

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย โดยในที่นี่จะแบ่งทฤษฎีออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และส่วนที่สองเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

2.1 ทฤษฎีการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย Elihu Thomson ในปี ค.ศ. 1877 และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปี ค.ศ. 1880 และได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมาใช้ในการเชื่อม Nuts Weld ในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมได้มาจากความต้านทานกระแสที่ไหลผ่านชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานที่ผิวสัมผัสกันนั้นเกิดการหลอมละลาย ในขณะที่เดียวกันแรงกดจากอิเล็กโทรดจะทำให้ชิ้นงานติดกัน ซึ่งขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อมความต้านทานจะถูกควบคุมด้วยขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตรงส่วนที่แนบสนิทกัน

หลักการเชื่อม Nuts ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ ซึ่งการเชื่อม Spot Nuts นั้นประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- 1) ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน
- 2) แรงที่ใช้กดชิ้นงาน
- 3) เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน
- 4) พื้นที่ปลายอิเล็กโทรดที่สัมผัส Nuts Spot กับชิ้นงาน

ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 4 ปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของการเชื่อม Nuts ติดกับชิ้นงาน กระแสเชื่อมได้มาจากหม้อแปลงหรือหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ ซึ่งหม้อแปลงทั้งสองชนิดทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง (กระแสต่ำ) เป็นกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำ (กระแสสูง) ในส่วนของคาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เก็บรวบรวมกระแสเชื่อมจนเพียงพอต่อการใช้ในแต่ละครั้ง เครื่องเชื่อมชนิดนี้ใช้หม้อแปลงขนาดเล็ก สำหรับแรงกดที่อิเล็กโทรดใช้ระบบนิวเมตริกหรือระบบไฮดรอลิกส์ การเชื่อม Nuts ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ไม่จำเป็นต้องใช้ฟลักซ์ และลดเดิมในการเชื่อม Nuts โดยกระแสไฟฟ้านั้นจะไหลผ่านชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานเชื่อมเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ปริมาณความร้อนสูงสุดจะเกิดที่จุดที่มีความต้านทานสูงสุด คือ บริเวณที่ผิวสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานเชื่อม การเชื่อมต้องใช้แรงกดให้ชิ้นงานติดกัน แล้วจึงปล่อยกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงแต่แรงดันต่ำไหลผ่านจนเกิดความร้อนจนกระทั่งโลหะบริเวณที่มีความต้านทานหลอมละลายติดกัน การกดชิ้นงานให้ติดกันจะต้องกระทำก่อน และหลังกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน ซึ่งการกดชิ้นงานจะต้องค้างไว้จนกว่ารอยเชื่อมเย็นตัวและแข็งแรงพอที่ยึดเหนี่ยวกันได้

การเชื่อมแบบความต้านทาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในวงจรนั้นใช้กฎของโอห์ม ดังนี้

$$I = E/R \text{ หรือ } R = E/I \text{ หรือ } E = I \times R \quad (2.1)$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

E = แรงดันไฟฟ้า (โวลท์)

R = ความต้านทานของวัสดุงาน (โอห์ม)

พลังงานทั้งหมด แสดงด้วยสูตรทางความร้อน

$$H = I \times E \times T \quad (2.2)$$

เมื่อ T = เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (วินาที) ซึ่งเมื่อรวมสองสูตรเข้าด้วยกันจะได้สูตรดังนี้

$$H \text{ (พลังงานความร้อน)} = I^2 \times R \times T \quad (2.3)$$

ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วต้องมียอดประกอบเกี่ยวกับการสูญเสียความร้อนรวมอยู่ด้วย โดยจะมีสูตรดังนี้

$$H \text{ (พลังงานความร้อน)} = I^2 \times R \times T \times K \quad (2.4)$$

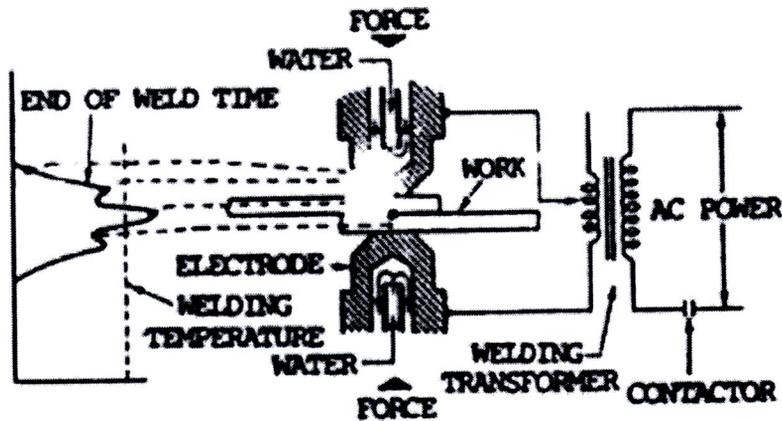
เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R = ความต้านทานของวัสดุงาน (โอห์ม)

T = เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (วินาที)

K = ความร้อนที่สูญเสีย เนื่องจากการแผ่และการนำ

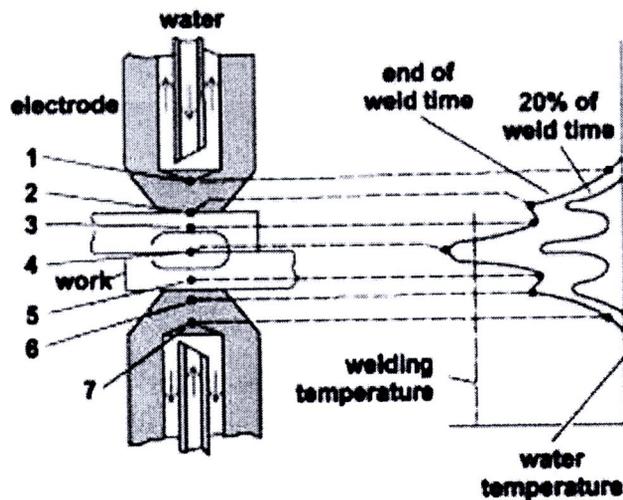
H = พลังงานความร้อน (จูล/วินาที)



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานเครื่องเชื่อมความต้านทาน

เครื่องเชื่อมความต้านทานประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วน ได้แก่

- 1) ระบบกลไกคดงานและหัวเชื่อม
- 2) ระบบวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ คาปาซิเตอร์ที่ปรับกระแสเชื่อม และวงจรป้องกันกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานเชื่อม
- 3) ระบบควบคุมเวลา



รูปที่ 2.2 การกระจายอุณหภูมิและการเกิดความต้านทานในตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งที่ 1 และ 7 เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

ตำแหน่งที่ 2 และ 6 เป็นความต้านทานหน้าสัมผัสของผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมกับผิวหน้าอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความร้อนมาก ซึ่งสาเหตุที่ผิวหน้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่หลอมละลายเนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ทำด้วยทองแดงซึ่งระบายความร้อนได้ดีและมีน้ำระบายความร้อน ซึ่งความต้านทานที่

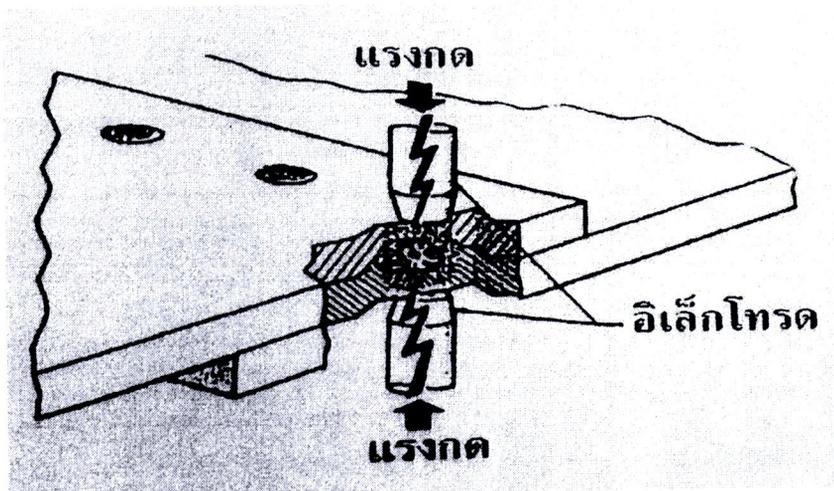
ตำแหน่งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพผิวอิเล็กทรอนิกส์โทรดและสภาพผิวงานที่สัมผัส เช่น ขนาด รูปร่างหน้าตัดและแรงกดอิเล็กทรอนิกส์โทรด

ตำแหน่งที่ 3 และ 5 เป็นความต้านทานของโลหะชิ้นงานเชื่อม

ตำแหน่งที่ 4 เป็นความต้านทานของผิวโลหะงานที่นำมาเชื่อมต่อกันเป็นจุดที่เกิดความต้านทานและความร้อนสูงสุดและเป็นจุดที่เชื่อมติดกันจะเห็นว่าการเชื่อมแบบความต้านทานความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นพร้อมกันหลายๆจุด ขึ้นอยู่กับความต้านทานของจุดนั้นๆ โดยที่จุดสัมผัสของผิวหน้างานตำแหน่ง 4 เกิดความร้อนสูงสุดอย่างรวดเร็ว ตำแหน่ง 2 และ 6 มีความต้านทานต่ำกว่าจึงเกิดความร้อนได้ช้ากว่า

2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding)

การเชื่อมแบบความต้านทานแบบจุดเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้กันมากในกรรมวิธีของการเชื่อมแบบความต้านทาน ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมได้จากความต้านทานของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานที่สัมผัสกันนั้นหลอมละลาย ในขณะที่เดียวกันแรงกดจากอิเล็กทรอนิกส์โทรดจะทำให้ชิ้นงานติดกัน ซึ่งขนาด และรูปร่างของรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้นจะถูกควบคุมด้วยขนาดและรูปร่างส่วนโค้งงอของอิเล็กทรอนิกส์โทรด



รูปที่ 2.3 ผลของความร้อนที่เกิดจากความต้านทานของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นงานที่ยึดติดกันด้วยแรงกดอิเล็กทรอนิกส์โทรดแล้วเกิดการหลอมละลายติดกันในขณะทำการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ประกอบด้วยหม้อแปลงที่ลดแรงดันจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำประมาณ 4-25 โวลต์ ชุดควบคุมกระแสไฟฟ้าเชื่อม ชุดควบคุมเวลาและระบบกลไกชิ้นงาน

