดของการสั่นสะเทือน ในงานเชื่อมโลหะด้วยอุตสาหกรรม

3) วิเคราะห์อายุการใช้งานของหัวเชื่อม ซึ่งได้จากการสังเกตลักษณะความไม่ก่อมของรอยเชื่อมแบบต่อเนื่องบนชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบจำนวนจุดที่เชื่อมได้จากการทดสอบทั้งหมดทั้งก่อนและหลังการนำหัวเชื่อมกลับมาใช้ใหม่เมื่อทำการทดสอบปรับลดเวลาในการเชื่อม

- การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

เก็บข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตแล้ววิเคราะห์ต้นทุนการผลิตด้วยสมการต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

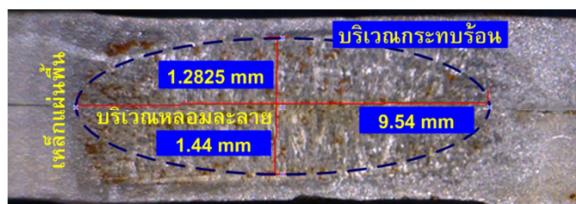
$Ce$  = ตันทุนหัวเชื่อม;  $Qe$  = จำนวนหัวเชื่อม;  $Cl$  = ตันทุนแรงงานในการเชื่อม;  $Ca$  = ตันทุนแรงงานในการปรับแต่งหัวเชื่อม;  $EPC$  = ตันทุนค่าไฟฟ้า;  $W$  = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม;

### 3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของชิ้นงาน

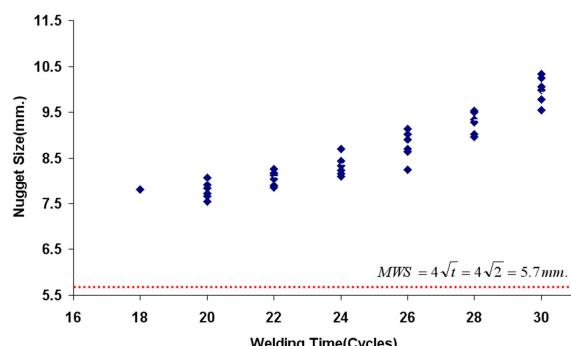
##### 1) ผลการวิเคราะห์การทดสอบด้วยการตัดขวาง

ขนาดของนักเก็ตได้จากผลการทดสอบด้วยการตัดขวาง โดยวัดรอยเชื่อมในแนวนอน ส่วนระยะซึมลึกจะวัดในแนวตั้งด้วยกล้องไมโครสโคปโดยไม่รวมส่วนของบริเวณกระทบร้อน (Heat-Affected Zone) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการทดสอบด้วยการตัดขวาง

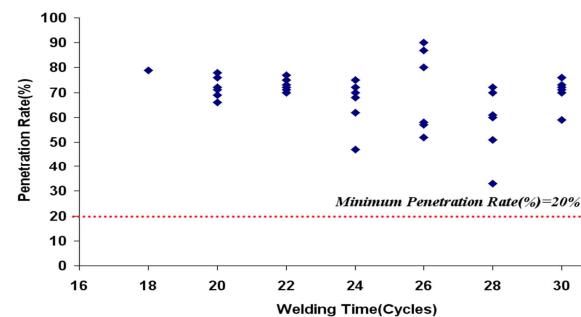
จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าขนาดของนักเก็ตที่ได้คือ 9.54 ม.m. มีระยะซึมลึก 1.2825 ม.m. เมื่อคำนวณอัตราการซึมลึกจะมีค่าเท่ากับ 64% หรือ  $(1.2825 \div 2) \times 100\%$  (เหลือเพ่นมีความหนา ( $t$ ) = 2 ม.m.) สำหรับขนาดของนักเก็ตที่เวลาในการเชื่อมอื่นๆสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลของเวลาในการเชื่อมต่อขนาดนักเก็ต

