



## รายงานการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งต่อ  
คุณสมบัติความแข็งในเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11

**The study of the effect of SMAW process with hard facing electrode  
on hardness in Cold work tool steel-SKD 11**

นายธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

นายฤทธิชัย เกาเนียม

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

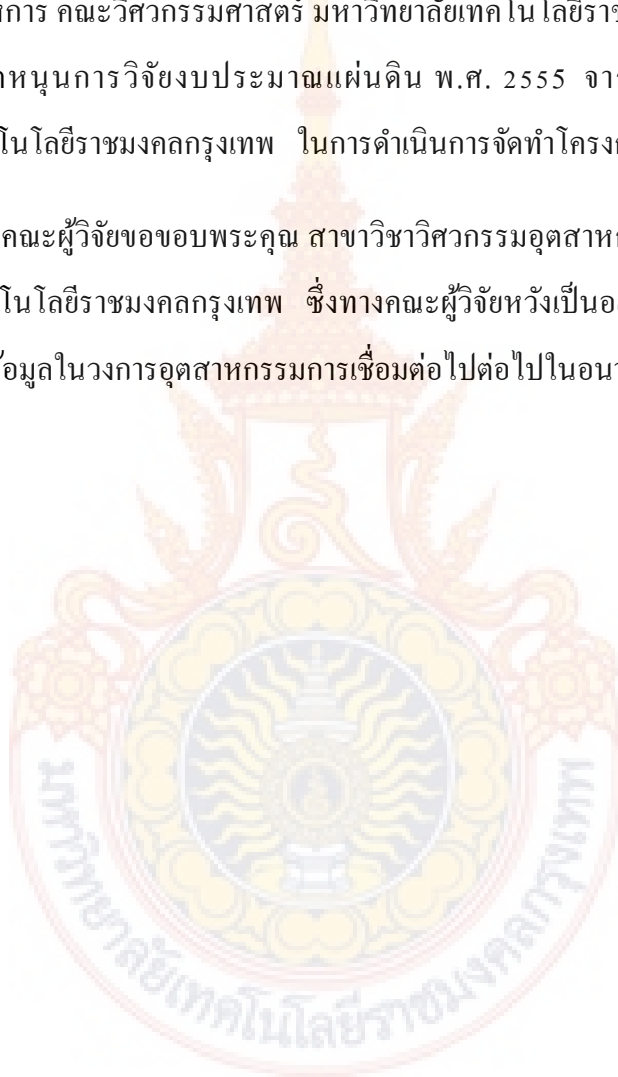
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยเรื่อง การศึกษาผลกระทบของการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งต่อคุณสมบัติความแข็งแรงในเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 นี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยได้รับเงินประมาณอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2555 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ในการดำเนินการจัดทำโครงการวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยฉบับนี้ จะถูกนำไปเป็นข้อมูลในวงการอุตสาหกรรมการเชื่อมต่อไปต่อไปในอนาคต

คณะผู้วิจัย



## บทคัดย่อ

เนื่องจากวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 มีการนำมาใช้งานในด้านชิ้นส่วนของแม่พิมพ์สำหรับงานเย็นอย่างกว้างขวาง เช่น แม่พิมพ์แบดลิงกิ้ง (Blanking) แม่พิมพ์ปั๊ม (Pressing) แม่พิมพ์ดัด (Bending) และ แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป (Drawing) เป็นต้น ในการซ่อมแซมชิ้นส่วนของแม่พิมพ์สำหรับงานเย็นที่มีการสึกหรอ กรรมวิธีการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์จะมีผลกระทบในเรื่องธาตุต่างๆที่เป็นคุณสมบัติของลวดเชื่อม ที่อาจส่งผลทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นหรือลดลง และจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่แข็งเปราะหรืออ่อนลง ซึ่งอาจจะทำให้วัสดุเกิดการแตกร้าวภายหลังการเย็นตัวจากกระบวนการเชื่อมอาจจะส่งผลไปถึงเกิดการสึกหรอระหว่างอายุการใช้งานของวัสดุ ดังนั้นโครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อคุณสมบัติความสามารถในการเชื่อมไฟฟ้า วัสดุเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ก่อนและหลังชุบแข็ง

การดำเนินการประกอบด้วยการกำหนดตัวแปรในงานเชื่อมเบื้องต้นที่เหมาะสมก่อนทำการเชื่อมจริง โดยกำหนดตัวแปรในการเชื่อมได้แก่ การทำกรรมวิธีทางความร้อน 3 สภาวะ ได้แก่ ชิ้นงานที่เชื่อมโดยไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใดๆ (As welded), ชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง(Quenching), ชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการอบคลายความแข็ง(Tempering) ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดสอบ 6 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350 ขนาดชิ้นทดสอบ 76 มม.×44 มม.×6 มม. จากนั้นนำไปทดสอบค่าความแข็งแบบ วิเกอร์ส์ (Vicker Hardness) และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) และวัดขนาดของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ซึ่งนำผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ตามความสัมพันธ์ของตัวแปรงานเชื่อมต่าง ๆ กับรูปร่างและคุณสมบัติความแข็งภายหลังการเชื่อมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง(Factorial)

จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งภายหลังการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 มีดังนี้

1. จากการศึกษาและทำการวิเคราะห์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง(Factorial ) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal zone) คือ ลวดเชื่อม ที่ระดับความเชื่อมแน่น 95% โดยจากการทดลองพบว่าลวดเชื่อมสแตนเลส E 308 และ ลวดเชื่อมสแตนเลส E 316

โดยการทำการวิธีทางความร้อนทั้ง 3 สภาวะ จะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 21 HRC ซึ่งมีค่าความแข็งลดลง ส่งผลให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าวบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal zone) สูง

2. จากการศึกษาและทำการวิเคราะห์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง(Factorial ) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) คือ การทำการวิธีทางความร้อน 3 สภาวะ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจากการทดลองพบว่าลวดทั้ง 6 ชนิด ที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใดๆ (As welded) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 50 HRC ที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง(Quenching) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 HRC และที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการอบคลายความแข็ง(Tempering) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 53 HRC

3. จากการศึกษาและทำการวิเคราะห์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง(Factorial ) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งบริเวณโลหะงาน(Base metal) คือ การทำการวิธีทางความร้อน 3 สภาวะ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจากการทดลองพบว่าลวดทั้ง 6 ชนิด ที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใดๆ (As welded) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 20 HRC ที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง(Quenching) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 HRC และที่สภาวะชิ้นงานที่เชื่อมโดยผ่านกรรมวิธีการอบคลายความแข็ง(Tempering) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 52 HRC

4. เมื่อนำค่าความแข็งในบริเวณ Base Metal Zone, Weld Metal Zone และบริเวณ HAZ มาทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งจะพบว่าในบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติความแข็งของเหล็กเครื่องมืองานเช่น SKD 11 มากที่สุด จากการทดลองพบว่าบริเวณบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) จะเกิดการแปรปรวนของค่าความแข็งมากที่สุด

## ABSTRACT

Currently, cold work tool steel-grade SKD 11 is widely used to be parts of the tools and machinery, especially in tools and dies such as blanking, pressing, bending, and drawing etc. Mold repair welding processes are affected in various elements of the welding properties. The resulting material may be increased or decreased strength. And will feature a hard brittle materials or weakened Which may cause the material after the break from the cold welding process may lead to wear during the lifetime of the material. Therefore, this project aims to feature the ability to connect power. Cold work tool materials, SKD 11 grades before and after quenching.

The operation consists of the basic variables of the appropriate welding before actual connection. The variables include the link. Making processes of heat three conditions, including parts of access without heat treatment, any (As welded), parts (Quenching), parts (Tempering) welding used in the experiment, six types of welding types of hydrogen, low-E 6013, welding type hydrogen low-E 7016, welding Stainless E308, welding stainless E316, welding hard facing HF 240, welding hard facing HF 350 specimen size 76 mm × 44 mm × 6 mm, and then used to test the Vickers hardness and check. microstructure and measure the size of the weld with a microscope which takes results to be analyzed the relationship between variables welding different with the shape and properties hardness after welding by means of design. experiments (Factorial).

The results showed that factors affecting the hardness after welding cold work tool steel SKD 11 is as follows.

1. The study and analysis by experimental design (Factorial) found that factors influencing the Weld metal zone is welding the confidence level 95% of results showed. whether welding stainless steel welding wire E 308 and E 316 stainless steel with heat treatment to make the third condition is that the average hardness was 21 HRC hardness, which is lower Resulting in the break area Weld metal zone high

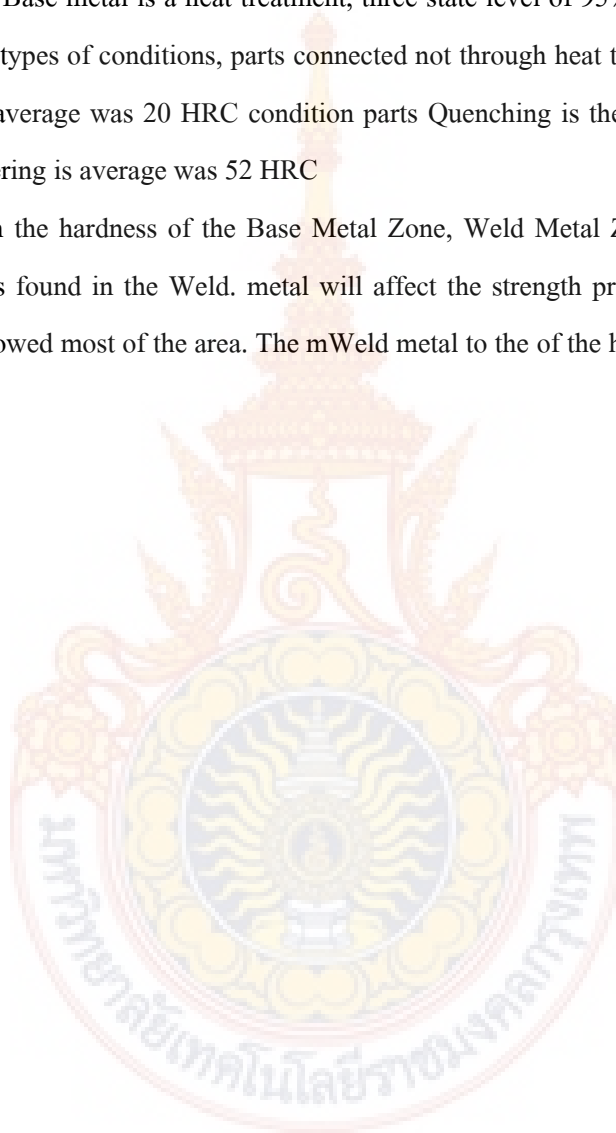
2. The study and analysis by experimental design (Factorial) found that factors influencing the Heat Affected Zone is a heat treatment, three state level of confidence in 99.5 % The results showed that the wire and six types of conditions, parts connected not through heat

treatment, any (As welded) to the hardness average was 50 HRC condition parts Quenching is the average hardness was 58 HRC and the condition parts

Tempering is the average hardness was 53 HRC

3. The study and analysis by experimental design (Factorial) found that factors influencing the hardness the Base metal is a heat treatment, three state level of 95%. The results showed that the wire and six types of conditions, parts connected not through heat treatment, any (As welded) to the hardness average was 20 HRC condition parts Quenching is the average hardness was 58 HRC and Tempering is average was 52 HRC

4. When the hardness of the Base Metal Zone, Weld Metal Zone and compared to the HAZ hardness is found in the Weld. metal will affect the strength properties of cold work tool steel SKD 11 showed most of the area. The mWeld metal to the of the hardness of the most.