การทำการเชื่อมชิ้นงานโดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีขั้นตอน ดังนี้

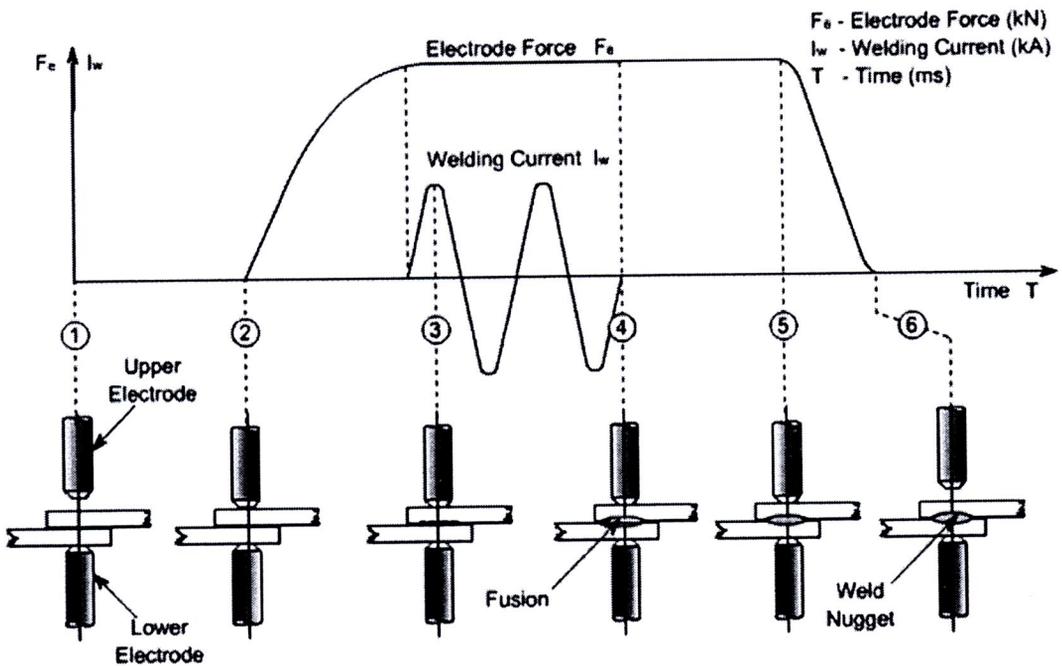
1. ทำความสะอาดของผิวงานบริเวณรอยเชื่อม

2. นำชิ้นงานที่จะเชื่อมนั้นประกอบวางไว้ให้ได้ตำแหน่งไว้ระหว่างปลายอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ในการผลิตงานจำนวนมาก จำเป็นต้องใช้เครื่องมือจับยึดช่วยในการจับชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมจุด โดยผิวหน้างานเชื่อมนั้นต้องขนานกับหน้าสัมผัสของปลายอิเล็กโทรด

3. เริ่มทำการเชื่อมโดยใช้เท้าเหยียบสวิตช์หรือคันเหยียบ

4. อิเล็กโทรดจะสัมผัสและกดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองให้สัมผัสกันพอดี

เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นแล้วเพียงพอต่อการใช้งาน เรียกว่า กดงาน (Squeeze Time) เป็นช่วงที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน และเกิดความร้อนจนทำให้โลหะหลอมละลาย ในช่วงที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนี้เรียกว่า เวลาเชื่อม (Welding Time) โดยทั่วไปแล้วเวลาเชื่อมจะน้อยกว่า 1 วินาที หลังจากนั้นเป็นการกดแช่ (Hold หรือ Forging Time) เป็นช่วงที่กดอิเล็กโทรดแช่ไว้จนกว่ารอยเชื่อมจะแข็งแรง หลังจากนั้นเป็นช่วงปลดแรงกดออก โดยการเคลื่อนอิเล็กโทรดและนำงานเชื่อมที่เสร็จแล้วออกจากเครื่องเชื่อม



รูปที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่องเชื่อม Nuts โดยเครื่องเชื่อมความต้านทาน

1) ลักษณะรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ลักษณะรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่ได้จากขั้นตอนการเชื่อมดังที่ได้กล่าวมานั้น แบ่งลักษณะรอยเชื่อมออกได้ 3 ส่วน ได้แก่

- ส่วนกลางเป็นส่วนที่ผิวหน้างานหลอมละลายติดกันมีโครงสร้าง Columnar คล้ายกับโครงสร้างการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยยื่นตัวเข้าหาเส้นรอยต่อของผิวหน้าสัมผัสของโลหะงาน
- ในชิ้นงานโลหะบริเวณโดยรอบรอยเชื่อม เป็นบริเวณที่เกิดเป็น Heat – Affected Zone
- ผิวด้านนอกของชิ้นงานโลหะงานเชื่อมจะเกิดรอยยุบเนื่องจากแรงกดของปลายอิเล็กโทรด โดยทั่วไปแล้วรอยยุบตัวจะยอมให้ได้ไม่เกิน 10% ของความหนาวัสดุ

2) องค์ประกอบเกี่ยวกับเวลา

การเชื่อมด้วยความต้านทานขึ้นอยู่กับความต้านทานของวัสดุและขนาดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานแล้วยังมีองค์ประกอบที่สำคัญเกี่ยวกับเวลาอีกด้วย การเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมจำนวนมากไหลผ่านชิ้นงานที่มีความต้านทานสูง จะเกิดความร้อนจำนวนมากในระยะเวลาสั้น การควบคุมเวลาที่ดียิ่งจะได้รอยเชื่อมจุดที่ดี

การควบคุมเวลาเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าให้เวลากระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานนานจนเกินไป จะทำให้ชิ้นงานหลอมละลายมากเกินไป เป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมเกิดรูแก๊สได้ และเนื้อโลหะบริเวณหลอมละลายจะถูกขับออกจากรอยเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมยุบตัวและทำให้รอยต่อไม่แข็งแรง เมื่อลดเวลาให้สั้นลงจะช่วยลดความร้อนบนชิ้นงานที่สูงเกินไปและลดการบิดงอของชิ้นงานอีกด้วย

3) แรงกด

แรงกดเป็นองค์ประกอบหลักของการเชื่อมแบบความต้านทาน จุดประสงค์ของการใช้แรงกด เพื่อกดผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงานที่จะเชื่อมให้ชิดสนิทกัน เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดไม่ได้ออกแบบให้มีหน้าที่จับชิ้นงานให้สนิทกันเหมือน C-Clamp ดังนั้นชิ้นงานก่อนที่นำมาเชื่อมจะต้องแต่งผิวหน้าให้สัมผัสกันดีเสียก่อน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสูงต้องใช้แรงกดน้อย ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมต่ำต้องใช้แรงกดมาก

4) ขนาดปลายอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดนั้นยอมให้กระแสไฟฟ้าเชื่อมไหลผ่านไปที่ชิ้นงานเชื่อม ปลายอิเล็กโทรดจะควบคุมขนาดของรอยเชื่อม ซึ่งขนาดของรอยเชื่อมจะเล็กกว่าขนาดปลายอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าหากปลายอิเล็กโทรดขนาดเล็กเกินไป ขนาดของรอยเชื่อมจะเล็กและไม่แข็งแรง แต่ถ้าปลายอิเล็กโทรดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานสูงอาจเกิดช่องว่างและโพรงแก๊สในรอยเชื่อมได้ จากเหตุผลทั้งสองกรณีจะทำให้รอยเชื่อมไม่สวยงามและคุณภาพไม่ดี

ขนาดความโตของรอยเชื่อมได้จากการออกแบบชิ้นส่วนที่จะเชื่อมขนาดความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน หาได้ดังนี้

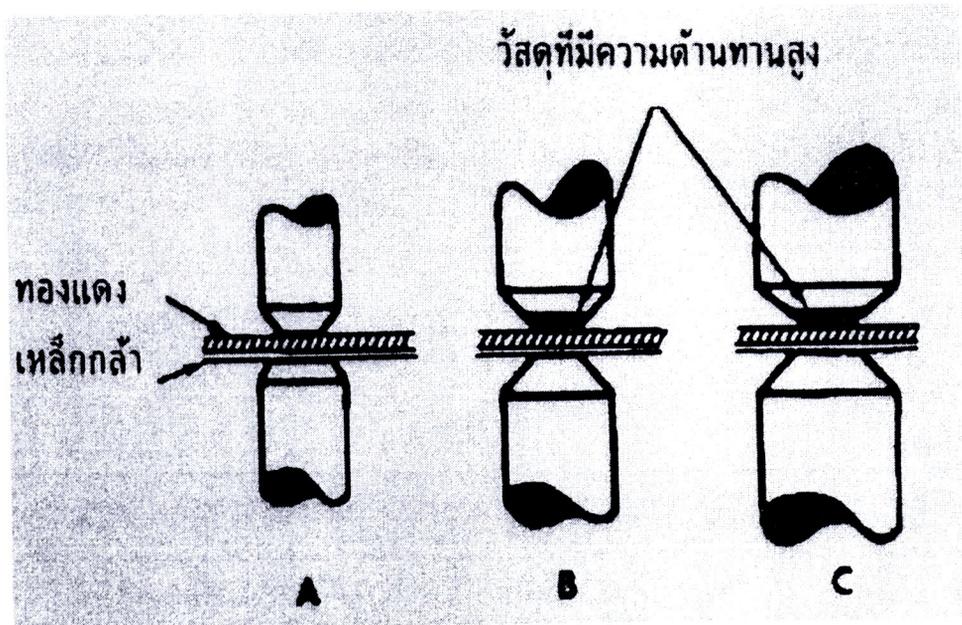
$$\text{ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.1'' + 2t$$

เมื่อ t คือ ความหนาของแผ่นงานที่นำมาเชื่อม (นิ้ว) ซึ่งสูตรนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาของชิ้นงานแตกต่างกัน

2.1.2 การสมมูลความร้อน

การเชื่อมวัสดุที่มีความหนาเท่ากันและชนิดเดียวกันนั้นจะไม่เกิดปัญหาในเรื่องการสมมูลความร้อนในงานเชื่อม เมื่อเชื่อมวัสดุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนที่ไม่เท่ากัน เช่น ทองแดงกับเหล็กกล้า จะทำให้เกิดความร้อนสูงที่แผ่นเหล็กกล้ามากกว่าแผ่นทองแดง เนื่องจากทองแดงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า และเป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่า การใช้สมมูลความร้อนในการเชื่อมโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี ดังรูปที่ 2.5 แสดงการสมมูลความร้อนทั้ง 3 วิธี มีดังนี้