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าขนาดนักเก็ตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการเชื่อมลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Pouranvari (2011) [4] แต่ยังไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ (Minimum Weld Size, MWS =  $4\sqrt{t}$ ) ซึ่ง

ถือว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า [8] อย่างไรก็ตามที่เวลาในการเชื่อมเท่ากับ 18 ไซเคิล เชื่อมได้เพียงชิ้นเดียวและต้องหยุดทำการทดลอง เนื่องจากชิ้นงานติดหัวเชื่อม

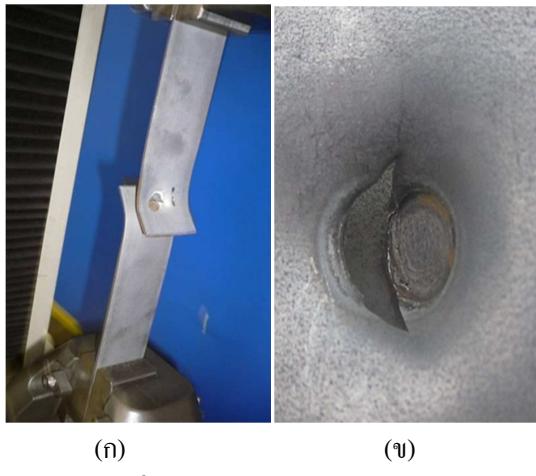


รูปที่ 4 ผลของเวลาในการเชื่อมต่ออัตราการซึมลึก

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า อัตราการซึมลึกในช่วงเวลาในการเชื่อมระหว่าง 18 ถึง 30 ไซเคิล ยังมีค่าเกินกว่าอัตราการซึมลึกต่ำสุดที่ยอมรับได้ (Minimum Penetration Rate) ซึ่งถือว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า [8]

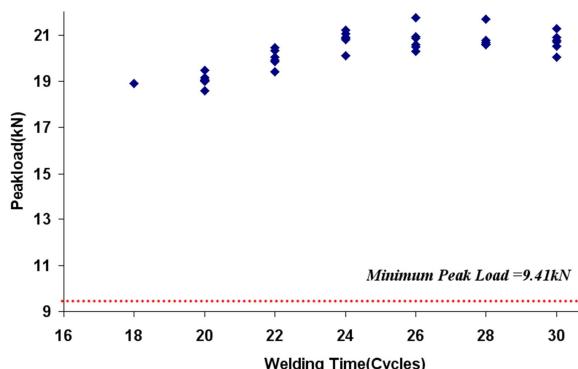
##### 2) ผลการวิเคราะห์การทดสอบแรงดึงเฉือน

การทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงาน ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 5 มีความแตกต่างจากการทดสอบวัสดุเนื้อเดียวกันทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจาก ชิ้นงานเป็นแบบต่อเกยชิ้ง ไม่ใช้วัสดุเนื้อเดียวกันดังนั้น จึงพิจารณาให้รอยเชื่อมเท่ากับวัสดุหนึ่งหน่วย และเปลี่ยนการพิจารณาความแข็งแรงของรอยเชื่อม จากความเต็ม (Stress) ไปเป็นแรงสูงสุด (Peak Load) [11] ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า [8] ด้วย



รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึงเนื่อง

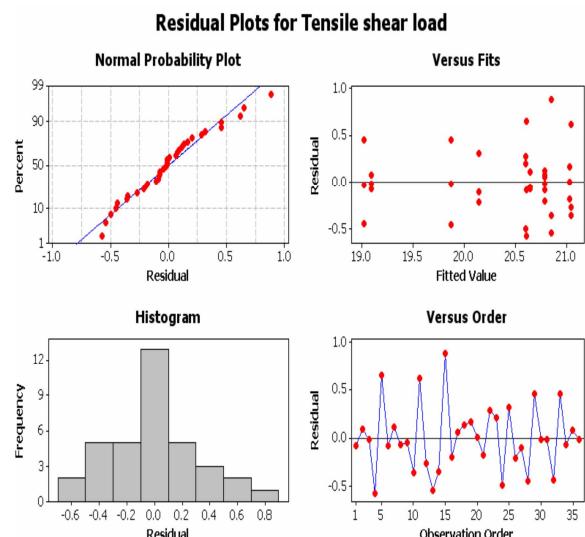
จากรูปที่ 5(ก) จะเห็นได้ว่า เหล็กแผ่นทั้งสองชิ้น ได้เกิดการเสียรูปไปแล้ว โดยที่รอยเชื่อมยังสามารถยืดเหล็กแผ่นชิ้นบนกับชิ้นล่างเอาไว้ได้ ในขณะที่รอยเชื่อมยังมีลักษณะเป็นวงกลมเหมือนเดิม ดังรูปที่ 5(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รอยเชื่อมที่ได้จากการทดสอบปรับลดเวลาในการเชื่อมในครั้งนี้ มีความแข็งแรงกว่าเหล็กแผ่นพิเศษ พิเศษ สำหรับต่อแรงดึงเนื่องที่เวลาในการเชื่อมต่างๆ แสดงได้ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลของเวลาในการเชื่อมต่อแรงดึงเนื่อง

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า เมื่อลดเวลาในการเชื่อมลง แรงดึงเนื่องจะลดลง (เข่นเดียวกันกับขนาดนักเก็ตที่ลดลง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pouranvari (2011) [4] แต่ยังมีค่าสูงกว่าแรงดึงเนื่องต่ำสุดที่ขอมรับได้ (Minimum Peak Load) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกท้า [8]

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงดึงเนื่อง เมื่อจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเงื่อนไขในการเชื่อม (ดังแสดงในตารางที่ 2) ซึ่งบริบทอาจอนุญาตให้ปรับเปลี่ยนได้เฉพาะเวลาในการเชื่อม และเมื่อจากมีการทดลองเป็นจำนวนมากและต้องใช้เวลานาน ดังนั้น จึงให้พนักงานกะที่หนึ่ง เชื่อมชิ้นงานไปก่อนส่วนหนึ่ง ส่วนที่เหลือให้พนักงานจากกะที่สองเชื่อมต่อไป ดังนั้น จึงได้เลือกวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงดึงเนื่อง โดยกำหนดให้เวลาในการเชื่อม คือ ปัจจัยที่ระดับต่างกัน หรือวิธีปฏิบัติ (Treatment) ส่วนปัจจัยกลุ่ม (Block) คือ พนักงานจากแต่ละกะ อย่างไรก็ตาม ก่อนทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแรงดึงเนื่อง ควรจะตรวจสอบข้อกำหนดเบื้องต้นก่อน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ค่าคงเหลือ (Residual Analysis) ของแรงดึงเนื่อง

จากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาจากรูปด้านซ้ายบน พบว่า ค่าคงเหลือมีลักษณะการกระจายเป็นแบบปกติ โดยมีจุดส่วนใหญ่อยู่ใกล้กับเส้นตรง แต่มีจุดที่ส่วนปลายเส้นตรงเพียง 2 จุดที่อาจจะมีปัญหาอยู่บ้างเมื่อพิจารณารูปด้านขวาบน พบว่า ค่าคงเหลือมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ส่วนรูปด้านขวาล่าง จะเห็นได้ว่าค่าคงเหลือเป็นอิสระต่อกันนั่นคือ การเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างสุ่ม

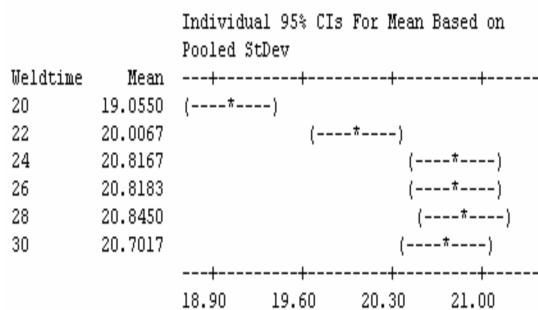
เมื่อตรวจสอบข้อกำหนดเบื้องต้นแล้วจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงดึงเฉือน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 8