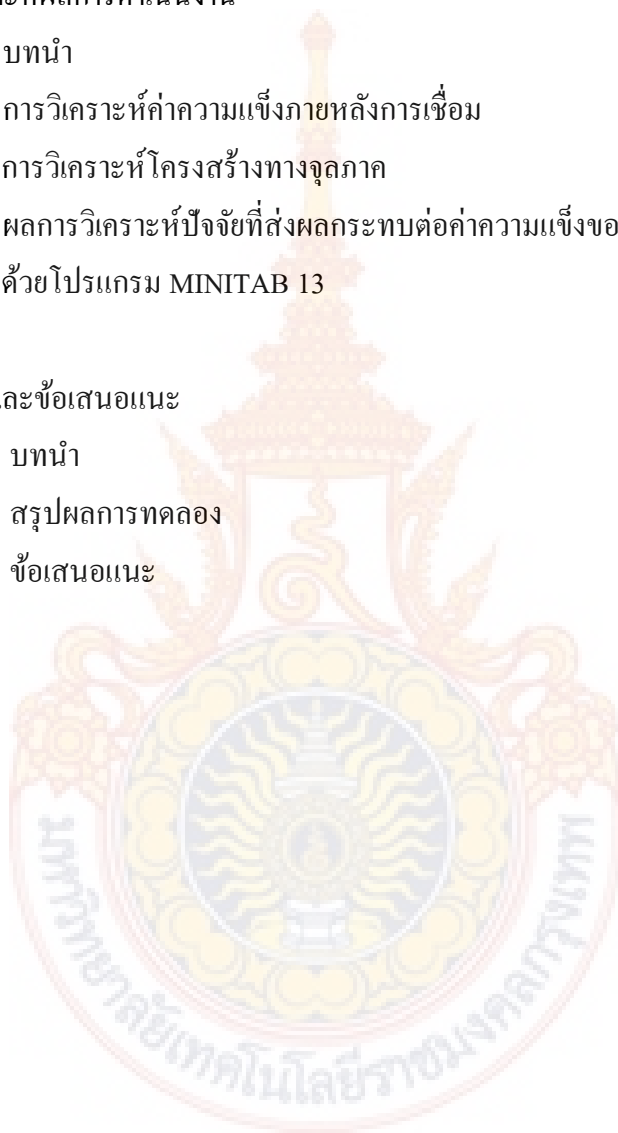


## สารบัญ

|                               | หน้า |
|-------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ               | ก    |
| บทคัดย่อ                      | ข    |
| สารบัญ                        | ฉ    |
| สารบัญตาราง                   | ซ    |
| สารบัญภาพ                     | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ                  |      |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา         | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ    | 1    |
| 1.3 ขอบเขตโครงการ             | 1    |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน       | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3    |
| บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีสำคัญ   |      |
| 2.1 บทนำ                      | 4    |
| 2.2 นิยามศัพท์ที่สำคัญ        | 4    |
| 2.3 แนวคิดในการทำงานวิจัย     | 4    |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง     | 5    |
| 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง        | 7    |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน   |      |
| 3.1 บทนำ                      | 29   |
| 3.2 วางแผนการทดลอง            | 29   |
| 3.3 การดำเนินงาน              | 32   |
| 3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย    | 33   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                            | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน                                                         |      |
| 4.1 บทนำ                                                                                   | 47   |
| 4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแกร่งภายหลังการเชื่อม                                           | 48   |
| 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค                                                         | 67   |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแกร่งของวัสดุ<br>ด้วยโปรแกรม MINITAB 13 | 81   |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ                                                                |      |
| 5.1 บทนำ                                                                                   | 87   |
| 5.2 สรุปผลการทดลอง                                                                         | 87   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ                                                                             | 88   |
| บรรณานุกรม                                                                                 |      |

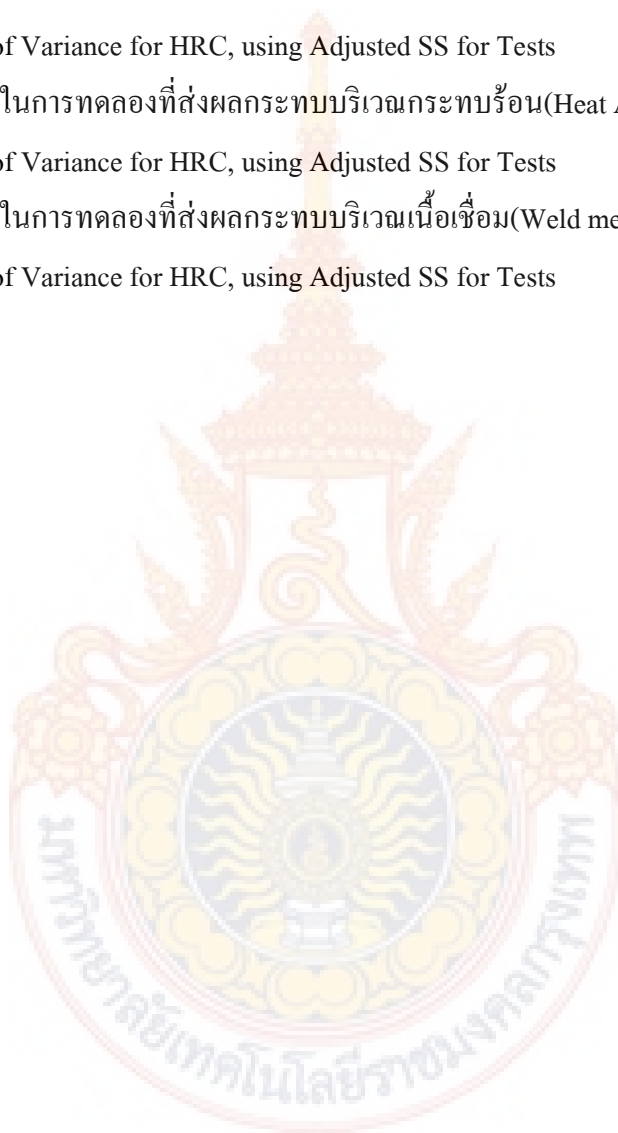


## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                   | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงคุณลักษณะทั่วไปของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11                               | 8    |
| 3.1 แสดงแผนการดำเนินโครงการ                                                                | 30   |
| 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 6013                                            | 35   |
| 3.3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 7016                                            | 35   |
| 3.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 308                                             | 35   |
| 3.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 316                                             | 36   |
| 3.6 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม HF 240                                            | 36   |
| 3.7 แสดงค่าความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะเชื่อม HF 240                                      | 36   |
| 3.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม HF 350                                            | 37   |
| 3.9 แสดงค่าความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะเชื่อม HF 350                                      | 37   |
| 3.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง                                                    | 38   |
| 3.11 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11                           | 39   |
| 3.12 การออกแบบตารางเก็บข้อมูลค่าความแข็งหลังเชื่อมในการทดลองเบื้องต้น                      | 39   |
| 3.13 การออกแบบตารางบันทึกผลค่าความกว้าง Weld Metal Zone และขนาดความกว้างของ HAZ            | 40   |
| 3.14 การออกแบบตารางเก็บค่าความแข็งในบริเวณ Base Metal Zone, Weld Metal Zone และ บริเวณ HAZ | 41   |
| 4.1 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 6013              | 70   |
| 4.2 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 7016              | 72   |
| 4.3 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308               | 74   |
| 4.4 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 316               | 76   |
| 4.5 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 240              | 78   |
| 4.6 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 350              | 80   |
| 4.7 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณโลหะงาน(Base metal)                        | 81   |

## สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่                                                                      | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.8 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests                 | 81   |
| 4.9 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) | 83   |
| 4.10 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests                | 83   |
| 4.11 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)      | 84   |
| 4.12 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests                | 85   |



## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 CCT- Graph ของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11                                     | 10   |
| 2.2 Austenitizing Temperature ที่อุณหภูมิแตกต่างกันของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 | 10   |
| 2.3 TTT-Graph ของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11                                      | 11   |
| 2.4 แสดงพื้นที่ที่หน้าตัดของรอยเชื่อมบนชิ้นงาน                                      | 13   |
| 2.5 แสดงการหลอมละลายและการเกิดบ่อหลอมละลายของงานเชื่อมโลหะ                          | 14   |
| 2.6 แสดงรอยแตกบริเวณกระแทกร้อนแนวเชื่อมในงานเหล็กกล้าความแข็งแรง                    | 15   |
| 2.7 แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม                          | 16   |
| 2.8 ส่วนประกอบของลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์                                           | 18   |
| 2.9 แสดงลักษณะของรอยกดแบบวิกเกอร์                                                   | 21   |
| 2.10 การวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยนูนเพื่อหาค่าความแข็ง                               | 22   |
| 2.11 แผนภาพแสดงรอยนูนและแรงกดทดสอบ                                                  | 22   |
| 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและแรงกดทดสอบ                                | 23   |
| 2.13 รอยนูนที่มีลักษณะโค้งเว้าหรือโค้งนูน                                           | 24   |
| 2.14 ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ส่องจากหลอดไฟ                                  | 26   |
| 2.15 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ส่องจากหลอดไฟ                        | 26   |
| 2.16 แสดงลักษณะลำแสงสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายทำให้เกิดภาพโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ    | 27   |
| 2.17 แสดงลักษณะแนวทางการจัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง                                | 28   |
| 3.1 แสดงขั้นตอนการปฏิบัติงาน                                                        | 31   |
| 3.2 แสดงรูปการทดลองเชื่อมวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11                         | 42   |
| 3.3 แสดงรูปของชิ้นงานที่นำไปทดสอบความแข็ง                                           | 43   |
| 3.4 ลักษณะแนวทางการจัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง                                     | 44   |
| 3.5 แสดงลักษณะแนวทางการจัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง                                 | 45   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                          | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1 แสดงตำแหน่งของการกดความแข็ง                                                                                                 | 47   |
| 4.2 แสดงตำแหน่งของการวัดความกว้างของรอยเชื่อม                                                                                   | 47   |
| 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งวัสดุเกรด SKD 11 ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน 3 Condition                                           | 48   |
| 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 6013 ทั้ง 3 Condition                                                       | 49   |
| 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 7016 ทั้ง 3 Condition                                                       | 50   |
| 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 308 ทั้ง 3 Condition                                                        | 51   |
| 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 316 ทั้ง 3 Condition                                                        | 52   |
| 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด HF 240 ทั้ง 3 Condition                                                       | 53   |
| 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด HF 350 ทั้ง 3 Condition                                                       | 54   |
| 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด                                  | 55   |
| 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการชุบแข็ง(Quenching)        | 56   |
| 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการอบคลายความแข็ง(Tempering) | 57   |
| 4.13 แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับCondition As welded กับชนิดของลวดเชื่อม                                       | 58   |
| 4.14 แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับ Condition Quenching กับชนิดของลวดเชื่อม                                      | 59   |
| 4.15 แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับCondition Tempering กับชนิดของลวดเชื่อม                                       | 60   |
| 4.16 แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone , HAZ , และ บริเวณ Base Metal Zone ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition As welded       | 62   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                             | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.17 แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone , HAZ , และ บริเวณ Base Metal Zone ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition Quenching          | 63   |
| 4.18 แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone , HAZ , และ บริเวณ Base Metal Zone ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition Tempering          | 64   |
| 4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Weld metal Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน                                                     | 65   |
| 4.20 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ HAZ Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน                                                            | 65   |
| 4.21 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Base Metal Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน                                                     | 66   |
| 4.22 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11                                                                       | 67   |
| 4.23 แสดงตำแหน่งการส่องกล้องทางจุลภาค                                                                                              | 68   |
| 4.24 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 6013 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า           | 69   |
| 4.25 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 7016 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า           | 71   |
| 4.26 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า            | 73   |
| 4.27 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 316 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า            | 75   |
| 4.28 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 240 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า           | 77   |
| 4.29 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 350 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า           | 79   |
| 4.30 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Wire และตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณ โลหะงาน(Base metal)           | 82   |
| 4.31 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Wire และตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณ กระทบร้อน(Heat Affected Zone) | 84   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 4.32 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Wire และตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)

86



## บทที่ 1

### บทนำ

ในสภาวะปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีวิวัฒนาการไปอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการเลือกใช้วัสดุในการผลิตที่จะนำมาให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดให้กับผู้ผลิต การทำปริญญานิพนธ์นี้จัดทำเพื่อการศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ภายหลังการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าและทำการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อม

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีวัสดุจำพวกโลหะเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก และปัจจัยทางด้านวัสดุนี้ทำให้เกิดการค้นคว้าและวิเคราะห์เกี่ยวกับงานเชื่อม วัสดุที่ใช้ คือ เหล็กมาตรฐาน JIS SKD 11 ลักษณะการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าภายหลังการชุบแข็ง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสามารถและคุณสมบัติของวัสดุเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

#### 1.2 จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.3.1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงก่อน-หลังการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ภายหลังการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้า

1.3.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงในการใช้ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกันในการเชื่อมไฟฟ้า

1.3.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมของวัสดุ เหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ที่ใช้ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกันในการเชื่อมไฟฟ้า

#### 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.4.1 ขึ้นทดสอบวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

1.4.2 ใช้กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าในการศึกษา

1.4.3 ใช้ลวดเชื่อม 6 ชนิด คือ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

1.4.4 ทดสอบค่าความแข็งก่อนและหลังการเชื่อมแบบวิกเกอร์ (Vickers; HV)

1.4.5 ทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคและวัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อม

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 การเชื่อมไฟฟ้าและการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers; HV)

1.5.2 เลือกวัสดุที่ใช้ในการทดลองโดยใช้วัสดุในการทดลอง เกรด SKD 11

1.5.3 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

1.5.3.1 ตัดวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ให้มีขนาด 76 มม. x 44 มม. x 6 มม.

1.5.3.2 นำชิ้นงานที่ตัดนั้นมาทำการแมคชีนขอบให้เรียบ

1.5.3.3 ลบมุมชิ้นงานเพื่อป้องกันอันตราย

1.5.3.4 ทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดเพื่อเตรียมนำไปเชื่อม

1.5.4 กำหนดขอบเขตและปัญหา

1.5.4.1 ชิ้นทดสอบวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ขนาด  $76 \times 44 \times 6$  มม.