- 1) ให้ปลายอิเล็กโทรดด้านแผ่นทองแดงมีขนาดเล็กกว่าจะทำให้เกิดสมบัตินการหลอมละลายเท่ากันเนื่องจากอิเล็กโทรดด้านแผ่นทองแดงมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่า
- 2) ปลายหัวอิเล็กโทรดทำด้วยวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง ได้แก่ ทังสเทนหรือโมลิบดีนัม
- 3) การนำเอาวิธีการ 1) และ 2) มาผสมกัน



รูปที่ 2.5 เทคนิคในการสมมูลความร้อน

ความสามารถในการเชื่อมด้วยความต้านทานขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ความหนาของโลหะ และการออกแบบรอยต่อ โลหะส่วนมากสามารถเชื่อมได้ด้วยการเชื่อมแบบความต้านทาน โลหะหนาจะเชื่อมได้ยาก โลหะบางชนิดต้องให้ความร้อนหลังเชื่อม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล ความสามารถในการเชื่อมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโลหะที่นำมาเชื่อม ดังนี้

- 1) ความต้านทานไฟฟ้า
- 2) การนำความร้อน
- 3) จุดหลอมละลายของโลหะ

จากองค์ประกอบในการบอกถึงความสามารถในการเชื่อมของโลหะเมื่อนำมารวมกันมีสูตรดังต่อไปนี้

$$W = \frac{Rx100}{FKt} \quad (2.5)$$

เมื่อ W = ความสามารถในการเชื่อม

R = ความต้านทานกระแสไฟฟ้า

F = จุดหลอมละลายของวัสดุ

Kt = ค่าคงที่ในการนำความร้อน ทองแดงมีค่าเท่ากับ 1.0

2.1.3 การให้ความร้อนกระจายตัว (Heat Dissipation)

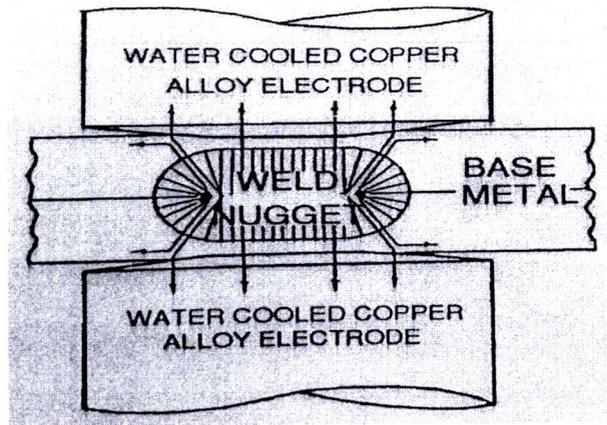
ในระหว่างการเชื่อมความร้อนจะสูญเสียไปยังส่วนที่ติดต่อกับเนื้อโลหะและอิเล็กโทรดซึ่งรูปที่ 2.6 ความร้อนจะกระจายตัวอย่างต่อเนื่องที่อัตราส่วนการแปรผันในระหว่างการใช้ประโยชน์จากกระแสไฟฟ้า และภายหลังการใช้เป็นปริมาณที่รอยเชื่อมซึ่งจะเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง สามารถจำแนกได้ 2 ขั้นตอนคือ

- 1) ในระหว่างเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม
- 2) หลังจากการหยุดใช้ชั่วคราวหรือหยุดถาวรของกระแสไฟฟ้า

การเกิดความร้อนภายใต้แรงกระทำจากกระแสไฟฟ้า เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ได้สัดส่วนจากคุณสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าของเนื้อโลหะ การเหนี่ยวนำความร้อนและอุณหภูมิของเนื้อโลหะที่กำหนด เป็นอัตราส่วนที่ความร้อนกระจายตัวออกหรือการปฏิบัติสำหรับตำแหน่งรอยเชื่อม ในกรณีส่วนมากอุณหภูมิและคุณสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าของโลหะจะคล้ายกัน

ในคุณสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าที่สูงของโลหะ เช่น ทองแดงและธาตุเงิน กระแสไฟฟ้าที่สูงมีความจำเป็นในการเชื่อม และการทดแทนความร้อนที่กระจายตัวอย่างรวดเร็วต่อเนื่องกันไปยังเนื้อโลหะและอิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง)

การเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่รอยเชื่อมเป็นสิ่งที่ดี แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดซึ่งเกี่ยวกับความสามารถในการเย็นตัวลงได้ทันทีของเหล็กผสม สามารถเป็นไปได้ตามปกติโดยการลดขนาดความเร็วของการกระจายความร้อนที่อิเล็กโทรด ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการลดความเร็วหรือการหน่วงอัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อม



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของรอยเชื่อม

2.1.4 อุปกรณ์ (Equipment)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด ประกอบด้วยอุปกรณ์เครื่องมือซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานด้วยกัน 3 ประการ คือ

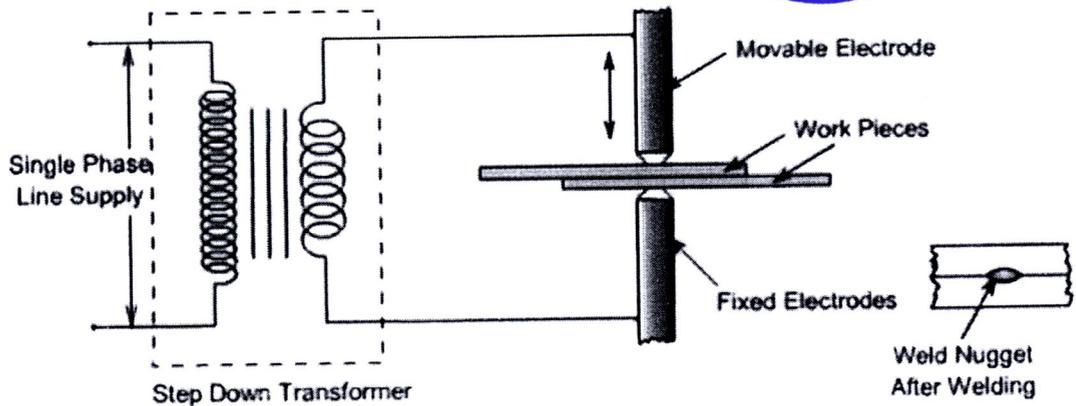
- 1) วงจรกระแสไฟฟ้า
- 2) การควบคุมอุปกรณ์
- 3) ระบบกลไก

1. วงจรกระแสไฟฟ้า (Electrical Circuit)

ประกอบด้วยวงจรการเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า อันดับแรก คือ การสัมผัส และอันดับสอง คือ ความต่อเนื่องของวงจรประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่จะนำกระแสเชื่อมไปที่ชิ้นงาน ในบางกรณีวิธีการเก็บสะสมพลังงานกระแสไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบเฉพาะในวงจรกระแสไฟฟ้าสลับที่เท่ากันและการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นความเกี่ยวข้องกับความต้านทานการเชื่อม เมื่อกลไกการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลง 60 Cycles ของกำลังงาน ไปถึงแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำและกระแสไฟฟ้าที่สูงในวงจรที่ต่อเนื่องของกลไกเชื่อม

ไฟฟ้าสลับ (Alternating Current)

ความต้านทานการเชื่อมบางส่วน เครื่องเชื่อมที่ให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับเพียงเฟสเดียว (AC) ของตะเข็บความถี่ตามเส้นกำลังงาน โดยปกติ 60 Cycles นี้เป็นการกำหนดกลไกของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียวภายใต้เงื่อนไขของความต้องการกระแสไฟฟ้าที่สูงและแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ ขึ้นอยู่กับความหนาและประเภทของวัสดุที่จะเชื่อม และกระแสไฟฟ้าอาจจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,000 ถึง 100,000 แอมแปร์



รูปที่ 2.7 วงจรเครื่องเชื่อมแบบเฟสเดียว

2. อุปกรณ์ควบคุม (Control Equipment)

การควบคุมการเชื่อมอาจจะต้องเตรียมการที่มีลักษณะสำคัญดังต่อไปนี้

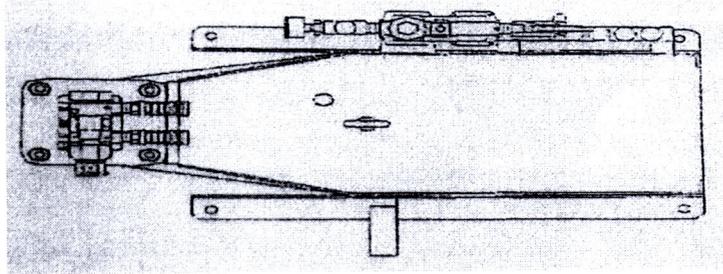
- 1) การเริ่มต้นและสิ้นสุดของกระแสไฟฟ้าจากเครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2) การควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้า
- 3) การปฏิบัติและเทคนิคการปล่อยกำลังของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับเวลา

3. ระบบกลไก (Mechanical Systems)