จากรูปที่ 8 (ส่วนบน) เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากการกระทำร่วมกัน (Interaction) จะเห็นได้ว่าไม่มีการกระทำร่วมกันระหว่างพนักงาน (Employee) กับเวลาในการเชื่อม (Weld Time) อย่างมีนัยสำคัญที่ค่า  $\alpha = 0.05$  ( $P\text{-value} = 0.595$ ) หรือปัจจัยทั้งสองไม่ขึ้นอยู่ต่อกัน และเมื่อพิจารณาจากอิทธิพลหลัก พบว่า ค่า  $P\text{-value} = 0.00$  ดังนั้นเวลาในการเชื่อมจึงมีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญที่ค่า  $\alpha = 0.05$  ส่วนพนักงานไม่มีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญที่ค่า  $\alpha = 0.05$

#### Two-way ANOVA: Tensile shear load versus Weldtime, employee

Source	DF	SS	MS	F	P
Weldtime	5	15.5837	3.11674	18.36	0.000
employee	1	0.0544	0.05444	0.32	0.576
Interaction	5	0.6349	0.12698	0.75	0.595
Error	24	4.0732	0.16972		
Total	35	20.3463			

$$S = 0.4120 \quad R-Sq = 79.98\% \quad R-Sq(adj) = 70.81\%$$



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงดึงเฉือน

( $P\text{-value} = 0.576$ ) เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือนที่เวลาในการเชื่อมต่างๆ กัน ซึ่งมีอยู่ทั้งหมดเท่ากับ  $6(6-1)/2 = 15$  คู่ [12] ด้วยวิธี Tukey's Multiple Comparison Test ( $P\text{-value} < 0.05$ ) พบว่าผลการเปรียบเทียบตรงกันกับรูปที่ 8 (ส่วนล่าง) คือเวลาในการเชื่อม ตั้งแต่ครึ่งชั่วโมง 24 ไซเคิลถึง 30 ไซเคิล รวม 6 คู่ มีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนที่เหลืออีก 9 คู่มิอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ เราสามารถปรับลดเวลาในการเชื่อม (จากเดิมคือ 30 ไซเคิล) ลงได้ถึง 24 ไซเคิล โดยไม่ทำให้แรงดึงเฉือนแตกต่างไปจากเดิม นอกจากนี้ ค่าแรงดึงเฉือนที่เวลาในการเชื่อมต่างๆ ยังมีค่าสูงกว่าค่าแรงดึงเฉือนต่ำสุดที่กำหนดโดยลูกค้าอีกด้วย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การทดสอบแรงดึงเฉือนที่ได้นี้จะนำไปใช้ประกอบในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อไป

#### 3) ผลการวิเคราะห์การทดสอบอายุการใช้งานของหัวเชื่อม

อายุการใช้งานหัวเชื่อมสามารถสังเกตจากความผิดปกติของรอยเชื่อม เช่น รอยเชื่อมไม่กลมหรือรูระนาบ รอยเชื่อมบนผิวชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่ารอยอย่างเชื่อมที่จำนวนเท่ากับ 211 จุด เป็นรูปวงรีและรอยกดมีรูระนาบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งของหัวเชื่อมเมี่ยงเบนออกจากจุดศูนย์กลาง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Fukumoto et. al. (2004) [9] ที่พบว่าในระยะแรกที่ทำการเชื่อม รอยเชื่อมบางคงมีลักษณะกลมและหัวเชื่อมขังอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง แต่เมื่อเชื่อมเป็นจำนวนที่มากขึ้น รอยเชื่อมจะกลายเป็นรูปวงรี และตำแหน่งของหัวเชื่อมจะเบี่ยงเบนออกจากจุดศูนย์กลาง ซึ่ง ณ จุดนี้ พนักงานจะหยุดเชื่อม และบันทึกจำนวนจุดที่เชื่อมได้ทั้งหมดบนชิ้นงาน