1.5.4.2 ใช้วิธีการเชื่อมไฟฟ้า

1.5.4.3 ใช้ลวดเชื่อม 6 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

1.5.4.4 ใช้การวัดค่าความแข็งก่อนและหลังการเชื่อมแบบวิกเกอร์ (Vickers; HV)

1.5.4.5 ใช้การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microscope)

1.5.4.5 ใช้เป็นการทดสอบผลกระทบและปัจจัยค่าความแข็งและรูปร่างแนวเชื่อมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Factorial) เพื่อให้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งและรูปร่างของรอยเชื่อม

1.5.5 จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1.5.5.1 วัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

1.5.5.2 เครื่องเชื่อมไฟฟ้า พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้กับเครื่อง

1.5.5.3 ลวดเชื่อม 6 ชนิด ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

1.5.5.4 เตาอบชุบแข็ง

1.5.5.5 เครื่อง Wire cut

1.5.5.6 เครื่องขัดกระดาษทราย และกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000, 1200

1.5.5.7 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์

1.5.5.8 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

1.5.6 ทดลองเชื่อมตามแผนการทดลอง

1.5.7 ทดสอบค่าความแข็งก่อนและหลังเชื่อม ตามวิธีวิกเกอร์ (Vickers; HV)

1.5.8 ทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคและวัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อม

1.5.9 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Factorial) เพื่อให้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งและรูปร่างของรอยเชื่อม

1.5.10 สรุปผลงานวิจัย

## 1.5 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติความแข็งของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ก่อนและหลังการเชื่อม

1.6.2 สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งในการใช้ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกันในการเชื่อมไฟฟ้า

1.6.3 สามารถคาดการณ์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบของโครงสร้างทางจุลภาคและขนาดพื้นผิวรอยเชื่อมในการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ก่อนและหลังการชุบแข็ง และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสามารถในการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้า ให้มีผลการศึกษาอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 2.2 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.2.1 SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เป็นมาตรฐาน JIS เมื่อเปรียบเทียบกับ มาตรฐาน AISI จะสัญลักษณ์เป็น D2

2.2.2 Weld metal คือ บริเวณเนื้อเชื่อม

2.2.3 HAZ คือ บริเวณผลกระทบทางความร้อน

2.2.4 Base metal คือ โลหะงาน

2.2.5 Bead on plate คือ ลักษณะรอยเชื่อมแบบไม่เต็มลวด

#### 2.3 แนวคิด

เนื่องจากในปัจจุบันนั้นในงานอุตสาหกรรมมีการใช้วิธีในการเชื่อมไฟฟ้า เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การซ่อมพวงแม่พิมพ์ที่เกิดการเสียหายแตกร้าว เป็นต้น จึงได้มีแนวคิดว่าถ้าใช้การเชื่อมไฟฟ้า เพื่อทำการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆ ที่สึกหรอนั้นวัสดุจะมีคุณสมบัติทางกลนั้น คงเดิมหรือลดน้อยลงมากแค่ไหนและจะสามารถใช้งานได้เหมือนเดิมหรือไม่ โดยการทดสอบจะเน้นที่เหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ที่เป็นเหล็กจำพวกที่ใช้ทำแม่พิมพ์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติก่อนเกิดการเชื่อมและหลังเชื่อมว่าจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันหรือไม่และจะใช้วิธีการทางสถิติมาช่วยในการเก็บข้อมูล

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นด้วยการเชื่อมเลเซอร์ [1]

(นายสิวะพงษ์ ลัมพาทิวัฒน์) ในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ผ่านมามีใช้กระบวนการเชื่อมทิก ซึ่งมักประสบปัญหาด้านการแตกร้าว การวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นด้วยการเชื่อมเลเซอร์ โดยการทดลองได้ทำการใช้ลวดเชื่อมเลเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.7 มิลลิเมตร ตามลำดับแล้วนำมาเทียบกับการเชื่อมทิกที่มีการอุ่นชิ้นงานและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม ซึ่งใช้ลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร จากการทดลองสามารถหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมกับลวดเชื่อมเลเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆได้และพบว่าคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมเลเซอร์เป็นดังนี้คือค่าความแข็งของแนวเชื่อมอยู่ที่ประมาณ 617 HV ค่าความแข็งบริเวณ HAZ อยู่ที่ประมาณ 728 HV ความกว้างบริเวณ HAZ อยู่ที่ประมาณ 190  $\mu\text{m}$  และเมื่อตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กไม่พบรอยแตกร้าว ในขณะที่การเชื่อมทิกนั้นมีค่าความแข็งของแนวเชื่อมอยู่ที่ประมาณ 487-442 HV ค่าความแข็งบริเวณ HAZ อยู่ที่ประมาณ 821 HV ความกว้างบริเวณ HAZ อยู่ที่ประมาณ 1249  $\mu\text{m}$  จากผลลัพธ์นี้พบว่าค่าความแข็งบริเวณ HAZ ของการเชื่อมเลเซอร์ต่ำกว่าของทิกประมาณ 100 HV ในขณะที่ความกว้างของ HAZ มีขนาดน้อยกว่าการเชื่อมทิกมาก จึงทำให้ไม่เกิดรอยแตกร้าวบริเวณ HAZ ในขณะเดียวกันความแข็งของแนวเชื่อมของการเชื่อมเลเซอร์สูงกว่าการเชื่อมทิกจึงทำให้มีผลดีต่อการใช้งาน จากข้อมูลทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมเลเซอร์มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาทำการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นและได้ผลดีกว่ากระบวนการเชื่อมทิก

การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 [2]

(สมหมาย สารมาท และ วิชัย ถักรัตินวัฒน์) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เพื่อหารูปแบบและข้อกำหนดวิธีปฏิบัติในกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ซึ่งพบปัญหาการแตกร้าวภายหลังจากการเชื่อมเพื่อซ่อมแซม โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 24 เพื่อรองรับปัจจัย 4 ปัจจัย คือ กระแส ไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม มุมแกนลวดทั้งสแตนอเล็กโทรด และอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม โดยมีผลตอบเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว ซึ่งมีขอบเขตจำกัดของค่าคุณลักษณะจึงได้นำวิธีการแปลงข้อมูลผลตอบก่อนการวิเคราะห์ผล โดยวิธีที่เหมาะสม คือ Arcsin y ส่งผลให้ข้อมูลใหม่มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือใกล้เคียงมากขึ้น

ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงแล้วเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์ - เบห์นเคนในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11 ที่สามารถควบคุมการแตกร้าวในแนวเชื่อมได้ คือ การปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อมที่ 200 เซนติเมตรต่อนาทีอุณหภูมิอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียส และในส่วนของมุมแกนลวดทั้งสเตนอ์เล็กโตรดไม่มีผลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองยืนยันผลเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นพบว่าไม่ปรากฏรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม จากการตั้งคำถามวิธีปฏิบัติงานดังกล่าว

การปรับปรุงคุณภาพด้านการชุบแข็งของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนเหล็กกล้า JIS SKD61 [3] (นายทวิศักดิ์ แขวงเมฆ) การวิจัยนี้เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรในการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีผลต่อ ค่าความต้านแรงกระแทกและหาแนวทางในการยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อน วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนเกรด JIS SKD61 ผ่านกระบวนการการชุบแข็งสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนภายใต้เงื่อนไขตัวแปรต่างๆ ในการอบชุบ เช่น อุณหภูมิชุบแข็ง ความดันแก๊สไนโตรเจนในการเย็นตัว อุณหภูมิในการอบคืนตัว จากการทดลอง การชุบแข็งด้วยอุณหภูมิชุบแข็งในช่วง 1010 – 1050 °C ความดันแก๊สไนโตรเจนในการเย็นตัว 2.5 - 5.5 Bar มีการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 540 – 590 °C จำนวน 3 ครั้ง โดยใช้เตาสถูญากาศ ความแข็งที่ต้องการเท่ากับ 48 + 1 HRC ผลจากการทดสอบการกระแทก พบว่า เงื่อนไขการชุบแข็งที่ก่อให้เกิดความต้านแรงกระแทกสูงสุด เฉลี่ย 13 จูล คือ อุณหภูมิชุบแข็ง 1030 °C ความดันแก๊สไนโตรเจนในการเย็นตัว คือ 4 Bar อัตราในการเย็นตัว เท่ากับ 17.32 °C/min ได้ความแข็งเฉลี่ย 47.2 HRC ผลจากการทดสอบการชุบขึ้นรูปขึ้นงาน พบว่า แม่พิมพ์สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เท่ากับ 8,981 ชิ้น ซึ่งจากเดิมแม่พิมพ์สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เฉลี่ยเท่ากับ 6,686 ชิ้น เพิ่มขึ้นกว่าเดิม 34%

การศึกษาอิทธิพลของช่องว่างคมตัดระหว่างพันธและคายที่มีผลต่อพฤติกรรม การสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด [4]

(ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ) วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสึกหรอ ที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัดที่ ทำจากเหล็กเครื่องมือที่มีปริมาณคาร์บอนและ โครเมียมสูง เกรด JIS SKD11 ชุบแข็งที่ระดับ 60 HRC ตัววัสดุขึ้นงานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก AISI 430 แผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมุ่งเน้น ศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดระหว่างแม่พิมพ์ ที่มีต่ออัตราการสึกหรอของ แม่พิมพ์ การตรวจสอบการสึกหรอทำทั้ง

ทางตรงคือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่พันธ์ โดยการวัดค่าแรงดัดชิ้นงาน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ระยะเวลาการสึกหรอของพันธ์ ด้านข้างและด้านหน้า และทางอ้อมคือการตรวจสอบที่ขอบตัดของ ชิ้นงานที่ได้ ด้วยการวัดความสูงของครีบกึ่งที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นตัดจนถึงจำนวนการตัดที่ 10,000 ครั้ง ของทุกชุดแม่พิมพ์ ผลการทดลองพบว่าแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างคมดัดน้อย การสึกหรอของพันธ์จะ เกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูงกว่าแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างคมดัดมาก ความสูงของครีบเพิ่มขึ้นตามปริมาณการสึก หรอของแม่พิมพ์ เมื่อเกิดการสึกหรอจน ถึงสภาวะคงที่ ซึ่งตัวบ่งชี้ถึงปริมาณการสึกหรอของ แม่พิมพ์คือแรงในแนวตั้งฉาก กับแนวแกนของพันธ์ และดูจากค่าของแรงดัดชิ้นงาน ซึ่งชุดแม่พิมพ์ ที่ช่องว่าง คมดัดร้อยละ 3 ร้อยละ 8 และ ร้อยละ 18 ของความหนาชิ้นงาน แรงดัดมีการ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นร้อยละ 24.91, 23.79 และ 21.17 ของความหนาชิ้นงานตามลำดับ เมื่อ เปรียบเทียบกับแรงดัดจากแม่พิมพ์เริ่มต้น

การอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ SKD61 [5]

(วรวิทย์ จุฑาฤทธิ, ภูมิษฐ์ ลักษมีมงคลชัย) ปริญญาโทชั้นนี้เป็นการศึกษากระบวนการอบ ชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11และ SKD61 โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค, สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ SKD61เมื่อผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน โดยการทดลองนั้นได้มีการนำชิ้นงานไปผ่าน กระบวนการอบปกติ, ชุบแข็ง,อบคืนตัว, ชุบแข็งมาร์เทมเปอริง และชุบแข็งออสเทมเปอริง ผลการ ทดลองจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานพบว่าธาตุต่างๆที่มีอยู่ในเหล็กกล้าเครื่องมือ เช่น โครเมียม จะไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ขณะอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็ง อนุภาคคาร์ไบด์ ในชิ้นงานจะยังคงไม่ละลายและ จะฝังอยู่ในมาร์เทนไซด์ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้น จึงทำให้ชิ้นงานที่ ผ่านการอบชุบมาจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ ที่มีปริมาณคาร์บอนมากจะสามารถอบชุบให้มีความแข็งได้สูง

## 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 [2]

เหล็ก SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มงานเย็นที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและ โครเมียมในปริมาณสูง จัดเป็นเหล็กกล้าในกลุ่ม 12% เลเดอไนต์โครเมียมสตีล ซึ่งมีความต้านทาน ต่อการเสียดสีดีมากนอกจากนี้ยังมีการผสมธาตุโมลิบดีนัมเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง ให้ความเหนียวแข็งแรงดี และยังมีการผสมธาตุวานาเดียมให้สูงถึง 1% เพื่อช่วยรักษาคมดัดให้มีความ แข็งคมและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ช่วยให้ทนต่อการเสียดสีและต้านทานต่อการสึกหรอได้สูง

มากขึ้น SKD 11 นี้ยังมีคุณสมบัติเด่นทางด้านการต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเหนือกว่าเหล็กกล้าในกลุ่ม 12% เลเดนูไรติกโครเมียมสตีลเกรดอื่น จึงสามารถทำไนไตรดิงได้ดี นิยมใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับงานปั๊ม งานตัด งานเพรส งานอัดขึ้นรูปเย็น ลูกรีด ใบมีดตัดโลหะ และงานที่ต้องทนกับการเสียดสีสูง ๆ และแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอมาก ๆ เช่น แม่พิมพ์ขึ้นรูปไฟเบอร์กลาส

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะทั่วไปของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

| ส่วนผสมทางเคมี<br>(% wt.) | คาร์บอน (C)            | โครเมียม (Cr) | โมลิบดีนัม (Mo) | วานาเดียม (V) |
|---------------------------|------------------------|---------------|-----------------|---------------|
|                           | 1.55 %                 | 12.0 %        | 0.7 %           | 1.0 %         |
| AISI                      | D2                     |               |                 |               |
| JIS                       | SKD-11                 |               |                 |               |
| DIN                       | 1.2379 / X155CrVMo12-1 |               |                 |               |

#### 2.5.1.1 คุณลักษณะเด่น (Significant Characteristics)

- 1) มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก
- 2) มีความเหนียวแรงพอใช้
- 3) ชุบแข็งได้ลึกมาก
- 4) มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก
- 5) สามารถชุบแข็งในเตาสัญญากาศได้
- 6) รักษาคมตัดให้มีอายุการใช้งานยาวนาน
- 7) ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี
- 8) เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง
- 9) ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ดี
- 10) สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้
- 11) สามารถเคลือบผิวด้วยเทคนิคพีวีดีได้