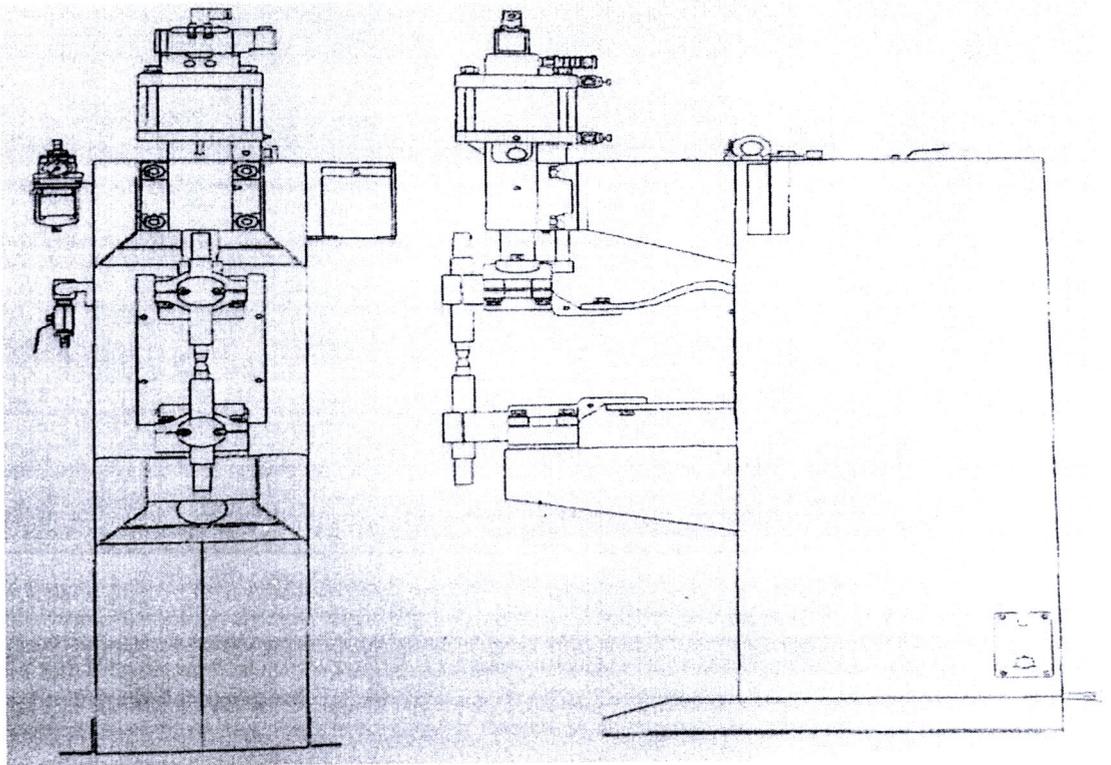
กลไกการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และการเชื่อมแบบโปรเจกชันมีองค์ประกอบที่เหมือนกันจากรูปแบบการทำงานของกลไก โดยอิเล็กทรอนิกส์จะเริ่มเข้าใกล้งานและถอยออกจางาน เนื่องจากการควบคุมเวลาและอัตราส่วนจากแรงอิเล็กทรอนิกส์เป็นการใช้ประโยชน์โดยไฮดรอลิกส์ นิวเมตริก แมกเนติก หรือวิธีการทางกล อัตราส่วนของอิเล็กทรอนิกส์เป็นความเร็วที่เริ่มเข้าใกล้ชิ้นงานจะมากขึ้น แต่จะถูกควบคุมแรงของอิเล็กทรอนิกส์นี้ไม่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปเนื่องจากการมีการเป่าที่กระทำอยู่โดยเฉพาะส่วนของความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโลหะและการย่นความเร็วในระหว่างวงจร

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 23 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 247138
เลขเรียกหนังสือ

ส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมความต้านทานสำหรับเชื่อมน็อต (Spot Nuts)

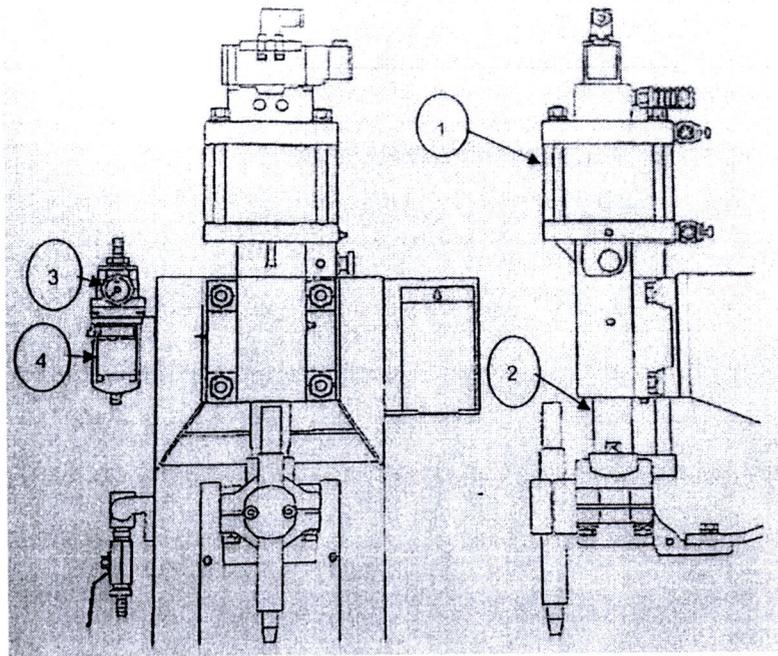


รูปที่ 2.8 (a) เครื่องเชื่อมความต้านทาน



รูปที่ 2.8 (b) เครื่องเชื่อมความต้านทาน

ระบบกลไกคานเป็นองค์ประกอบหลักของ การเชื่อมแบบความต้านทาน จุดประสงค์ของการใช้แรงกด เพื่อกดผิวหน้าของน็อตให้ชิดสนิทกับชิ้นงาน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสูงต้องใช้แรงกดน้อย ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมต่ำต้องใช้แรงกดมาก



รูปที่ 2.9 ระบบกลไกการกดงานและส่วนประกอบ

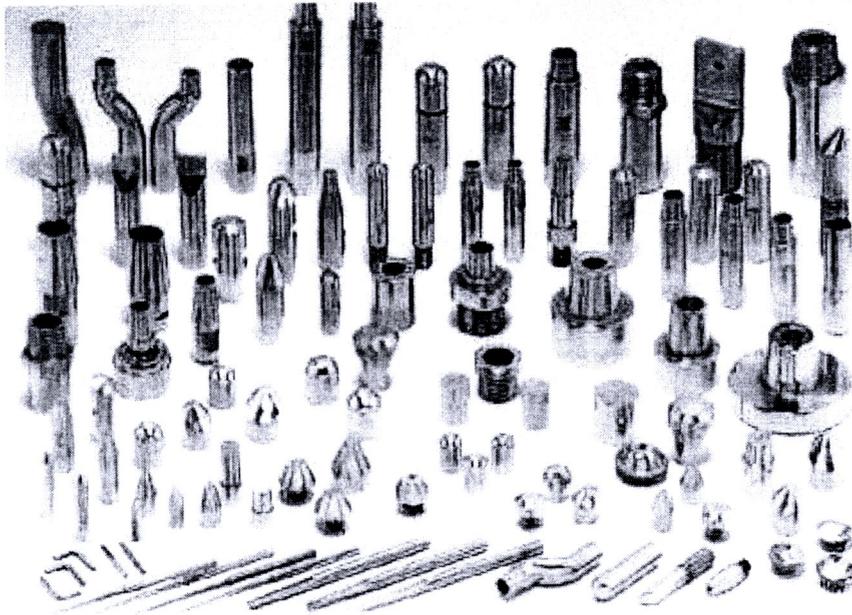
- 1) กระบอกนิวเมตริก
- 2) แก่นกระบอกนิวเมตริก
- 3) เกจวัดแรงดันลม (Pressure Gauge)
- 4) วาล์วปรับแรงดันลม (Adjust Pressure Valve)

2.1.5 โลหะที่ใช้ทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์

โลหะที่ใช้สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คือ โลหะที่เป็นตัวนำสำหรับนำกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังผิวหน้าของโลหะชิ้นงานที่ต้องการจะเชื่อม โดยอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติด้านต่างๆ ดังนี้

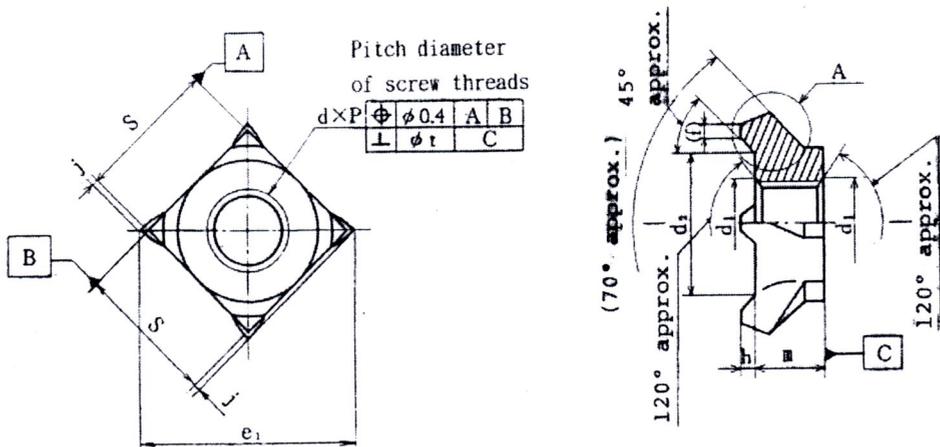
- 1) มีความแข็งแรง และมีความแข็งเพียงพอ คือ ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนและแรงกดในขณะที่มีอุณหภูมิสูง
- 2) จะต้องเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ดี
- 3) มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกับโลหะชิ้นงานได้น้อยที่สุด คือ ไม่มีการเจือโลหะผสมลงบนผิวหน้าของโลหะชิ้นงาน
- 4) จะต้องเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เพื่อป้องกันการเผาไหม้ของผิวหน้าชิ้นงาน

อิเล็กโทรดส่วนใหญ่แล้วจะทำด้วยทองแดงบริสุทธิ์ ทั้งนี้เป็นเพราะทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนที่ดี แต่ทองแดงบริสุทธิ์นั้นมีข้อเสียบางอย่าง คือ เป็นโลหะอ่อนและสึกกร่อนได้ง่าย เมื่อทองแดงมีความร้อนสูง ดังนั้นจึงนิยมใช้เบอริลเลียมเจือ (Beryllium Alloy) โลหะที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดตามมาตรฐานของ RWMA (The Resistance Welding Manufacture's Association) และ RWAA (The Resistance Welding Alloy Association)



รูปที่ 2.10 อิเล็กโทรด (หัวทีป)