รูปที่ 9 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมจนกระแท้หัวเชื่อม เริ่มเปลี่ยนรูปทรงที่เวลาในการเชื่อม 26 ไซเคิล

สำหรับจำนวนจุดที่เชื่อมได้ที่เวลาในการเชื่อมอี่นๆ แสดงได้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 จำนวนจุดที่เชื่อมได้มีเมื่อปรับลดเวลาในการเชื่อม ก่อนและหลังการนำหัวเชื่อมกลับมาใช้ใหม่

เวลาในการเชื่อม	จำนวนจุดก่อนนำกลับมาใช้ใหม่	จำนวนจุดหลังนำกลับมาใช้ใหม่
30 cy.	148	306
28 cy.	189	370
26 cy.	211	429
24 cy.	225	456
22 cy.	247	450
20 cy.	268	530

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า เมื่อลดเวลาในการเชื่อมลง จำนวนจุดที่ได้ในการเชื่อม (อายุหัวเชื่อม) จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดเวลาในการเชื่อม ทำให้ความร้อนสะสมในหัวเชื่อมลดลงจึงทำให้เชื่อมได้มากขึ้น และเนื่องจากบริษัทฯ มีการนำหัวเชื่อมไปปรับแต่งและนำกลับมาใช้ใหม่อีก 1 ครั้ง ดังนั้น ที่เวลาในการเชื่อมเท่ากับ 26 ไซเคิล เมื่อนำหัวเชื่อมไปปรับแต่งจะทำให้เชื่อมได้เพิ่มขึ้นเป็น 429 จุด

### 3.2 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตหลังจากการปรับลดเวลาในการเชื่อม

ถ้าตัดสินใจลดเวลาในการเชื่อมไปที่ 24 ไซเคิล ดังนั้น เวลาในการผลิตลดลง  $(30-24)/50 = 0.12$  วินาที/จุด จากผลการสำรวจ พบว่า พนักงานทำงานวันละ 8 ช.ม. ค่าแรงเฉลี่ย 300 บาท/วัน กระแสไฟฟ้า 15 kA แรงดันไฟฟ้าขั้นเรื่อง 8V ค่าไฟฟ้า 3.39 บาท/หน่วย การปรับแต่งและการติดตั้งหัวเชื่อมใช้เวลา 20 นาที/หัว การเชื่อมสายรัดลังน้ำมัน 1 ชิ้น ต้องเชื่อมเป็นจำนวน 4 จุด/ชิ้น ยอดผลิตโดยเฉลี่ย 25, 139 ชิ้น/เดือน เมื่อคำนวณด้วยสมการในตารางที่ 4 ต้นทุนการผลิตจะลดลงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ต้นทุนการผลิตที่ลดลง (บาท/เดือน)

ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิต	จำนวนเงิน
1. ค่าวัสดุ (หัวเชื่อม)	4,229
2. ค่าแรงงานในการเชื่อม	126
3. ค่าแรงงานในการปรับแต่งหัวเชื่อม	1,362
4. ค่าไฟฟ้า	1,364
รวม	7,081

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า ต้นทุนการผลิตจะลดลงรวมทั้งสิ้น 7,081 บาท/เดือนหรือ 84,972 บาท/ปี