### 2.5.1.2 การอบชุบความร้อน (Heat Treatment)

1) อบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิ 830 -860 ° C ปล่อยให้เย็นในเตาความแข็งแรงไม่เกิน 250 HB

2) ชุบแข็ง (Hardening) ปกติกระทำที่อุณหภูมิ 1000 - 1050° C ชุบในน้ำมัน ,อากาศ หรือทำ Martempering ที่อุณหภูมิ 500 -550 ° C จะได้ความแข็ง 63 HRC ชุบแข็งพิเศษ (Special) กระทำที่อุณหภูมิ 1050 - 1080 ° C ชุบในน้ำมัน อากาศ หรือ Martempering ที่อุณหภูมิ 500 -550 ° C จะได้ความแข็ง 61 HRC

3) อบคืนตัว (Tempering) ชุบแข็งปกติกระทำที่อุณหภูมิ 525 ° C จะให้คุณสมบัติ Secondary Hardening ได้ค่าความแข็งสูงสุด 60 HRC ถ้าชุบแข็งพิเศษกระทำที่อุณหภูมิ 500 -525 ° C จะให้คุณสมบัติ Secondary Hardening ได้ค่าความแข็งสูงสุด 62 HRC ซึ่งสูงกว่าการชุบแข็งปกติ

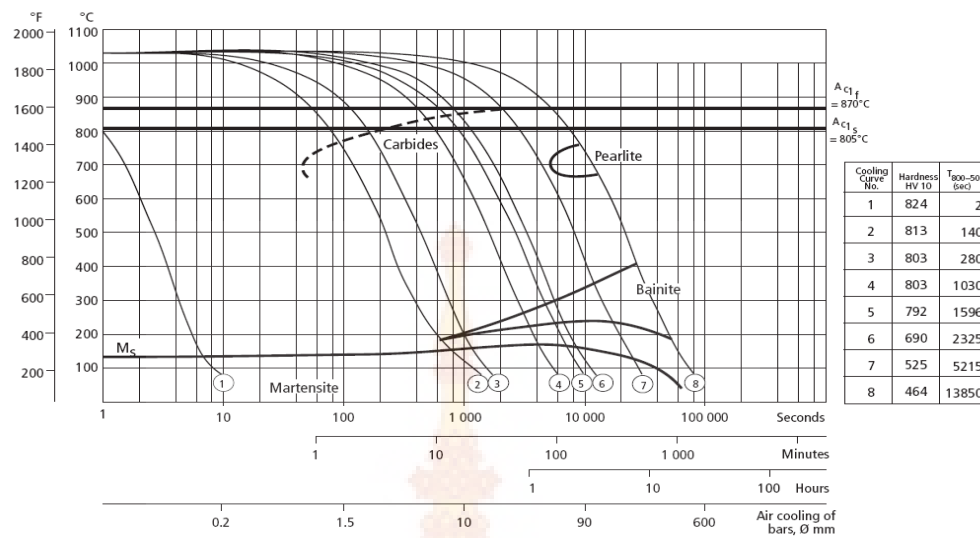
ซึ่งปรากฏจากแผ่นภูมิการอบคืนตัวเหตุผลอันสำคัญที่จะต้องทำความเข้าใจในที่นี้มี 2 ประการ

3.1) ทำไมความแข็งของเหล็กกล้าที่ได้หลังจากการชุบแข็งปกติ จึงได้สูงกว่าการชุบแข็งพิเศษ ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิชุบแข็งสูงกว่า ซึ่งตามหลักวิชาการแล้ว ความแข็งภายหลังการชุบแข็งที่อุณหภูมิสูงน่าจะได้สูงกว่า เพราะ การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คาร์ไบด์สลายตัวได้มากกว่า ซึ่งมีส่วนทำให้ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์สูง เมื่อทำการอบชุบในน้ำมัน ย่อมได้มาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูงกว่า ดังนั้นจากแผ่นภูมิการอบคืนตัว จึงมีบางอย่างที่ขัดกับหลักวิชาการ

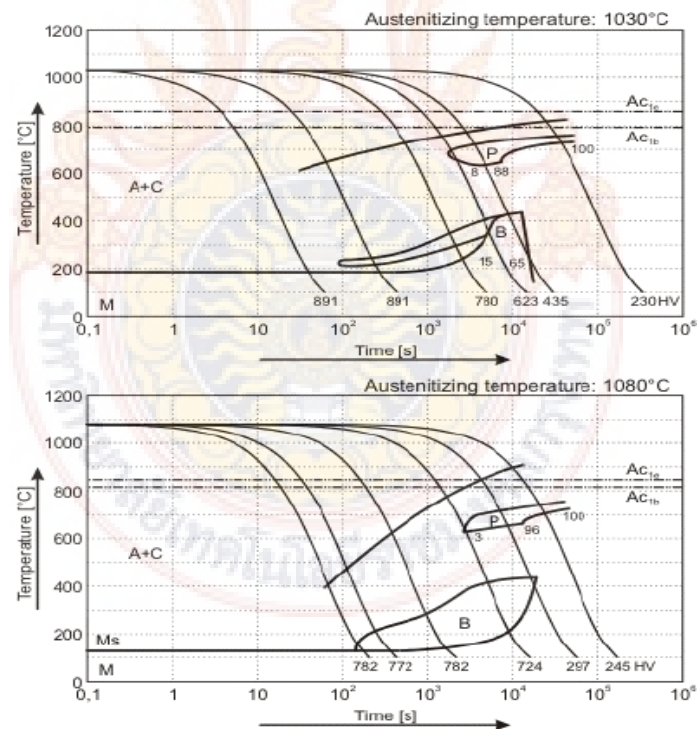
3.2) ทำไมความแข็งของเหล็กกล้าภายหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 -525 ° C (ช่วงที่เกิด Secondary Hardening) ปรากฏว่าการชุบแข็งพิเศษจะให้ค่าความแข็งสูงมากกว่าการชุบแข็งปกติ คำตอบที่ได้เป็นไปตามหลักวิชาการคือ ในขณะที่การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คาร์ไบด์สลายตัวได้มากทั้งธาตุคาร์บอนและธาตุผสม เช่นโครเมียม และโมลิบดีนัม จะสลายตัวได้มากในออสเทนไนต์ และเมื่อทำการชุบจะได้มาร์เทนไซต์ที่มีปริมาณธาตุผสมและคาร์บอนปริมาณสูง เมื่อทำการอบคืนตัว ธาตุผสมและคาร์บอนจะเคลื่อนไหวยมารวมกันเป็นคาร์ไบด์อีกครั้งหนึ่งและเป็นคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กละเอียดและกระจายได้มาก ทำให้ความแข็งของเหล็กกล้าผสมสูงขึ้นได้อีกมาก

## CCT-graph

Austenitizing temperature 1020°C (1870°F). Holding time 30 minutes



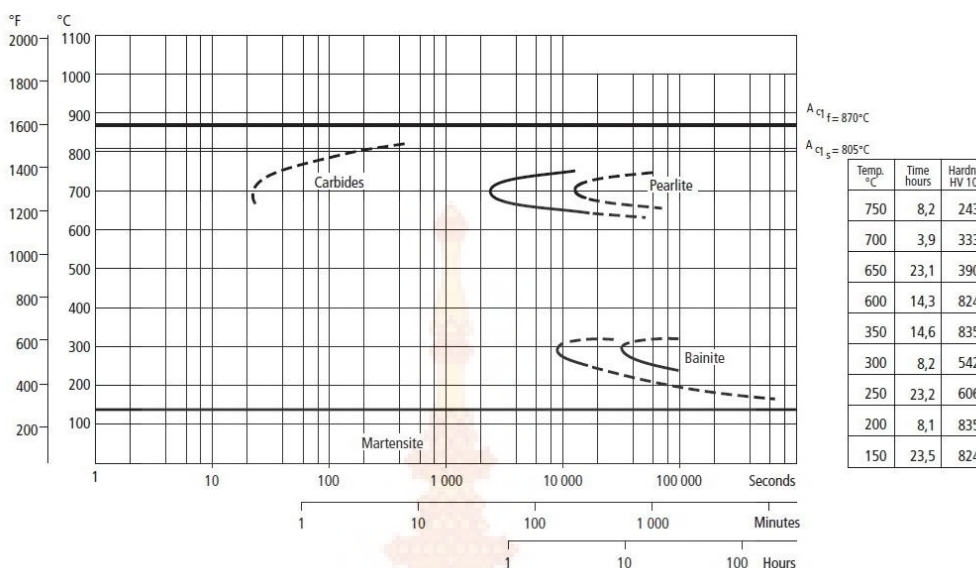
ภาพที่ 2.1 CCT- Graph ของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11[6]



ภาพที่ 2.2 Austenitizing Temperature ที่อุณหภูมิแตกต่างกันของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11[6]

TTT-graph

Austenitizing temperature 1020°C (1870°F). Holding time 30 minutes.



ภาพที่ 2.3 TTT-Graph ของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11[6]

### 2.5.2 การเชื่อมโลหะด้วยวิธีการเชื่อมไฟฟ้า

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า (Welding machines) เป็นแหล่งกำเนิดหรือแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอ เหมาะสมกับการอาร์คในขณะเชื่อมเป็นเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าซึ่งส่งมาตามสาย โดยเฉพาะสายไฟฟ้าที่ส่งมาใช้ตามบ้านมีแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 220 โวลต์ อันเป็นแรงดันที่ไม่เหมาะสมกับงานเชื่อม จะเป็นอันตรายต่อช่างเชื่อม เครื่องเชื่อมจะปรับแรงดันอันสูงนี้ให้ต่ำลงเหลือประมาณ 40 – 100 โวลต์ และผลิตกระแสให้เพิ่มขึ้น พร้อมทั้งควบคุมให้พอกับการเชื่อม มากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องเชื่อม ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 150 , 200 , 300 , 400 แอมแปร์ เป็นต้น เครื่องเชื่อมจึงเป็นอุปกรณ์ที่ขาดไม่ได้ สำหรับการเชื่อมโลหะ

ปัจจุบันเครื่องเชื่อมได้ถูกปรับปรุงพัฒนา ออกแบบ และผลิตมาจำหน่ายในท้องตลาด หลายรูปแบบ หลายนขนาด ช่างเชื่อมหรือผู้ใช้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจทางเทคนิคของเครื่องเชื่อม มากพอสมควร จึงจะสามารถเลือกเครื่องเชื่อมมาใช้งานได้เหมาะสมกับงาน

#### 2.5.2.1 การแบ่งประเภทของเครื่องเชื่อมแบ่งได้หลายชนิด ดังนี้

แบ่งตามลักษณะการจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ชนิด

2.5.2.1.1 ชนิดกระแสไฟฟงที่ (Constant Current: CC) เครื่องเชื่อมชนิดนี้จ่ายพลังงานออกมา โดยเขียนได้เป็นเคิร์ฟ (Curve) เมื่อวงจรปกติไม่มีกระแสไหลผ่าน กระแสเป็นศูนย์ (Zero current) แรงเคลื่อนจะขึ้นสูงสุด (ประมาณ 75 โวลต์) และแรงเคลื่อนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อ

ทำการเชื่อม และยังปรับค่ากระแสไฟสูงขึ้นมากเท่าไร ค่าแรงเคลื่อนก็จะยิ่งลดลงเป็นส่วนเท่านั้น คือถ้ากระแสเปลี่ยนแปลง แรงเคลื่อนจะเปลี่ยนแปลงตาม ช่างเชื่อมสามารถควบคุมกระแสไฟเชื่อมให้สูงหรือต่ำได้ขณะเชื่อม โดยเพียงแค่เปลี่ยนระยะห่างของการอาร์ค ถ้าระยะห่างการอาร์คเพิ่มขึ้นแรงเคลื่อนก็จะเพิ่มขึ้น กระแสไฟจะลดลง และถ้าระยะห่างของการอาร์คลดลงแรงเคลื่อนก็จะลดลงและกระแสก็จะเพิ่มขึ้นเครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่มีใช้กันมากกับการเชื่อมแบบธรรมดาด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ใช้ได้ทั้งกระแสไฟตรงและกระแสไฟสลับ ใช้กับเครื่องเชื่อมแบบทิก เครื่องเชื่อมแบบคาร์บอนอาร์ค การเซาะร่อง และการเชื่อมแบบสตั๊ด (Stud welding) เป็นต้น ใช้ได้ทั้งกับเครื่องเชื่อมแบบหมุนและแบบไม่หมุน ซึ่งเครื่องเชื่อมแบบหมุนอาจจับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ก็ได้