ขนาดของนอตเชื่อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด



รูปที่ 2.11 รูปร่าง ความกว้าง ความยาวของนอตเชื่อม

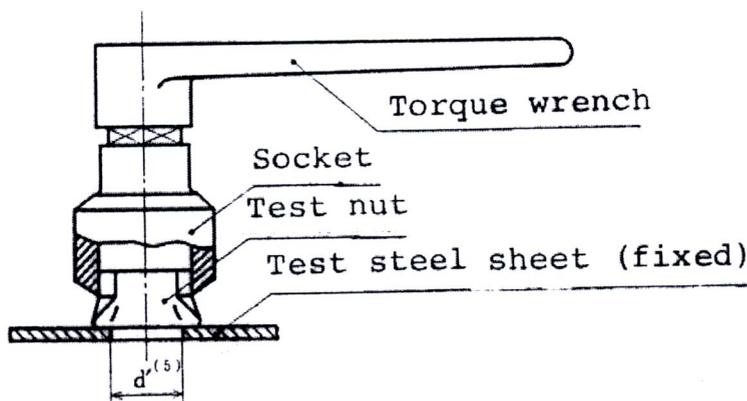
Property class	Nominal diameter of thread (d)	Pitch (P)	S	j	m		h	e:	d ₁	d ₂	φ t	f (Ref.)	Mass (g)	Mass tolerance	Type indication number
			Tolerance 0 -0.25		Basic size	Tolerance	Tolerance 0 -0.2	Min.	Tolerance +0.5 0	Tolerance +0.5 0					
6N	M5	0.8	9	0.3 to 0.5	4	0	1	12.6	6	9	0.07	0.3 to 1.5	1.8	MB	94223-60500
	M6	1.0	10	0.5 to 1.0	5	-0.30		13.9	7	10	0.09		2.7		94223-60600
	M8	1.25	12	0.5 to 1.0	6.5	0		17.1	9	12	0.12		4.8		94223-60800
	M10		14	0	8	-0.36	19.8	11	14	0.15	7.7	94223-61000			
	M12	17	1.0	10	0	-0.36	1.2	23.8	13	17	0.20	13.6	94223-61200		
8N	M4	0.7	8	0.3 to 0.5	3.2	0	1	11.2	5	8	0.06	0.3 to 1.5	1.1	MB	94223-80400
	M5	0.8	9	0.5 to 1.0	5	-0.30		12.6	6	9	0.09		2.2		94223-80500
	M6	1.0	12	0.5 to 1.0	7.5	0		17.1	7	12	0.15		4.1		94223-80600
	M8	1.25	14	0	10	-0.36	19.8	9	14	0.20	5.5	94223-80800			
	M10		14	0	10	-0.36	19.8	11	14	0.20	9.7	94223-81000			
	M12	17	1.0	12	0	-0.43	1.2	23.8	13	17	0.25	16.9	94223-81200		

รูปที่ 2.12 ขนาดต่างๆของน็อตเชื่อม (Nuts Weld) สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

2.1.6 การทดสอบด้วยแรงบิด (Torque Test)

เป็นวิธีการทดสอบอย่างง่ายโดยผู้ปฏิบัติงานเองสามารถทำได้ โดยมีวิธีดังต่อไปนี้

- นำชิ้นงานที่เชื่อมน็อตเสร็จแล้วมาทำการล็อกกับปากกาจับชิ้นงานให้แน่น เพื่อป้องกันชิ้นงานหลุดออกจากหัว Socket จะทำให้เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้
- หมุนเข็มวัดค่าที่หน้าปัดเครื่องให้อยู่ในตำแหน่งค่าศูนย์
- ทำการสวม Socket เข้ากับน็อตแล้วทำการบิดให้น็อตที่ติดอยู่กับชิ้นงานหลุดออกจกกันแล้วทำการอ่านค่าที่หน้าปัดเครื่อง Torque Test



รูปที่ 2.13 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิด

2.1.7 การทดสอบด้วยแรงกด (Push-Out Load Test)

เป็นการทดสอบที่ใช้แรงกดมากระทำด้านบนของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จแล้ว ซึ่งใช้เครื่องทดสอบมีอยู่สองลักษณะ คือ เครื่องที่ใช้แรงกดแบบไฮดรอลิก และแบบนิวเมตริก โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- นำชิ้นงานที่เชื่อมเนื้อเสร็จแล้วขัน Mandrel ดัดกับเนื้อให้แน่นจากนั้นสวมลงใน

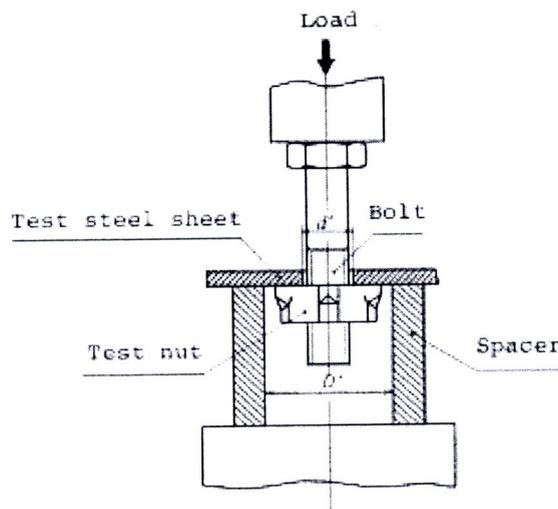
Socket

- นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแรงกดโดยใช้ด้านของ Mandrel อยู่ด้านบนทำการล็อก

Socket ให้แน่นเพื่อป้องกันชิ้นงานหลุดออกจากหัว Socket จะทำให้เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้

- ทำการปรับตำแหน่งที่ก่อนการเริ่มทดสอบให้อยู่ในตำแหน่งของค่า 0
- ทำการกดเครื่องลงมาหาชิ้นงานทดสอบจนเนื้อหลุดออกจากชิ้นงานหรือจนไม่มีแรง

ต้านเกิดขึ้นแล้วทำการอ่านค่าที่กดได้และทำการบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 2.14 ลักษณะการทดสอบด้วยแรงกด

2.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือชุดการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงกับตัวแปรขาเข้า (Input Variable) ของกระบวนการหรือระบบ เพื่อเป็นการบ่งชี้ถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลลัพธ์ขาออกได้ (Output Variable) การออกแบบการทดลองเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลสูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในกระบวนการวางแผนการทดลอง ซึ่งในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้กันมากในกลุ่มอุตสาหกรรม คือ การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistic Design of Experiment) หรือกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมโดยใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.2.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองมี 3 ประการคือ

1. การทำซ้ำ (Replication)

หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ มีวัตถุประสงค์คือ ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดในการทดลองได้ โดยพิจารณาว่าความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และสามารถหาตัวประมาณค่าที่ถูกต้องและเหมาะสมมากยิ่งขึ้นจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในการทดลอง

2. การสุ่ม (Randomization)

หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม ซึ่งถือเป็นหลักสำคัญสำหรับหลักการใช้วิธีทางสถิติในการออกแบบการทดลอง โดยมีหลักของวิธีการเชิงสถิติที่กำหนดว่า ข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ จึงจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การสุ่มนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. การกั้นออก (Blocking)

หมายถึง เทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ของการทดลอง ซึ่งการทำบล็อกนั้นอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีคุณสมบัติเหมือนกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำการกั้นออก (Blocking)

2.3 การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัตินี้จะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factors) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการทดลองนี้จะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากอิทธิพลร่วมของปัจจัยเหล่านั้น ซึ่งการทดลองแบบแฟกทอเรียลจึงเป็นการทดลองที่ใช้ข้อกำหนดและข้อมูลต่างๆครบถ้วน และเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการดำเนินการทดลอง เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการในการทดลองที่มีปัจจัยพิจารณาจำนวนมาก และสิ่งที่สำคัญคือ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่างๆ และในการดำเนินการทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อต้องการรู้ผลของปัจจัยหลายๆปัจจัย ทำให้การทดลองนั้นมีขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตในส่วนของวัตถุดิบ เวลา รวมถึงแรงงานต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่มีขนาดเล็ก

ที่สุด โดยเรียกการทดลองแบบนี้ว่า 2^k แฟคทอเรียล โดยที่

2 หมายถึง จำนวนระดับ (Level)

k หมายถึง จำนวนปัจจัย (Factor)

การทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยมากหรือน้อยเท่าไรก็ได้ แต่ต้องมีการกำหนดจำนวนระดับของการทดลองนั้นมีเพียง 2 ระดับเท่านั้นในทุกปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยเมื่อจำนวนปัจจัยการป้อนเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลเพิ่มจำนวนสูงขึ้น จำนวนของการทดลองนั้นสูงขึ้นด้วย เช่น การออกแบบการทดลอง 2^6 จะต้องการจำนวนการทดลองเท่ากับ 64 ครั้ง ซึ่งยังไม่ได้รวมการทดลองทำซ้ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ทรัพยากร เวลาการทดลองและต้นทุนการผลิตที่เพิ่มมากขึ้นด้วย และไม่อาจทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ซึ่งภาษาทางสถิติเรียกเงื่อนไขนี้ว่า “เงื่อนไขในทรีตเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) มีมากกว่าเงื่อนไขขนาดของบล็อก (Block size)” ซึ่งในบางการทดลองจำเป็นต้องแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ครั้งหรือ 4 ครั้ง

การทดลองแบบแฟคทอเรียลจะต้องตั้งสมมติฐานว่าอิทธิพลร่วมของปัจจัยในลำดับสูง (High order interaction) มีผลน้อยจึงให้ปะปน (Confound) กับ อิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วมของปัจจัยในระดับต่ำ (Lower order interaction) ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านการทดลองแฟคทอเรียลยังคงมีผลจากอิทธิพลร่วมในลำดับต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่เราสนใจ การทดลองแบบแฟคทอเรียลนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการ (Design product and process) และโดยส่วนใหญ่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ในการทดลองเพื่อการกรอง (Screening Design) ปัจจัยป้อนเข้าที่จำนวนของปัจจัยจำนวนมากที่ต้องการวิเคราะห์ โดยวัตถุประสงค์หลักของการทดลองแฟคทอเรียล คือ ต้องการค้นหาปัจจัยป้อนเข้าที่มีผลกระทบสูงๆ (Large Effect) ซึ่งการทดลองลักษณะนี้มักจะใช้ในตอนเริ่มต้น โครงการเพราะเนื่องจากมีปัจจัยป้อนเข้าจำนวนมาก

2.4 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

ในการดำเนินการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมมีขั้นตอนและแนวคิดในการปฏิบัติแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการทำความเข้าใจถึงปัญหา

ในขั้นตอนนี้จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และจะต้องหาข้อมูลป้อนเข้าจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด และผู้บริหาร โดยการระบุปัญหาจะต้องมีความชัดเจน เนื่องจากมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์

2. ขั้นตอนการเลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้ความรู้ทางเทคโนโลยีเฉพาะด้าน (Intrinsic Technology) เกี่ยวกับกระบวนการซึ่งมาจากประสบการณ์หรือความรู้ทางทฤษฎี เพื่อนำมาพิจารณาตัดสินใจเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัยที่ต้องทำการปรับในการทดลอง รวมถึงต้องทราบวิธีการควบคุม และการวัดค่าระดับของปัจจัยดังกล่าวด้วย

3. ขั้นตอนการเลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองต้องแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ ซึ่งบ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยในการทดลองหนึ่งอาจจะมีตัวแปรตอบสนองหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าจะอะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไรก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลอง

4. ขั้นตอนการเลือกการออกแบบการทดลอง

เป็นขั้นตอนการเลือกการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวน Replication) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง ในการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมากนั้นจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ขั้นตอนการทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เป็นการนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรา

นำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. ขั้นตอนการสรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้มีการนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ วิธีทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลโดยแบ่งความผันแปรออกเป็นกลุ่มย่อยๆตามแหล่งความผันแปร เพื่อพิจารณาแหล่งความผันแปรใดที่มีนัยสำคัญ โดยวิเคราะห์ได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตาราง ANOVA สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแบบเชิงเส้นตรง

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
Between treatment	$SS_{Treatments}$	$a-1$	$MS_{Treatments}$	$\frac{MS_{Treatment}}{MS_E}$
Error (within treatments)	SS_E	$N-a$	MS_E	
Total	S_T	$N-1$		

2.6 การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน (Multiple Regression and Correlation Analysis)

การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร Y กับตัวแปรอิสระ X เพียงตัวเดียว คือ เราสนใจศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือผลต่อตัวแปรตาม Y เพียงปัจจัยเดียว โดยทั่วไปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ Y ส่วนใหญ่นั้นมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหมายถึงมีตัวแปรอิสระหลายตัวที่มีผลต่อตัวแปร Y ดังนั้นในการพยากรณ์ตัวแปร Y จึงจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรอิสระดังกล่าว ซึ่งรูปแบบของสมการถดถอยเชิงซ้อน ถ้ามีตัว

แปรอิสระ K ตัว (X_1, X_2, \dots, X_K) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y โดยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น จะได้สมการถดถอยเชิงเส้นซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1, X_2, \dots, X_K ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K + e \quad (2.6)$$

โดยที่ β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y เมื่อกำหนดให้ $X_1, X_2, \dots, X_K = 0$ และ $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$ เป็นสัมประสิทธิ์ถดถอยเชิงส่วน (Partial Regression Coefficient) โดยที่ค่า β_1 เป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ เช่น ถ้า X เปลี่ยนไป 1 หน่วย ค่า Y จะเปลี่ยนไป β_1 หน่วย โดยที่ X_1, X_2, \dots, X_K คงที่

2.7 การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล

ในการใช้ข้อมูลอธิบายและวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นข้อมูลต้องมีความปกติ (Normal) มีความสัมพันธ์อิสระ (Independent) และความเสถียรของความแปรปรวน ซึ่งในทางปฏิบัติต้องทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อสรุปการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน หากแบบจำลองไม่มีความถูกต้องจะถือว่าข้อมูลไม่มีความเหมาะสมและไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลได้ การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองจะต้องดำเนินการผ่านการทดสอบเศษเหลือ (Residual) ของข้อมูลซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ e_{ij} หมายถึง Residual สำหรับข้อมูลที่ j ของระดับปัจจัยที่ i โดย

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.7)$$

เมื่อ \hat{y}_{ij} คือ ค่าประมาณ (Fit) ของข้อมูล y_{ij} ซึ่งมีค่าเท่ากับ \bar{y}_i หมายความว่าค่าประมาณข้อมูลในระดับปัจจัยที่ i คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลในระดับปัจจัยนั้นๆ การทดสอบข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์มีวิธีการดังนี้

2.7.1 กราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper : NOPP)

กราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติเป็นกราฟที่พล็อตระหว่างข้อมูลที่นำมาพิจารณากับความถี่สะสมในสเกลของการแจกแจงปกติและนำมาใช้ตรวจสอบความเป็นปกติ (Normal) ของข้อมูลโดยเฉพาะหากข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติแล้ว กราฟของ NOPP จะให้ข้อมูลที่มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง

2.7.2 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Test for Equal Variance)

ใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Residual และ Fit ในการพิจารณาความเสถียรของความแปรปรวน หากความแปรปรวนมีความเสถียรแล้วการกระจายตัวของค่า Residual ที่เหนือและใต้เส้น 0 ควรมีขนาดใกล้เคียงกัน

2.7.3 การพิจารณาค่า P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

ค่า P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ตัวสถิติทดสอบจะมีค่าเท่ากับค่าที่สังเกต (Observe Value) ที่เป็นไปได้ น้อยที่สุดเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง โดยทั่วไปจะใช้ค่า P-Value เท่ากับ 0.05 ในการทดสอบสมมติฐาน

2.8 เครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตมีความก้าวหน้ามากขึ้น ความซับซ้อนของปัญหาในการตัดสินใจก็มากขึ้น ดังนั้นการนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้จึงมีความจำเป็นมากขึ้น ซึ่งเทคนิคในการประยุกต์สถิติในงานวิศวกรรม นั้นมีเทคนิคที่แตกต่างกันออกไป เช่น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) การควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับ (Acceptance Quality Control : AQC) การควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติ (Statistical Process Control : SPC) เทคนิค 7 ประการของคิวซี (7 QC Tools) เป็นต้น ซึ่งการทำโครงการวิจัยนี้ต้องมีการนำข้อมูล (Data) ที่ได้ที่เป็นตัวเลขนั้นเปลี่ยนเป็นสารสนเทศ (Information) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีทางสถิติ

2.8.1 กราฟ (Graph)

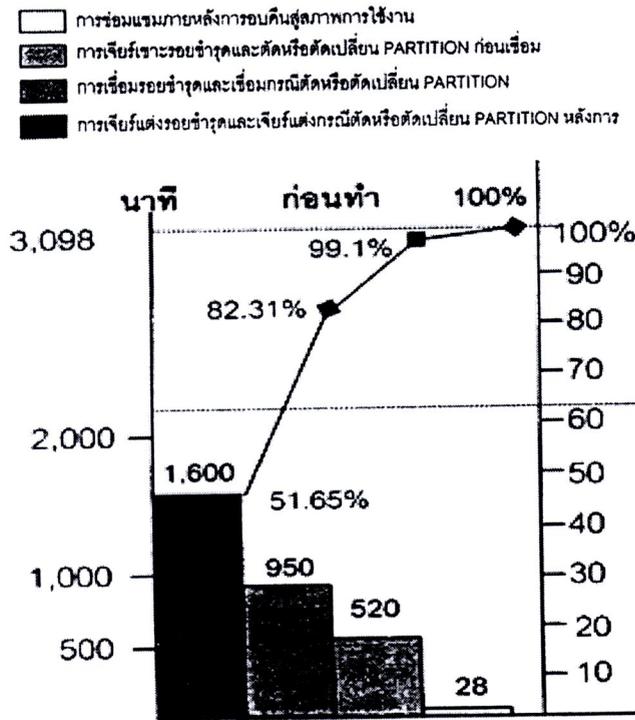
กราฟเป็นเครื่องมือและวิธีการที่มีข้อได้เปรียบอย่างหนึ่ง ในการถ่ายทอดข้อมูลและทำการวิเคราะห์ข้อมูลใช้สำหรับการนำเสนอ ซึ่งทำให้ผู้อ่านเข้าใจข้อมูลต่างๆ ได้ดี สะดวก ง่ายต่อการตีความหมาย และสามารถให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดีกว่าการนำเสนอข้อมูลด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้เพราะกราฟสามารถมองเห็นถึงลักษณะของข้อมูลต่างๆ ได้ทันที

2.8.2 แผนผังพารेटโต (Pareto Diagram)

นักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาลีเป็นผู้คิดค้น โดยที่มานั้นมาจากการสำรวจรายได้ของประชากร ซึ่งพบว่าคนที่มีรายได้สูงสุดมีเพียง 20% ของประชากรทั้งประเทศ สามารถสร้างรายได้ได้ถึง 80% ในขณะที่ประชากรที่เหลืออีก 80% สามารถสร้างรายได้เพียง 20% จากการสำรวจดังกล่าว จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นกฎ 80-20 ซึ่งต่อมา ดร. โจเซฟ จูราน ผู้เชี่ยวชาญด้านคุณภาพชาวอเมริกัน ได้ทำการวิจัยและพบว่า ถ้าข้อมูลที่เก็บได้มานั้นมีความเสถียรภาพ (Stability) ข้อมูลที่มีความสำคัญจะ

เพียงเล็กน้อย (Vital Few) ในขณะที่ข้อมูลที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยนั้นมีจำนวนมาก (Trivial Many) และเรียกหลักการนี้ว่า “หลักการพาเรโต” และได้เรียกการแยกแยะของข้อมูลในกราฟแท่ง โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยว่า “แผนผังพาเรโต” ดังในรูปที่ 2.15 โครงสร้างของแผนผังพาเรโต จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบดังนี้

- 1) แกนแนวนอนใช้สำหรับแสดงประเภทของข้อมูล
- 2) แกนแนวตั้งด้านซ้าย ใช้แสดงจำนวนข้อมูลสะสมตามเกณฑ์ที่ใช้วัดความรุนแรง เช่น ปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่อง จำนวนของเคลมจากลูกค้า เป็นต้น
- 3) แกนแนวตั้งด้านขวา ใช้แสดงเปอร์เซ็นต์สะสม โดยมีจุดสูงสุดเท่ากับ 100% ซึ่งเท่ากับ ความถี่สะสมรวมของข้อมูล



รูปที่ 2.15 แผนผังพาเรโต

วิธีการสร้างแผนผังพาเรโต ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญอยู่ 2 ขั้นตอน

1. ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูล

การเตรียมข้อมูลนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นข้อมูลการเคลมของลูกค้าในแต่ละเดือน และเมื่อได้ข้อมูลมาแล้วให้นำข้อมูลดังกล่าวมาแปลงเป็นสารสนเทศ โดยการสร้างแผนผังพาเรโต

2. ขั้นตอนการสร้างแผนผังพารето (Pareto Diagram)

หลังจากการเตรียมข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว สามารถนำข้อมูลมาทำการสร้างแผนผังพารето โดยขั้นตอนต่อไปนี้เป็น

- 2.1 วาดแกนแนวนอนแทนประเภทของข้อมูล และแกนแนวตั้งแทนเกณฑ์ที่ใช้วัดความรุนแรง หรือความสำคัญ เช่น ปริมาณของผลิตภัณฑ์บกพร่อง
- 2.2 วาดกราฟแท่งที่แสดงประเภทของข้อมูลกับความรุนแรงหรือความสำคัญ
- 2.3 วาดกราฟสะสมข้อมูล
- 2.4 กำหนดจุดของร้อยละสะสม และลากเส้นเชื่อมต่อเรียงลำดับตามข้อมูล
- 2.5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนผังที่เสร็จสมบูรณ์