## 4. สรุป

เมื่อทดลองปรับลดเวลาในการเชื่อมลง พบว่าขนาดนักเก็ต อัตราการซึมลึกและแรงดึงฉีดเฉือน ยังมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า และหลังจากทดสอบ อายุการใช้งานของหัวเชื่อม พบว่า อายุการใช้งานของหัวเชื่อมเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงดึงเฉือน พบว่าเวลาในการเชื่อมจะมีอิทธิพลต่อแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ ที่ค่า  $\alpha = 0.05$  โดยเวลาในการเชื่อมที่ 20 และ 22 ไซเคิล จะมีค่าแรงดึงเฉือนแตกต่างจากเวลาในการเชื่อมอี่นๆ ส่วนที่เวลาในการเชื่อมตั้งแต่ 24 จนถึง 30 ไซเคิล ไม่ทำให้แรงดึงเฉือนแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การปรับลดเวลาในการเชื่อมไปอยู่ที่ 24 ไซเคิล ถือว่ามีความเหมาะสมที่สุด เพราะว่าใช้ระยะเวลาในการเชื่อมน้อยที่สุด โดยไม่ทำให้ค่าแรงดึงเฉือนแตกต่างจากเวลาในการเชื่อมเดิมของบริษัทฯ (30 ไซเคิล) โดยที่ขนาดนักเก็ตและอัตราการซึมลึก ยังมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของลูกค้า และทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง 84,972 บาท/ปี

## 5. ข้อเสนอแนะ

ควรนำผลการวิจัยที่ได้เนี้ยไปประยุกต์กับสายรัดลังน้ำมันรุ่นอี่นๆ เช่น TMT-903, TMT-921, TMT-922, TMT-924, TMT-926, TMT-973 และ TMT-981

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถานที่ทำการทดลองจาก  
บริษัท ยานภัณฑ์ จำกัด (มหาชน)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท อิมเมจ คอนซัลแทนท์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด (2549). *Cost Down การลดต้นทุน*, กรุงเทพฯ: บริษัท แอคเม่ พринติ้ง จำกัด.
- [2] Silva, C.R., Ferraresi, V.A. and Scotti, A. (2000). A Quality and Cost Approach for Welding Process Selection, *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, Vol. 22(3), pp. 389-398.
- [3] Kelly S. M., Brown S. W., Tressler J. F., Martukanitz R. P. and M. J. Ludwig. (2009). Using Hybrid Laser Arc Welding to Reduce Distortion Ship Panels, *Welding Journal*, vol. 88(3), pp. 32–36.
- [4] Pouranvari, M. (2011). Effect of Welding Parameters on the Peak Load and Energy Absorption of Low-Carbon Steel Resistance Spot Welds, *ISRN Mechanical Engineering*, 2011: Article ID 824149. 7 pages. doi:10.5402/2011/824149.
- [5] Cook, D.C. (1990). Zinc-Iron Phases Formed on Galvannealed Steel, *Hyperfine Interactions*, vol.54, pp. 781-786.
- [6] Kishida, K. (2000). High Strength Steel Sheets for Light Weight Vehicle, *Nippon Steel Technical Report*, No.81.
- [7] Zhou, M., Hu, S.J. and Zhang, H. (1999). Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets, *Weld. J. (Miami)*, Vol.78(9), pp. 305–312.
- [8] Toyota Motor Corporation. (2007). *Toyota Engineering Standard TSH5600G Spot Welding*.
- [9] Fukumoto, S., Lum, I., Biro, E., Boomer, D.R. and Zhou, Y. (2004). Effects of Electrode Degradation on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy 5182, *Metallurgical and Materials transaction A*, vol.35A, pp. 217–225.
- [10] Annoni, M. and Carboni, M. (2011). Ultrasonic Metal Welding of AA6022 T4 Lapjoints: Part I Technological Characterisation and Static Mechanical Behaviour, *Scien. & Tech. Weld. & Join*, vol.16, pp 107-115.
- [11] Zhang, H. and Senkara, J. (2006). *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, CRC Press Taylor and Francis Group, New York.
- [12] Levine, D.M. Ramsey, P.P. and Smidt, R.K. (2001). *Applied Statistics for Engineers and Scientists Using Microsoft Excel and MINITAB*, Prentice-Hall, USA.