2.5.2.1.2 ชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage: CV) เครื่องเชื่อมชนิดนี้จ่ายพลังงานออกมาโดยเขียนเป็นแผนภาพ ลักษณะเส้นเคิร์ฟจะเรียบ เมื่อวงจรเปิดจะไม่มีกระแสไหลผ่าน กระแสเป็นศูนย์แอมป์ แรงเคลื่อนจะอยู่ประมาณ 30 โวลต์ และเมื่อทำการเชื่อมหรือวงจรปิด แรงเคลื่อนก็ยังคงเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แม้กระแสจะเพิ่มขึ้นเป็น 200, 400 หรือ 600 ก็ตาม ดังรูป เส้นเคิร์ฟจะตกลาดเอียงเล็กน้อยถ้ามีกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นมาก ๆ จะเห็นได้ว่า เครื่องเชื่อมชนิดนี้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลา ไม่ว่ากระแสไฟเชื่อมจะเปลี่ยนไปก็ตาม เครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่ เหมาะสำหรับเครื่องเชื่อมหรือกระบวนการเชื่อมที่เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติหรือเป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเครื่องเชื่อมที่การป้อนลวดเชื่อมแบบอัตโนมัติมีความเร็วในการป้อนลวดคงที่ เช่น การเชื่อมมิก หรือการเชื่อมฟลักซ์ (SAW) เป็นต้น เครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่มักจะผลิตออกมาเป็นไฟกระแสตรงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่ว่าจะเป็นเครื่องแบบจับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ หรือมือแปลงเรียงกระแสก็ตาม

#### 2.5.2.2 โลหะวิทยางานเชื่อมโลหะ

##### 2.5.2.2.1 พื้นฐานของงานเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกัน ส่วนมากต้องอาศัยพลังงานจากความร้อนให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงจนถึงจุดหลอมละลาย เช่น การเชื่อม TIG, MIG, SMAW เป็นต้น บางขบวนการเชื่อมอาจใช้แรงกดอัดเข้าช่วยร่วมกับความร้อน เช่น การเชื่อมจุด (Spot) เป็นต้น พลังงานจากการเชื่อมในรูปของ ความร้อนสำหรับการอาร์ค จะได้พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปสู่ชุดดังกล่าว

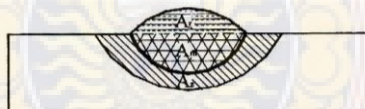
$$H_{net} = \frac{p}{v} = \frac{f_1 EI}{v}$$

|       |           |                                                    |
|-------|-----------|----------------------------------------------------|
| เมื่อ | $H_{net}$ | คือ พลังงานที่ใส่เข้าไป, จูล/มม.                   |
|       | $P$       | คือ กำลังที่ใส่เข้าทั้งหมดของแหล่งความร้อน, วัตต์  |
|       | $V$       | คือ ความเร็วที่แหล่งความร้อนเคลื่อนที่, มม./วินาที |
|       | $E$       | คือ แรงดันไฟฟ้า, โวลต์                             |
|       | $I$       | คือ กระแสเชื่อม, แอมป์                             |
|       | $F_1$     | คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน                   |

เราสามารถหาประสิทธิภาพของการหลอมละลาย ( $f_2$ ) สามารถหาจากสมการ

$$f_2 = \frac{QA}{H_{net}} = \frac{QA_w v}{f_1 P} = \frac{QA_w v}{f_1 EI}$$

|       |       |                                                                                                                            |
|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $Q$   | คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการหลอมต่อปริมาตรโลหะ<br>$Q = (T_m + 273)^2$ ; เมื่อ $T_m$ เป็นอุณหภูมิหลอมละลาย $^{\circ}C$ |
|       | $A_w$ | คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม                                                                                             |



ภาพที่ 2.4 แสดงพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมบนชิ้นงาน

จากรูปข้างต้น แบ่งพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมออกได้ 3 ส่วน ดังนี้

$A_m$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อมที่ล้อมรอบด้วยแนวหลอมและส่วนบนของชิ้นงาน

$A_r$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อมที่เป็นส่วนเพิ่ม

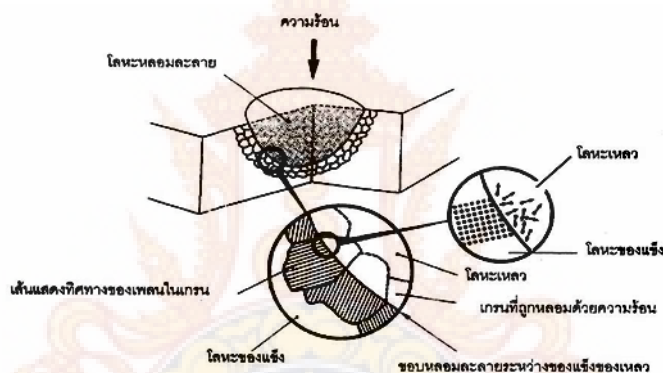
$A_z$  คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่มีผลกระทบจากความร้อนถึงบริเวณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติบริเวณนี้ว่า บริเวณกระทบร้อน (HAZ)

#### 2.5.2.2.2 โลหะวิทยาของการเชื่อม (Welding Metallurgy)

การเชื่อมโลหะเกิดความร้อนในการเชื่อมเสมอ (Heat flow in welding) ทั้งแนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา ของงานเชื่อมต้องให้ความสำคัญในการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังนี้

##### 1.) อุณหภูมิสูงสุดและการกระจายของบริเวณกระทบร้อน (HAZ)

การเชื่อมอาร์คเกิดความร้อนทำให้ลวดเชื่อมหลอมรวมกับโลหะงานบางส่วนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) เมื่อเกิดการแข็งตัวเป็นโลหะเชื่อม (Weld metal) ส่วนของโลหะงานที่อยู่ถัดจากแนวเชื่อม ซึ่งหลอมละลายแต่ได้รับผลกระทบจากความร้อนขณะเชื่อม เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ)



ภาพที่ 2.5 แสดงการหลอมละลายและการเกิดบ่อหลอมละลายของงานเชื่อมโลหะ

##### 2.) อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) และอัตราการเย็นตัววิกฤต

อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมขึ้นอยู่กับ อัตราการให้ความร้อนขณะเชื่อมความหนาของแผ่นงาน อุณหภูมิแผ่นงาน ความสามารถนำความร้อนของแผ่นงาน และลักษณะของแนวเชื่อม อัตราเย็นตัวของแนวเชื่อมจะสูง เมื่อโลหะงานได้รับความร้อนสูง แผ่นงานบาง โลหะงานมีการนำความร้อนต่ำและการเชื่อมแบบต่อชน ส่วนการเชื่อมแบบฟิลเล็ท หรือเตรียมแนวเชื่อมลักษณะอื่นจะมีโลหะงานล้อมรอบโลหะเชื่อมมากกว่าแบบต่อชน จึงสามารถระบายความร้อนจากแนวเชื่อมได้มากกว่าทำให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วว่าการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) จะทำให้อัตราการเย็นตัวลดลง เป็นหลักการที่ใช้กันในงานเชื่อม โดยเฉพาะกับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ในการเชื่อมหากอัตราการเย็นตัวสูงจนเกิดการเปลี่ยน

โครงสร้างในบริเวณกระทบบร้อนจะทำให้เกิดความเค้นต่อการเกิดรอยแตก (crack) ภายใต้อิทธิพลจากความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นจากก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ )

การอุ่นชิ้นงานด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จะช่วยลดอัตราการเย็นตัว การเชื่อมเหล็กต้องพิจารณาอัตราการเย็นตัววิกฤต เพื่อที่จะเป็นขอบเขตในการเชื่อ่ว่าไม่ควรเกินอัตราเย็นตัวนี้ และการอุ่นชิ้นงานที่พอเหมาะสำหรับการลดอัตราการเย็นตัวลงเพื่อไม่ให้เกิดจุดวิกฤต การอุ่นชิ้นงานหากอุ่นมากเกินไป จะทำให้การเชื่อมยาก และยังเพิ่มบริเวณกระทบบร้อนขึ้นอีก บางงานการอุ่นชิ้นงานไม่มีความจำเป็น

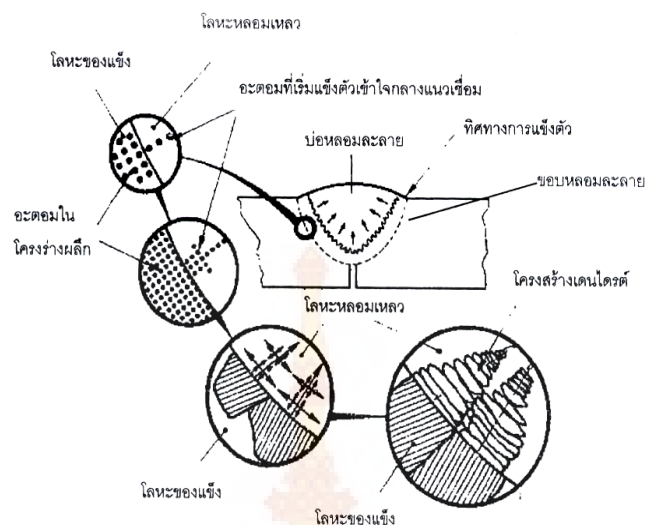


ภาพที่ 2.6 แสดงรอยแตกบริเวณกระทบบร้อนแนวเชื่อมในงานเหล็กกล้าความแข็งแรง

ดังนั้นการเชื่อมเราควรควบคุมอัตราการเย็นของการเชื่อม วิธีหนึ่งที่ใช้คือการอุ่นชิ้นงาน โดยอุณหภูมิอุ่นงานจะต้องเหมาะสมและไม่เกินค่าอัตราการเย็นตัววิกฤตสำหรับงานเชื่อมเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง ควรพิจารณา % CE ด้วย

### 3.) อัตราการแข็งตัว (Solidification Rate)

การแข็งตัวของโลหะเชื่อมอย่างต่อเนื่อง จะให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกันไป ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลด้วย เวลาในการแข็งตัวของเนื้อโลหะแปรผันตามความร้อนเข้าเมื่อเชื่อมโลหะจะเกิดการหลอมละลายรวมกันระหว่างโลหะงาน (Base Metal) กับโลหะเติม (Filler metal) เกิดบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) แล้วเกิดการแข็งตัวเป็นโลหะเชื่อม (Weld Metal) บริเวณที่สัมผัสกับโลหะงานจะเกิดการแข็งตัวของรอยเชื่อม เกิดลักษณะประหนึ่งหุบเนื้อแนวเชื่อมลงในโลหะงานที่อยู่โดยรอบ ขณะแข็งตัวความร้อนจะถ่ายเทจากรอยเชื่อมทำให้เกิดโครงสร้างเดนไดรต์ของแนวเชื่อมเติบโตแผ่ยาว พุ่งเข้าหาใจกลางแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม

### 2.5.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมไฟฟ้านี้ มีดังนี้

#### 2.5.2.3.1 เครื่องเชื่อม (WELDING MACHINE)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งแรงดัน และกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสม ที่จะทำให้เกิดการอาร์คที่มีความร้อนสูงมากพอที่จะทำการเชื่อมได้ กระแสไฟฟ้าทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ใช้ทำการเชื่อมได้ทั้งสองอย่าง ดังนั้นเครื่องเชื่อมจึงถูกผลิตขึ้นมาหลายชนิด ที่ใช้กันแพร่หลาย แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ 3 ชนิด

##### 1.) แบบหม้อแปลง

ผลิตกระแสไฟสลับ (AC) โครงสร้างหลักประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ พันอยู่บนแกนเหล็ก พร้อมชุดปรับค่ากระแสไฟซึ่งมีแบบ "TAP" หรือแบบปรับกระแสต่อเนื่องโดยใช้ระบบ "MECHANIC"

##### 2.) แบบหม้อแปลงเรียงกระแส

โครงสร้างคล้ายกับเครื่องแบบหม้อแปลงกระแสไฟสลับ เพียงแต่เพิ่มวงจรเรียงกระแสเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟตรง, เครื่องชนิดส่วนใหญ่ใช้ได้ทั้งกระแสไฟสลับ (AC) และกระแสไฟตรงแบบชั่วตรง (DCSP) หรือ กลับชั่ว (DCRP) ชุดปรับค่ากระแสไฟเหมือนกับเครื่องกระแสสลับ และมีแบบปรับด้วย "RHEOSTAT"

##### 3.) แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องเชื่อมนี้จะประกอบด้วย สองส่วนหลักคือส่วนที่ 1 ตัวจับเคลื่อนซึ่งอาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องยนต์ไปจับ ส่วนที่ 2 ตัวกำเนิดกระแสไฟ ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟเชื่อมอย่างคงที่สม่ำเสมอ และบางชนิดนอกจากจะปรับค่ากระแสไฟเชื่อมได้แล้วยังปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้อีกด้วย

#### 2.5.2.3.2 หัวจับลวดเชื่อม (ELECTRODE HOLDER)

เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับเป็นมือถือและจับยึดลวดเชื่อมขณะทำการเชื่อมโดยจะต่อกับสายไฟที่มาจากเครื่องเชื่อมขนาดจะบอกเป็นจำนวนแอมป์ที่ใช้เชื่อม เช่น 200 300 500 แอมป์

#### 2.5.2.3.3 กีมจับสายดิน (GROUND CLAMP)

เป็นอุปกรณ์ใช้จับยึดสายดินให้แน่นกับชิ้นงาน

#### 2.5.2.3.4 สายไฟเชื่อม (CABLE)

สายไฟเชื่อมนี้จะต้องเป็นแบบที่ใช้งานหนักสามารถอ่อนตัวได้จนวนหุ้มจะต้องคงทนต่อการใช้งานหยาบ ๆ ในโรงงานได้ สายไฟเชื่อมจะต่อกับอุปกรณ์เชื่อมโดยใช้หัวและข้อต่อ ซึ่งจะต้องต่อให้แน่น มิฉะนั้นบริเวณข้อต่อนั้นจะเกิดความร้อนมาก จนไหม้สายไฟได้