2.8.3 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram) เป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่อาจก่อให้เกิดปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เป็นเทคนิคที่นำมาใช้โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการค้นหาสาเหตุของปัญหา ทำการศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการอื่นๆ และใช้เป็นแนวทางในการระดมสมอง ซึ่งจะช่วยให้ทุกคนให้ความสนใจในปัญหาของกลุ่มซึ่งแสดงไว้ที่หัวปลา

1. การกำหนดส่วนปัญหาหรือผลลัพธ์ที่หัวปลา

การกำหนดหัวข้อปัญหาจะต้องมีความชัดเจนและมีความเป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ไม่ใช้เวลามากในการค้นหาสาเหตุ และไม่ใช้เวลานานในการทำผังก้างปลา ซึ่งการกำหนดหัวข้อที่หัวปลานั้นจะกำหนดหัวข้อปัญหาในเชิงลบ เช่น อัตราของเสียสูง ชั่วโมงการหยุดเดินเครื่องจักร เป็นต้น และจะดีมากขึ้นถ้าหากสามารถกำหนดตัวเลขที่ชัดเจน ซึ่งเทคนิคการระดมความคิด เพื่อที่จะทำก้างปลาที่ละเอียด คือการตั้งคำถาม ทำไม ทำไม ทำไม ในการหาสาเหตุในแต่ละก้างปลาจนกว่าจะไม่สามารถระบุสาเหตุย่อยๆ ได้

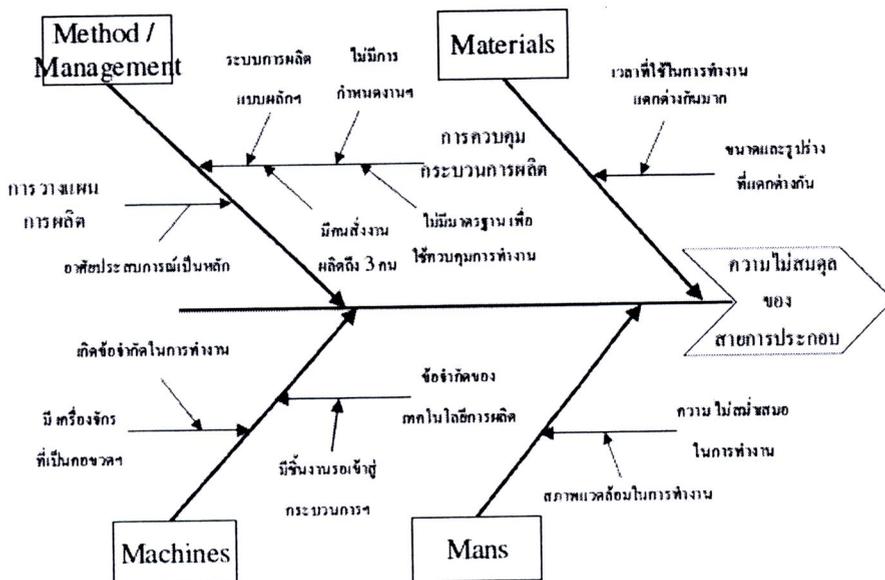
2. การกำหนดส่วนสาเหตุ

การกำหนดสาเหตุหลัก สาเหตุรอง สาเหตุย่อย ซึ่งต้องอาศัยการระดมสมองจากพนักงานในหลายๆหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกัน ภายใต้หลักของ 3 จริ่ง ซึ่งประกอบด้วย สถานที่จริง ในสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง และความรู้จริงในเทคโนโลยีเฉพาะด้าน ระบุไว้ในก้างหลัก ก้างรอง ก้างย่อยตามลำดับ โดยเริ่มจากก้างหลักต้องกำหนดปัจจัยที่มีความสอดคล้องกับปัญหาที่หัวปลา ซึ่งในการแยกแยะสาเหตุต่าง ๆ นั้น ได้อย่างเป็นระบบ โดยส่วนมากจะใช้หลักการ 4M 1E เป็นก้างหลักประกอบด้วย

- M (Man) หมายถึง คนงาน หรือพนักงาน
- M (Machine) หมายถึง เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก
- M (Material) หมายถึง วัตถุดิบหรืออะไหล่ หรือสิ่งต่างๆที่ใช้ในกระบวนการ
- M (Method) หมายถึง กระบวนการทำงาน
- E (Environment) หมายถึง สภาพแวดล้อม เช่น สถานที่ อากาศ ความสว่าง อุณหภูมิและบรรยากาศการทำงาน

3. การกำหนดความสัมพันธ์ของก้างปลา

“ลูกศร หรือก้างปลา” เป็นตัวเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาและสาเหตุ โดยที่หางลูกศรนั้น หมายถึงสาเหตุ และหัวลูกศร หมายถึง ผล



รูปที่ 2.16 ลักษณะแผนผังสาเหตุและผล

2.8.4 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode Effect Analysis : FMEA)

เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาปัญหาที่เป็นไปได้ เพื่อป้องกันปัญหาที่เคยเกิดขึ้นแล้ว หรือปัญหาที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาขึ้นมา โดยเป็นการเสริมทักษะในการแก้ปัญหา ซึ่งต้องมีการลำดับความคิดที่เป็นระบบมีขั้นตอน และมีลำดับก่อนหลัง เน้นไปที่การป้องกันปัญหาที่มีโอกาสเกิด (Most Likely Failure) ซึ่งในที่นี้ถือว่าการวิเคราะห์ถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต (Process FMEA) และทำการกรองปัจจัยที่มีผลกระทบ (Screening Factor) มีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ลักษณะข้อบกพร่องของผลกระทบ ดังนี้

1. รายละเอียดของกระบวนการ (Process Description / Function)

เป็นการกำหนดรายละเอียดของกระบวนการนั้นต้องแยกขั้นตอนภายในกระบวนการที่ทำการศึกษาให้เป็นขั้นตอนย่อยก่อน ซึ่งจะต้องบรรยายถึงหน้าที่การปฏิบัติงานที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่สนใจ

2. ระบุถึงปัจจัยที่ป้อนเข้าที่สำคัญต่อกระบวนการ (Key Process Input)

เป็นการระบุถึงปัจจัยป้อนเข้าที่สำคัญต่อกระบวนการ ซึ่งต้องบ่งชี้ว่าปัจจัยที่ป้อนเข้านั้นทำไปเพื่ออะไร และมีผลต่อปัญหาที่สนใจอย่างไร โดยผ่านการระดมสมอง และวิเคราะห์ผ่านแผนภาพสาเหตุและผล

3. ลักษณะข้อบกพร่องที่มีแนวโน้มว่าจะเกิด (Potential Failure Mode)

การกำหนดลักษณะข้อบกพร่องที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดนั้น ต้องตั้งคำถามในขั้นตอนย่อยๆ ของกระบวนการนั้น ถ้าการทำงานแต่ละขั้นตอนไม่เป็นไปตามที่ต้องการจะเกิดข้อบกพร่องอย่างไร

4. ลักษณะผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีแนวโน้มว่าจะเกิด (Potential Effect of Failure)

เป็นการกำหนดลักษณะผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดขึ้น ต้องทราบว่ามีลักษณะข้อบกพร่องที่มีแนวโน้มจะเกิด ถ้าเกิดแล้วจะส่งผลกระทบต่อปัญหาที่สนใจอย่างไรบ้าง

5. ความรุนแรงของผลกระทบ (Severity of the Effect)

เป็นผลกระทบจากการเกิดข้อบกพร่อง ต้องรู้ความรุนแรงของผลกระทบว่า หากเกิดข้อบกพร่องแล้วจะมีความรุนแรงอย่างไร โดยมีการกำหนดระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น

6. สาเหตุที่มีแนวโน้มในการเกิดข้อบกพร่อง (Potential Cause of Failure)

เป็นการระบุถึงสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องว่ามีสาเหตุจากปัจจัยใด

7. โอกาสในการเกิด (Occurrence)

เป็นอัตราที่แสดงถึงจำนวนความถี่หรือจำนวนข้อบกพร่องที่สะสม สำหรับสาเหตุหนึ่งภายใต้ระบบควบคุมที่มีอยู่

8. การควบคุมกระบวนการในปัจจุบัน (Current Process Control)

เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้ในการป้องกันการเกิดลักษณะข้อบกพร่องที่มีความเป็นไปได้ที่อาจจะเกิดขึ้น

9. การตรวจจับ (Detection)

เป็นการประเมินถึงโอกาสที่มีการใช้การควบคุมกระบวนการ แล้วพบว่าแนวโน้มของสาเหตุ และกลไกข้อบกพร่อง (จุดอ่อนของกระบวนการ) หรือความน่าจะเป็นที่นำระบบควบคุมกระบวนการที่มีอยู่แล้วจะตรวจพบลักษณะข้อบกพร่องก่อนที่มีชิ้นงานส่วนประกอบออกมาจากสายการประกอบ หรือจุดปฏิบัติการ

10. ตัวเลขแสดงลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN)

เป็นผลลัพธ์ของความรุนแรง โอกาสในการเกิด และการตรวจจับ เพื่อใช้ในการจัดลำดับความสำคัญในการแก้ไขปัญหา

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.7)$$

เมื่อ S หมายถึง ความรุนแรง (Severity)

O หมายถึง โอกาสในการเกิด (Occurrence)

D หมายถึง การตรวจจับ (Detection)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โสภณ คชบาง [8] ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยการผลิตต่างๆ เพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทค่าความหยาบผิวร่องลูกปืนในกระบวนการเจียรระโนของแกนเพลลาใน โดยมีการศึกษาปัจจัยการผลิตสำหรับกระบวนการเจียรระโน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวร่องลูกปืน ทำให้ผลิตภัณฑ์บกพร่องลดลง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ 2^6 แฟคทอเรียล และเทคนิคการวิเคราะห์แบบ ANOVA มาประยุกต์การปฏิบัติทดสอบการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมีดังต่อไปนี้ คือ (1) จำนวนครั้งในการสั่นหินเจียรระโนขณะการขัดหยาบ 800 cpm (2) จำนวนครั้งในการสั่นหินเจียรระโนขณะจบ 90 cpm (3) ความเร็วรอบของชิ้นงานในขณะการขัดหยาบ 1,600 รอบต่อนาที (4) ความเร็วรอบของชิ้นงานในขณะจบ 2,800 รอบต่อนาที (5) แรงกดของหินเจียรระโนขณะขัดหยาบ 0.5 MPa และ (6) แรงกดของหินเจียรระโนแกนเพลลาในลดลงจากร้อยละ 0.19 เป็นร้อยละ 0.006 มีค่าความหยาบผิวร่องลูกปืนของชิ้นส่วนแกนเพลลาใน (Rz) โดยเฉลี่ยลดลงจาก 0.3734 μm เป็น 0.2806 μm และความสามารถของกระบวนการเจียรระโน (Cpk) เพิ่มขึ้นจาก 0.55 เป็น 3.11