#### 2.5.2.3.5 หน้ากากเชื่อม (HELMET AND HAND SHIELD)

ใช้ป้องกันรังสีต่าง ๆ สะเก็ดโลหะร้อนจากการเชื่อม เลนส์กรองแสงอุลตราไวโอเล็ตจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะกับงาน ตัวอย่างเช่น

AWS เบอร์ 6 - 7 เชื่อมโดยใช้กระแสไฟประมาณ 30 แอมป์

AWS เบอร์ 8 เชื่อมโดยใช้กระแสไฟประมาณ 75 แอมป์

AWS เบอร์ 10 เชื่อมโดยใช้กระแสไฟประมาณ 200 แอมป์

AWS เบอร์ 14 เชื่อมโดยใช้กระแสไฟประมาณ 400 แอมป์

#### 2.5.2.3.6 ชุดหนัง (APRON AND GLOVES)

เป็นสิ่งจำเป็นมากในการเชื่อมไฟฟ้าใช้เพื่อป้องกัน รังสีอุลตราไวโอเล็ต ความร้อนและสะเก็ดไฟเชื่อมนอกจากนี้ยังลดอันตรายจากไฟฟ้าดูดได้อีกด้วย

#### 2.5.2.3.7 ก้อนเคาะสแลก และแปรง (CLEANING TOOLS)

ใช้สำหรับเคาะสแลก เม็ดโลหะ และทำความสะอาดแนวเชื่อม

### 2.5.3 ลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrodes)

#### 2.5.3.1 ความหมายของลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrodes)

จะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์คโลหะงาน ทำให้เกิดความร้อนสูงจนกระทั่งโลหะหลอมละลาย ในขณะที่ลวดเชื่อมเองก็จะหลอมละลายและเติมลงบนเนื้อโลหะเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวกลายเป็นแนวเชื่อม เพื่อให้แนวเชื่อมแข็งแรงโลหะที่จะเชื่อมและลวดเชื่อมต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกัน

#### 2.5.3.2 ชนิดของลวดเชื่อมโลหะ

ลวดเชื่อมโลหะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) ลวดเชื่อมเปลือย (Bare Electrode)
- 2) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Flux Covered electrode)

ในการวิจัยครั้งนี้จะกล่าวเฉพาะลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ที่ใช้เชื่อมเท่านั้น

ลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ (Flux Covered electrode) หมายถึงลวดเชื่อมไฟฟ้าที่เป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและตัวทำให้เกิดการอาร์คกับโลหะงานจนกระทั่งโลหะหลอมละลาย ในขณะที่ลวดเชื่อมเองก็จะหลอมละลายซึ่งสารเคมีที่หุ้มแกนลวดเชื่อมจะหลอมละลายทำให้เกิดเป็นกลุ่มแก๊สเพื่อป้องกันการรวมตัวของอากาศภายนอกไม่ให้เข้าร่วมตัวกับเนื้อแนวเชื่อม



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบของลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์

### 2.5.3.3 มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้า

การใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้าในวงการอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพ ดังนั้นจึงมีสถาบันหรือสมาคมที่ทำหน้าที่เป็นแกนกลาง เพื่อกำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับของวงการอุตสาหกรรมมีอยู่มากมายหลายมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

- 1) มาตรฐานสมาคมการเชื่อมไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกา (AWS) ย่อมาจาก American Welding Society เป็นการกำหนดมาตรฐานที่กำหนดทั้งลวดเชื่อมไฟฟ้าและเชื่อมแก๊สตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อม คือ E 6013, E 6010, E 7018, ER 308L, RG 60, RG 45, เป็นต้น
- 2) มาตรฐานสมาคมการทดสอบวัสดุของประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของสมาคมการตรวจสอบและวัสดุของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ย่อมาจาก American Society For Testing Materials หรือ American Standard of Testing Materials
- 3) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของประเทศไทย (BS) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของประเทศไทย (BS) ย่อมาจาก British Standard ตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้า คือ E 107, E 217, E 207 เป็นต้น
- 4) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของออสเตรเลีย (AS) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของออสเตรเลีย (AS) ย่อมาจาก Australia Standard ตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้าคือ B107, B 217, B 207 เป็นต้น
- 5) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าระบบสากล (ISO) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าตามองค์การนานาชาติหรือระบบสากล (ISO) ย่อมาจาก International Standard Organization ตัวอย่าง สัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้าคือ E 234R15, E 2233R12, เป็นต้น
- 6) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของญี่ปุ่น (JIS) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของญี่ปุ่น (JIS) ย่อมาจาก Japanese Industrial Standard ตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้าคือ D 433 2AR 7, DIN 1913, E 5122RR11160, เป็นต้น
- 7) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของเยอรมัน (DIN) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของเยอรมัน (DIN) ย่อมาจาก Deutsche Industrial Norm ตัวอย่าง สัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้าคือ D 433 2a r 7, DIN 1913, E 5122RR11160, เป็นต้น
- 8) มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของประเทศไทย TIS มาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้าของประเทศไทย (TIS) ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก) ย่อมาจาก Thailand Industrial Standard ตัวอย่างสัญลักษณ์ลวดเชื่อมไฟฟ้าคือ E 490 3 B 10, E 513 RR 160 32, E513 RR 180 32, เป็นต้น

#### 2.5.3.4 ชนิดของสารพอกหุ้ม

คุณสมบัติของสารพอกหุ้มขึ้นอยู่กับความหนาของสารพอกหุ้ม ส่วนประกอบของสารพอกหุ้มและชนิดของสารพอกหุ้ม โดยทั่วไปประกอบด้วยสารพอกหุ้มที่สำคัญ 4 ชนิด มีอยู่ด้วยกัน 3 ขนาด คือ

- 1) สารพอกหุ้มบาง (d) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1.2d
- 2) สารพอกหุ้มหนานปานกลาง (m) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1.2-1.55d
- 3) สารพอกหุ้มหนา (s) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.55d (d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด)

#### 2.5.3.5 การเก็บรักษาลวดเชื่อมไฟฟ้า

ลวดเชื่อมทุกชนิดราคาแพง การเก็บรักษาก่อนที่จะนำไปใช้งานจะต้องระมัดระวังมากเพราะว่า ลวดเชื่อมจะเสื่อมคุณภาพในการใช้งาน เช่น ฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมไฟฟ้ามีความชื้นสูงเวลานำไปใช้งานได้นานไม่เกิน 6 เดือนเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมไฟฟ้า การเก็บรักษาลวดเชื่อมไฟฟ้าเพื่อยืดอายุการใช้งานต้องปฏิบัติ ดังนี้

- 1) เก็บไว้ในที่เกิดความชื้นได้ยาก เช่น ในถุงพลาสติกที่เชื่อมปิดทั้งหมด เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปทำให้อากาศเข้าไปทำให้เกิดความชื้นได้
- 2) เก็บไว้ในที่มั่นใจว่าไม่มีน้ำทำให้ลวดเชื่อมไฟฟ้าเปียกชื้น
- 3) เก็บบรรจุกล่องให้แข็งแรง ป้องกันฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมไฟฟ้าแตกชำรุดเสียหายก่อนที่จะนำไปใช้งานขณะทำการขนย้าย

เมื่อลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์เกิดความชื้น หรือคาดว่าเกิดความชื้นเนื่องจากเก็บเอาไว้มานานเกินไป ก่อนที่จะนำไปใช้งานควรทำการอบให้แห้งก่อน เตาที่ใช้ในการอบควรใช้เตาไฟฟ้า หรือเตาอบลวดเชื่อมโดยเฉพาะ สามารถตั้งอุณหภูมิได้ตามต้องการ ในการอบลวดเชื่อมไฟฟ้าก่อนนำไปใช้เชื่อมควรอบที่อุณหภูมิไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบ 1-2 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อมไฟฟ้าและให้ศึกษาจากคู่มือลวดเชื่อมของแต่ละบริษัทผู้ผลิต

#### 2.5.4 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) [6]

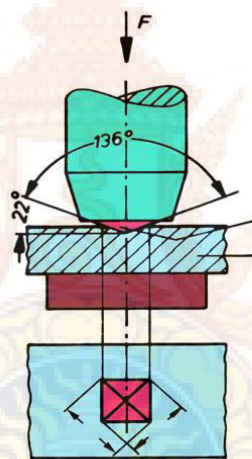
เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม  $136^\circ$  (เป็นมุมที่มองเห็นใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้

ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854 P}{d^2} \quad \dots (\text{สมการที่ 2.1})$$

โดยที่

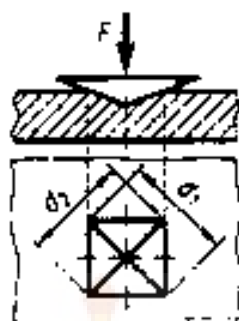
|    |     |                                               |
|----|-----|-----------------------------------------------|
| HV | คือ | ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
| P  | คือ | แรงกด (kgf)                                   |
| d  | คือ | ขนาดเส้นทะแยงมุม d1 และ d2 เฉลี่ย (mm)        |



ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะของรอยกดแบบวิกเกอร์ [7]

#### 2.5.4.1 หลักการทดสอบ

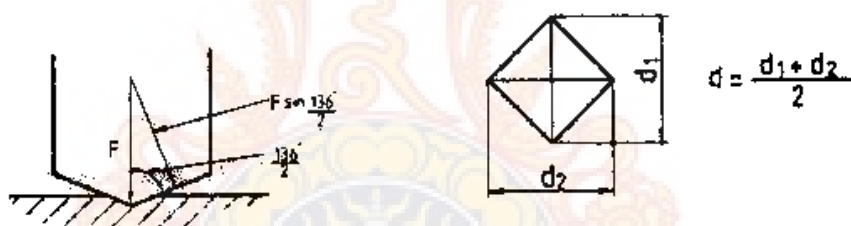
สำหรับหลักการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ ก็เหมือนกับการทดสอบความแข็งบริเนลล์ ต่างกันที่ใช้หัวกดทดสอบเป็นเพชรรูปประมิตฐานสี่เหลี่ยมจตุรัสกดลงไปบนผิววัสดุ ชิ้นทดสอบด้วยแรงกดทดสอบคงที่ ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ให้เลือกใช้ตั้งแต่ 1 kk. แรง ถึง 120 kk.แรง เหตุนี้เองจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม สำหรับวัดความแข็งของวัสดุได้หลายชนิด ตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุแข็งมากภายหลังจากการกดชั่วระยะเวลาหนึ่งจึงเอาแรงกดออก ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวรบนผิวโลหะชิ้นทดสอบ แล้ววัดขนาดเส้นทะแยงมุมของรอยบุ๋มเพื่อหาค่าความแข็งต่อไปดังรูปที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มเพื่อหาค่าความแข็ง [7]

#### 2.5.4.2 หลักการทดสอบความแข็งของวิกเกอร์ส

สำหรับค่าความแข็งวิกเกอร์สก็จะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กดทดสอบต่อพื้นที่ผิวเอียงของรอยบุ๋มซึ่งคำนวณได้ดังนี้



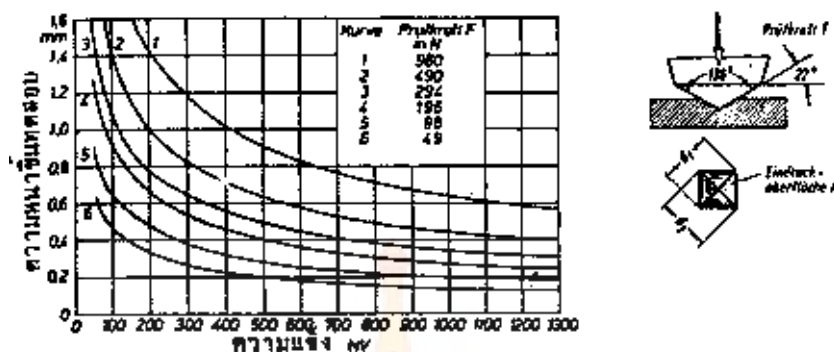
ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงรอยบุ๋มและแรงกดทดสอบ [7]

#### 2.5.4.3 ข้อพิจารณาในการทดสอบ

จากที่ทราบแล้วว่า การทดสอบความแข็งวิกเกอร์สมีหลักการเหมือนกับการทดสอบความแข็งบริเนลล์ ดังนั้นก็มีข้อควรพิจารณาในการทดสอบ คล้ายๆ กันด้วยดังนี้

1) ผิวของชิ้นทดสอบต้องเรียบ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มที่แน่นอน และจะทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้ถูกต้องด้วยเช่นกัน

2) ความหนาของชิ้นทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มหลังจากกดทดสอบแล้วไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงรูปใดๆ ให้เห็นทางด้านหลังของชิ้นทดสอบด้วย หรือพิจารณาความหนาของชิ้นทดสอบอย่างน้อยที่สุดที่ทดสอบความแข็งวิกเกอร์สได้เมื่อเลือกใช้แรงกดทดสอบขนาดต่างๆ โดยดูจากกราฟ ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและแรงกดทดสอบ [7]

3) ตำแหน่งกดทดสอบ ควรมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยบุ๋มที่อยู่ข้างเคียงกันหรือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของรอยบุ๋มจากขอบของชิ้นทดสอบ ควรมีห่างเป็นอย่างน้อย 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋ม

4) สำหรับการทดสอบบนผิวโค้งของทรงกลม หรือทรงกระบอก ถ้า  $d$  คือเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยบุ๋ม  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมหรือทรงกระบอกมาตรฐานนี้ใช้ได้เมื่อ

$$d/D < 0.004 \text{ สำหรับผิวของทรงกลม}$$

$$d/D < 0.009 \text{ สำหรับผิวของทรงกระบอก}$$

#### 2.5.4.4 สัญลักษณ์ความแข็งวิกเกอร์

ความแข็งวิกเกอร์ใช้สัญลักษณ์ HV สำหรับการระบุความแข็งวิกเกอร์ให้เขียนเลขค่าความแข็ง ต่อด้วยสัญลักษณ์ HV แล้วตามด้วยตัวเลขแสดงแรงกดทดสอบ เป็นนิวตัน และเวลาที่ใช้กดเป็นวินาที ถ้าระยะเวลาที่ใช้กดตามปกติ 10 - 15 วินาที ไม่จำเป็นต้องระบุระยะเวลา แต่ถ้าใช้ระยะเวลาทดสอบเป็นอย่างอื่นต้องกำหนดเป็นแต่ละกรณี ดังตัวอย่าง

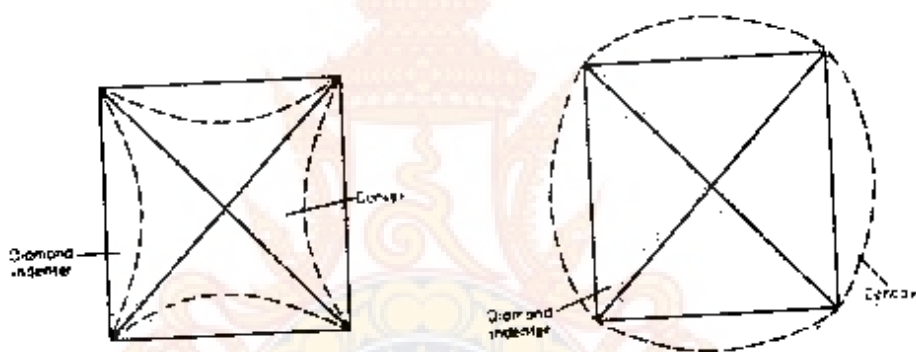
1) 640 HV 294.2 หมายถึง ความแข็งวิกเกอร์ 640 ใช้แรงกดทดสอบ 294.92 นิวตัน ( 30 กิโลกรัม ) เป็นเวลา 10 - 15 วินาที

2) 640 HV 294.2 / 20 หมายถึง ความแข็งวิกเกอร์ 640 ใช้แรงกดทดสอบ 294.92 นิวตัน ( 30 กิโลกรัม ) เป็นเวลา 20 วินาที

#### 2.5.4.5 ข้อควรระวังในการทดสอบ

เพื่อให้ได้ผลการทดสอบถูกต้องและมีโอกาสผิดพลาดน้อยลง จึงมีข้อควรระวังในการทดสอบดังนี้

- 1) ต้องวางชิ้นทดสอบบนแท่นรองรับที่มั่นคงแข็งแรง เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างทดสอบและชิ้นทดสอบที่วางบนแท่นรองรับนั้นต้องตั้งได้ฉากกับปลายกดทดสอบ
- 2) การกดทดสอบจะต้องไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้น หรือการสั่นสะเทือน เพราะจะมีผลต่อเส้นทแยงมุมของรอยบวมได้
- 3) การทดสอบไม่ควรให้เกิดรอยบวมที่มีลักษณะโค้งเว้าหรือโค้งนูน เพราะจะทำให้ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบวมผิดไปดังรูป



ภาพที่ 2.13 รอยบวมที่มีลักษณะโค้งเว้าหรือโค้งนูน [7]

จากรูปจะเห็นว่ารูปร่างของรอยบวมผิดปกติ ต้องตรวจสอบสภาพของหัวกดทดสอบเพชรรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสทันที ถ้าผลการทดสอบบอกว่า สภาพของหัวกดทดสอบไม่ดี ก็ให้ทิ้งผลการทดสอบนั้นไป

#### 2.5.4.6 วิธีการทดสอบและผลการทดลอง

ในที่นี้จะกล่าวถึง วิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซล ตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 50351) ซึ่งมีลักษณะดังที่กล่าวมาแล้ว และเวลาทดสอบก็ดำเนินการตามวิธี ดังนี้

- 1) ประกอบหัวกดทดสอบ และปรับเครื่องทดสอบ เพื่อทดสอบความแข็ง
- 2) นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับ
- 3) กดคันโยกยาว ลงในตำแหน่งล่างสุด แล้วเลือกแรงกดทดสอบ

4) หมุนยกแท่นรองรับชิ้นทดสอบ ขึ้นมาจนภาพของผิวชิ้นทดสอบไปปรากฏชัดเจนจนภาพแล้วยึดชิ้นทดสอบให้แน่นด้วยหัวจับครอบชิ้นทดสอบ

5) กดคันโยกขึ้นลง หัวกดทดสอบก็เริ่มเคลื่อนที่ลงกดผิวชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระแทกขณะกด และปล่อยระยะเวลากดตามต้องการ

6) กดคันโยกยาวลงในตำแหน่งล่างสุด แล้ววัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มที่ปรากฏบนจอภาพ ซึ่งรับภาพผ่านเลนส์ขยาย โดยสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร และวิธีการวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มนั้น ควรวัดดังภาพที่ 2.13 แล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้ง  $d_1$  และ  $d_2$  เพื่อนำไปคำนวณหรือเปิดตารางความแข็งวิกเกอร์ส ต่อไป

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136 องศา และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด และสามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ

$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ / 2)} \quad \text{ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544} \quad \dots (\text{สมการที่ 2.2})$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

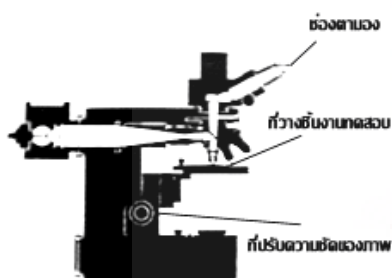
$$\begin{aligned} \text{จากความแข็ง Vickers} &= \text{แรงกด} / \text{พื้นที่รอยกด} \\ \text{จะได้} &= \frac{1.8544F}{d^2} \quad \dots (\text{สมการที่ 2.3}) \end{aligned}$$

เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers ( $\text{kg/mm}^2$ ) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)

การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขึ้นต้นจะใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการทดสอบนี้คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถใช้ในการทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ยอมรับมากกว่า

### 2.5.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microscope)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.14 (ก) ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ (ข) ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้ลำแสงอิเล็กตรอน

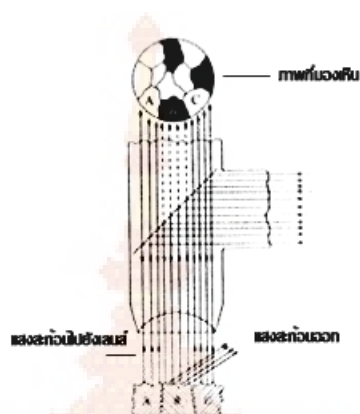
#### 2.5.5.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์นั้นจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยมีหลักการทำงานด้วยการปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นงานตรวจสอบ ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนผิวงานที่เรียบและตั้งฉากกับลำแสงจะสะท้อนแสงได้ดีกว่า โดยแสงจะสะท้อนกลับเข้าไปยังเลนส์ขยาย (Eye Piece) และเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบ ทำให้เห็นภาพดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ

แต่ถ้าลำแสงจากจุดกำเนิดแสงตกกระทบลงบนผิวงานที่ไม่เรียบและไม่ตั้งฉากลำแสง การสะท้อนจะไม่ดีเท่าที่ควร โดยที่จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายและเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบหรือในบางครั้งอาจไม่มีการสะท้อนเข้าตาผู้ตรวจสอบเลย จึงทำให้ผู้ตรวจสอบเห็นเป็นสีดำ ดังภาพที่ 2.16

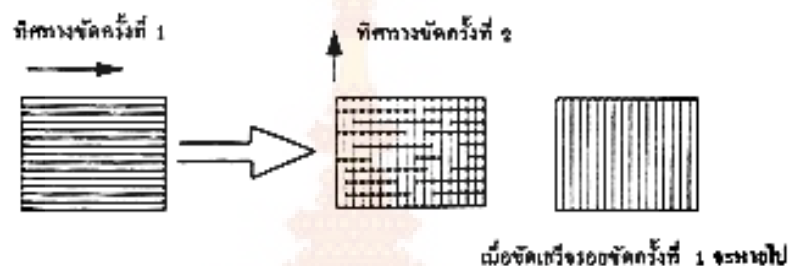


ภาพที่ 2.16 แสดงลักษณะลำแสงสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายทำให้เกิดภาพโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ

#### 2.5.5.2 การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้น ควรตัดสินให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาดสำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้วและมีความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมควรมีขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้อย่างง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบที่ได้กล่าวแล้วหลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นตอนต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และขัดจนถึงเบอร์ 600 ตามลำดับ ในการขัด ควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิกอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนั้นจนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



ภาพที่ 2.17 แสดงลักษณะแนวทางการขัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง

การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของ ชิ้นตรวจสอบ เกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบ โครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

2) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 - 0.3 ไมครอน

การขัดด้วยผงนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

3) การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยาซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้า เป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2 - 4 ผสมกับแอลกอฮอล์

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงาน

##### 3.1 บทนำ

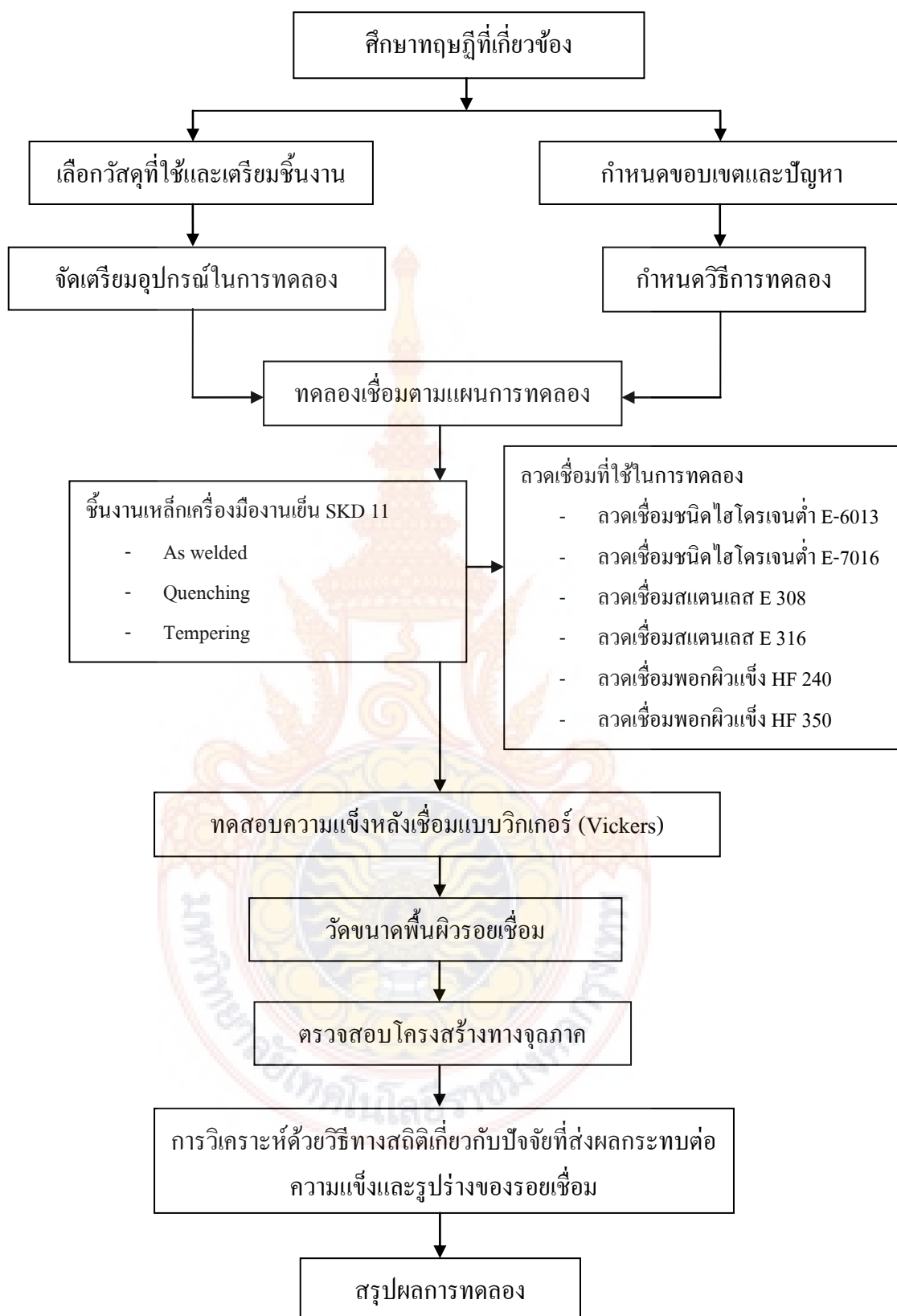
การผลิตเครื่องมือสำหรับงานอุตสาหกรรมแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่นแม่พิมพ์ตัดโลหะเย็น แม่พิมพ์เจาะรู ใบมีดตัด แม่พิมพ์ขึ้นรูป แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก แม่พิมพ์ดึงลาด แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น ส่วนมากผลิตโดยใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น และในกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ประเภทคาร์บอน และโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่ใช้งานมากที่สุดเพราะมีธาตุผสมหลักคือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม ซึ่งมีผลทำให้มีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอและการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น จัดอยู่ในกลุ่มของเกรด SKD 11 แต่ข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกลุ่มนี้คือความสามารถในการกลึง การกัด การไส และการเชื่อมต่ำมาก โดยจะมีความเหนียวลดลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่นๆ สำหรับแม่พิมพ์เมื่อใช้งานไปในระยะหนึ่งชิ้นส่วนอาจชำรุดเสียหายจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมเพื่อลดต้นทุนในการสั่งซื้อแม่พิมพ์ใหม่ การเชื่อมเพื่อซ่อมแซมเป็นวิธีที่ปฏิบัติกันโดยใช้การเชื่อมแบบหลอมละลาย แต่ในการทำวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ซึ่งการเชื่อมไฟฟ้าเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ควบคุมบ่อหลอมละลายของแบบเชื่อมได้ยาก และยังมีปัจจัยของลวดเชื่อมอีก โดยลวดเชื่อมแต่ละชนิดอาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะใดบ้าง