ณวัฒน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ สุภอัยภู์ พันศิริพัฒน์ ชูศักดิ์ พรสิงห์ อาณัติ วัฒนสังสุทธิ์ [9] ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนตามที่ต้องการ โดย

ชิ้นงานทดสอบจะทำตามมาตรฐาน JIS Z3136 ผลจากการ Screening Experiment โดยการใช้ Factorial Design (2^k) ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองซึ่งมีพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 3 ตัว พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ เมื่อนำพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมมาออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองอีกครั้ง โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology แบบ Box-Behnken Design ทำให้ได้สมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงเฉือนของจุดเชื่อมคือ $Y = -110393 - 574.767P + 136.911I + 1658.35S - 9.329902P^2 - 30418532I^2 + 837.485S^2 + 0.4828PI + 72.663PS$ สมการการถดถอยที่ได้นี้ สามารถนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดแนวทางหรือรูปแบบในการใช้ตัวแบบทางสถิติเพื่อพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุดได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

อิรวัตร์ บัวจันทร์ [10] ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการทอขึ้นรูปบอลล์วาล์วรุ่น 25 ซึ่งผลิตภัณฑ์บกพร่องคือ ตัวหนังสือไม่ชัด ได้มาทำการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล พบว่าสภาวะควบคุมการผลิตที่เหมาะสม คือ ระดับลมคุชชั่น 4.8 กิโลกรัม อุณหภูมิในการอบ 750 องศาเซลเซียสและน้ำยากราไฟต์ 3 วินาที ซึ่งการปรับตั้งค่านี้ทำให้ค่าสัดส่วนโดยเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทตัวหนังสือไม่ชัดของบอลล์วาล์วรุ่น 25 ลดลงจาก 19% เหลือ 6% และทำให้สัดส่วนโดยรวมลดลงจาก 8.4% เหลือ 6.8%

น้ำผึ้ง เอกศรีสกุล [11] ได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมเพื่อหาสภาวะปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กผสมเจลาติน ในการพบว่าผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทเม็ดไม่เต็มมีจำนวนมากที่สุดจึงทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทดังกล่าวนี้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดเม็ดเหล็กไม่เต็มเม็ดอย่างมีนัยสำคัญมี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิเหล็กหลังผสม น้ำหนักของเหล็กและความดันลมของกระบอกลม และจากการวิจัยพบว่าอุณหภูมิเหล็กหลังผสมที่ 70 องศาเซลเซียส น้ำหนักของเหล็กเท่ากับ 55 กรัมและความดันลมของกระบอกลมเท่ากับ 6 MPa ตามลำดับเป็นค่าที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อนำค่าควบคุมพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในสายการผลิตเหล็กไม่เต็มเม็ดลดลงจากร้อยละ 10.24 เหลือเพียงร้อยละ 3.42 จึงส่งผลให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องโดยรวมลดลงได้ตามเป้าหมายจากร้อยละ 19.40 เหลือร้อยละ 10.22

เอกพจน์ สุวรส [12] ได้ทำการศึกษาเพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการพิมพ์แพคของชิ้นส่วนพลาสติกฉีดขึ้นรูปลงให้มากกว่าร้อยละ 30 ของปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์บกพร่องทั้งหมดอยู่ที่ร้อยละ 41.70 ของปริมาณที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษาจากข้อมูลพบว่าความบกพร่องของผลิตภัณฑ์ในประเภทเส้นใยมีจำนวนมากที่สุดจึงทำให้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทดังกล่าวคืออยู่ที่ร้อยละ 32.82 โดยใช้เทคนิคทางสถิติและการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับควบคุมกระบวนการ ซึ่งการดำเนินงานเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์สาเหตุการเกิดเส้นใยจากการพิมพ์แพค โดยใช้แผนภาพสาเหตุและผลโดยการระดมสมองและหลังจากนั้นทำการคัดเลือกปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของผลกระทบ ซึ่งปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดเส้นใยคือ แรงที่ใช้ในการกด ความเร็วในการพิมพ์ และชนิดของตัวทำละลาย ผลจากการวิจัยด้วยการทดลองแบบแฟคทอเรียลพบว่า ระดับปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดเส้นใยน้อยที่สุดคือความแรงในการกด 5 บาร์ ความเร็วในการพิมพ์ระดับ 4 และการใช้สารเติมแต่งผสมกับตัวทำละลายชนิดแห้งช้า T945 จากการติดตามผลการปรับสภาวะดังกล่าวพบว่าเส้นใยลดลงเป็นศูนย์ ผลิตภัณฑ์บกพร่องโดยรวมลดลง จากก่อนการปรับปรุงที่มีสัดส่วนร้อยละ 41.70 เหลือเพียงร้อยละ 9.32 ของชิ้นงานที่ผลิตทั้งหมดซึ่งถือว่าบรรลุตามเป้าหมายของโครงการที่ตั้งไว้

อาทิตย์ รอดเยี่ยม [13] ได้ทำการศึกษาเพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่อง และลดเวลาการหยุดเดินเครื่องตัด จากปัญหาครีبد้านรอยคมตัดของเหล็กเคลือบโครเมียมขนาดความหนา 0.24 มม. กว้าง 965 มม. ยาว 729 มม. ความแข็งระดับ Temper 4 ผิว Matte (M) เคลือบผิวเบอร์ 100 ในกระบวนการตัดแบบหมุนตัด โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อหาสภาวะของปัจจัยในกระบวนการตัดอย่างเหมาะสม โดยปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดครีبد้านรอยคมตัดอย่างมีนัยสำคัญมีอยู่ 2 ปัจจัย คือ ระยะ Clearance ของใบมีดและความเร็วในการตัด จากการวิจัยพบว่าก่อนการปรับปรุงโดยการปรับระยะ Clearance เท่ากับ 0.038 มม. (ร้อยละ 15.84 ของความหนา) และใช้ความเร็วในการตัด เท่ากับ 90 เมตรต่อนาที จะสามารถตัดเหล็กเคลือบโครเมียมได้ประมาณ 30,000 แผ่น และจะเริ่มตรวจสอบครีبد้านรอยคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับค่าควบคุม 0.030 มม. ภายหลังการปรับปรุงโดยการปรับระยะ Clearance ไปที่เท่ากับ 0.045 มม. (ร้อยละ 18.75 ของความหนา) และปรับความเร็วในการตัดไปที่เท่ากับ 120 เมตรต่อนาที จะสามารถตัดเหล็กเคลือบโครเมียมได้ถึงประมาณ 100,000 แผ่น และจะเริ่มตรวจสอบครีبد้านรอยคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับค่าควบคุมอีกครั้ง จากผลการวิจัยที่ได้สามารถนำค่าของปัจจัยที่เหมาะสมไปทำการปรับปรุงกระบวนการส่งผลให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องจากเหล็กเคลือบโครเมียมทั้งหมดลดลงจากร้อยละ 3.14 เหลือ 0.88 และสามารถลดสัดส่วนชั่วโมงการหยุดเดินเครื่องตัด จากเดิมร้อยละ 0.82 ลดลงเหลือ 0.52

นราธิป แสงชัย บรรเจิด คอนเนตรงาม [14] ได้ทำการศึกษาการลากขึ้นรูป และการประกอบด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในอุตสาหกรรมงานเชื่อมที่นิยมใช้เหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าการทดสอบความแข็งแรงดึง-เฉือน ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนเหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ที่ความหนา 2 mm. โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษานี้คือ

แรงกดระหว่างชิ้นงาน กระแสไฟฟ้า เวลาในการกดระหว่างชิ้นงาน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม การศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางสถิติชนิด 2^k พบว่าปัจจัยต่างๆ ข้างต้นมีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเรียงจากปัจจัยที่มีผลกระทบจากน้อยไปหามากตามลำดับดังนี้ กระแสไฟฟ้า เวลาในการกด ผลร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม ผลร่วมระหว่างเวลาในการกดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม จากผลการทดสอบทำให้สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อม โดยสามารถส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง-เหนือนจากการเชื่อมอยู่ในระดับ 5.166 ถึง 5.492 kN

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการ	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง
โสภณ คชบาง	การออกแบบการทดลองเพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการเจียรในของชิ้นส่วนยานยนต์ประเภทแบร์ริง		●	●
ณรัตน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ ศุภอัยภู์ พันศิริพัฒน์ ชูศักดิ์ พรสิงห์ อาณัติ วัฒนสังสุทธิ์	การสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุด	●		●
อิราวัตร บัวจันทร์	การลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการทุบขึ้นรูปบอลล์วาล์ว		●	●

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	งานวิจัยที่ เกี่ยวกับ กระบวนการ เชื่อมความ ต้านทานแบบจุด	งานวิจัยที่ เกี่ยวกับการ ปรับปรุง กระบวนการ	งานวิจัยที่ เกี่ยวกับการ ออกแบบ การทดลอง
น้ำผึ้ง เอกศรีสกุล	การลดปริมาณ ผลิตภัณฑ์บกพร่องใน กระบวนการผลิตเซลล์ ผสมเจลาติน		●	●
เอกพจน์ สุวรส	การลดปริมาณ ผลิตภัณฑ์บกพร่องใน กระบวนการพิมพ์ แพดของชิ้นส่วน พลาสติกฉีดขึ้นรูป		●	●
อาทิตย์ รอดเยี่ยม	การออกแบบการ ทดลองเพื่อลดปัญหา ครีปด้านรอยคมตัด ของเหล็กเคลือบ โครเมียมใน กระบวนการตัดแบบ หมุนตัด		●	●
นราธิป แสงชัย บรรเจิด ดอนเนตรงาม	การศึกษาคุณสมบัติ ด้านความแข็งแรงใน การเชื่อมความ ต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้ารีด เย็น SPCD (JIS G3141) โดยหลักการ ออกแบบการทดลอง	●		●