##### 3.2 วางแผนการทดลอง

###### 3.2.1 แผนการดำเนินงาน

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงหัวข้อโครงการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นแล้วจึงได้นำข้อมูลมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดแผนการดำเนินงานของโครงการดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกำหนดแนวทางในการปฏิบัติงานดังภาพที่ 3.1





ภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการปฏิบัติงาน

### 3.3 การดำเนินงาน

#### 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 เหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11

3.3.1.2 เครื่องเชื่อมไฟฟ้า

3.3.1.3 อุปกรณ์เชื่อม

3.3.1.4 ลวดเชื่อม 6 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

3.3.1.5 เครื่อง Wire cut

3.3.1.6 เตาอบชุบแข็ง

3.3.1.7 เครื่องขัดกระดาษทราย

3.3.1.8 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์

3.3.1.9 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

#### 3.3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 หรือเทียบเท่ากับมาตรฐาน AISI เท่ากับ D<sub>2</sub> เป็นเหล็กกล้าผสมประเภททำเครื่องมือเย็น มีส่วนผสมดังนี้ คาร์บอน 1.55 % โครเมียม 12.00 % โมลิบดีนัม 0.7 % วานาเดียม 1.0 % โดยกำหนดชิ้นงานให้มีขนาดเท่ากับ 76 มม. x 44 มม. x 6 มม. ตามมาตรฐาน ASTM มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 76 มม. x 44 มม. x 6 มม.

3.3.2.2 นำชิ้นงานมาทำการตกแต่งลบคมของชิ้นงาน

3.3.2.3 นำชิ้นงานมาขัดทำความสะอาดเพื่อเตรียมไว้ทำการทดลอง

#### 3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

3.3.3.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบวัสดุ SKD 11 ขนาด 76 มม. x 44 มม. x 6 มม.

3.3.3.2 ทดลองเชื่อมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อม

3.3.3.3 กำหนดค่า Parameters ในการทดลอง โดยกำหนดให้เปลี่ยนแปลงสภาพของชิ้นงานในการเชื่อม 3 ลักษณะ คือ SKD 11 Standard, SKD 11 Hardening, SKD 11 Tempering และกำหนดลวดเชื่อมที่ใช้ทดลอง 6 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

3.3.3.4 ทดลองเชื่อมชิ้นงาน

- 3.3.3.5 ตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire cut
- 3.3.3.6 นำชิ้นงานไปขัดเพื่อทำการทดสอบความแข็ง
- 3.3.3.7 ทำการทดสอบความแข็ง
- 3.3.3.8 นำผลของค่าความแข็งที่ได้ไปทำการวิเคราะห์
- 3.3.3.9 ทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคและวัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อม
- 3.3.3.10 สรุปผลการทดลอง

### 3.4 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

#### 3.4.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การศึกษาทฤษฎีที่นำมาใช้ประกอบงานวิจัยเพื่อนทำความเข้าใจกับหัวข้อของงานวิจัย และเลือกการทดลองที่เหมาะสมได้ทฤษฎีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้อาทิ เช่น

3.4.1.1 ทฤษฎีการเชื่อมโลหะด้วยวิธีการเชื่อมไฟฟ้า เป็นการศึกษากรรมวิธีในการเชื่อมไฟฟ้า และศึกษาข้อกำหนดต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมเพื่อที่จะปฏิบัติได้อย่างถูกต้องและไม่ทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานซึ่งในทฤษฎีนี้จะกล่าวถึง หลักการและความหมายของการเชื่อมไฟฟ้า, เครื่องมือ และอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า

3.4.1.2 ทฤษฎีข้อมูลเกี่ยวกับหลักเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุเช่น การอบชุบด้วยความร้อน การชุบแข็ง การอบคืนตัว เพื่อนำไปประกอบกับการออกแบบการทดลอง

3.4.1.3 ทฤษฎีลวดเชื่อมไฟฟ้า ศึกษาการทำงานของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมจะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์คโลหะงาน ทำให้เกิดความร้อนสูงจนกระทั่งโลหะหลอมละลาย ในขณะที่เดียวกัน ลวดเชื่อมเองก็จะหลอมละลายและเติมลงบนเนื้อโลหะเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวกลายเป็นแนวเชื่อม เพื่อให้แนวเชื่อมแข็งแรงโลหะที่จะเชื่อมและลวดเชื่อมต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกัน ชนิดของลวดเชื่อมโลหะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมเปลือย (Bare Electrode), ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Flux Covered electrode) ในการวิจัยครั้งนี้จะกล่าวเฉพาะลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ที่ใช้เชื่อมเหล็กเหนียวเท่านั้น

3.4.1.4 ทฤษฎีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness test) เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม  $136^\circ$  (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV

ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf

3.4.1.5 ทฤษฎีการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microscope) กล้องจุลทรรศน์นั้นจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยมีหลักการทำงานด้วยการปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นงานตรวจสอบ ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนผิวงานที่เรียบและตั้งฉากกับลำแสงจะสะท้อนแสงได้ดีกว่า โดยแสงจะสะท้อนกลับเข้าไปยังเลนส์ขยาย (Eye Piece) และเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบ ทำให้เห็นภาพดังกล่าวว่ามีขนาดใหญ่ขึ้น

### 3.4.2 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดลองและเตรียมชิ้นงาน

3.4.2.1 วัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานทดสอบคือ เหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เนื่องจากเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมไปถึงอุตสาหกรรมทางด้านแม่พิมพ์ ซึ่งเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เมื่อเกิดการชำรุดแล้วนำมาทำการซ่อมแซมโดยทำให้คุณสมบัติของวัสดุนั้นให้มีสภาพเหมือนเดิมขึ้นทำได้ยาก จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยทำการเลือกวัสดุประเภทนี้เหตุผล คือ ต้องการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น แล้วจึงนำไปประยุกต์ใช้และหาวิธีซ่อมแซมวัสดุที่ทำจากเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ต่อไป

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- 1) ตัดวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD11 ให้มีขนาด  $76 \times 44 \times 6$  มม. ตามมาตรฐาน ASTM
- 2) นำชิ้นงานที่ตัดแล้วนั้นมาทำการแต่งขอบให้เรียบร้อย
- 3) ทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดเพื่อเตรียมนำไปเชื่อมทดสอบ

3.4.2.2 ลวดเชื่อมที่ใช้ทดสอบเชื่อมกับชิ้นงาน ได้กำหนดไว้ 6 ชนิด ได้แก่

- 1) ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E-6013

Standard: JIS Z3212 D4313, AWS A5.1 E6013

เป็นลวดเชื่อมประเภทรูโทล์ เชื่อมได้ในทุกท่าเชื่อม และเชื่อมได้ง่ายในท่าเชื่อมตั้งลง สะเก็ดกระเด็นน้อย และแนวเชื่อมสวยงาม เชื่อมชิ้นงานบาง ๆ ได้ดีโดยเกิดการบิดตัวน้อยมาก

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 6013

| C    | Si   | Mn   | P     | S     |
|------|------|------|-------|-------|
| 0.08 | 0.30 | 0.37 | 0.012 | 0.010 |

## 2) ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E-7016

Standard: JIS Z3212 D5016, AWS A5.1 E7016

เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ เชื่อมได้ในทุกท่าเชื่อม เนื้อแนวเชื่อมมีคุณสมบัติทนการแตกร้าวเป็นเลิศ คุณสมบัติทางกลและคุณภาพหลัง X-ray เป็นเยี่ยม เชื่อมในท่าเหนือศีรษะและทำดั่งได้ง่าย

### ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 7016

| C    | Si   | Mn   | P     | S     |
|------|------|------|-------|-------|
| 0.08 | 0.60 | 0.94 | 0.011 | 0.006 |

## 3) ลวดเชื่อมสแตนเลส E308

Standard: JIS Z3221 D308-16, AWS A5.4 E308-16

ลวดเชื่อม NC-38 เป็นลวดเชื่อมเกรด AWS A5.4 E308-16 เหมาะสำหรับงานเชื่อมสแตนเลสเกรด 304 สามารถใช้ได้ทุกท่าเชื่อม ลวดเชื่อม NC38L เป็นลวดเชื่อมเกรด 304 เป็นลวดเชื่อมชนิด LOW CARBON

### ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 308

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|
| 0.06 | 0.35 | 1.06 | 0.021 | 0.004 | 9.51 | 20.14 |

## 4) ลวดเชื่อมสแตนเลส E316

Standard: JIS Z3221 D316L-16, AWS A5.4 E316L-16

ลวดเชื่อม NC-36 เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดโลม – ไตดาเนีย ให้รอยเชื่อมที่เป็นโครงสร้างเป็นออสเตนนิติก และมีโครงสร้างเฟอร์ไรท์ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้มีการต้านทานการแตกร้าวได้ดี และมีความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ

ตารางที่ 3.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม E 316

| C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.037 | 0.33 | 1.00 | 0.023 | 0.006 | 12.36 | 19.26 | 2.32 |

5) ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง Hard Surfacing HF-240

Standard: JIS Z3251 DF2A-250-R

เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดไตดาเนีย ทำให้เกาะแผลึกได้ง่าย และผิวรอยเชื่อมเรียบสวยงาม การกลึงแต่งขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายด้วย High speed cutter การชุบแข็งหลังเชื่อมเสร็จเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งก็สามารถทำได้เช่นกัน

ตารางที่ 3.6 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม HF 240

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   |
|------|------|------|-------|-------|------|
| 0.09 | 0.58 | 0.58 | 0.016 | 0.013 | 0.81 |

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะเชื่อม HF 240

| As welded                                        | PWHT                                |                                                                  |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| อุ่นขึ้นงาน และอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150 °C | ชุบแข็งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิ 900 °C | อบอ่อนที่อุณหภูมิ 650 °C x 2 Hr หลังจากชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C |
| 251                                              | 350                                 | 215                                                              |

#### 6) ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง Hard Surfacing HF-350

Standard: JIS Z3251 DF2A-400-B

เป็นลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่เหมาะสมสำหรับการเสียดสีระหว่างโลหะกับโลหะ ซึ่งมีค่าความแข็งและความเหนียวที่สมดุลกันเป็นอย่างดี นอกจากนั้นยังสามารถรับการเสียดสีที่มีการกระแทกในระดับน้อย ๆ ได้ดี รอยเชื่อมที่ได้สามารถกลึงแต่งขึ้นรูปได้สะดวก และสามารถชุบเพิ่มความแข็งหลังจากกลึงแต่งแล้วได้

ตารางที่ 3.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม HF 350

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   |
|------|------|------|-------|-------|------|
| 0.25 | 0.49 | 1.38 | 0.010 | 0.008 | 1.16 |

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะเชื่อม HF 350

| As welded                                             | PWHT                                |                                                                  |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| อุณหภูมิขึ้นงาน และอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 150 °C | ชุบแข็งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิ 850 °C | อบอ่อนที่อุณหภูมิ 650 °C x 2 Hr หลังจากชุบแข็งที่อุณหภูมิ 850 °C |
| 391                                                   | 510                                 | 295                                                              |

#### 3.4.3 กำหนดขอบเขตและปัญหา

เป็นการกำหนดขอบเขตของการทำงานวิจัยที่จัดทำว่าต้องการอะไรจากการทำงานวิจัยนี้การกำหนดขอบเขตเพื่อให้การทำงานการหาข้อมูลและเจาะจงกับผลที่เราต้องการได้ชัดเจนมากขึ้นการกำหนดขอบเขตของการทดลองมีดังนี้

3.4.3.1 ขึ้นทดสอบวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ขนาด 76 × 44 × 6 มม.

3.4.3.2 ใช้วิธีการเชื่อมไฟฟ้า

3.4.3.3 ใช้ลวดเชื่อม 6 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

3.4.3.4 ใช้การวัดค่าความแข็งก่อนและหลังการเชื่อมแบบวิกเกอร์ (Vickers; HV)

3.4.3.5 ใช้การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microscope)

3.4.3.6 ใช้เป็นการทดสอบผลกระทบและปัจจัยค่าความแข็งและรูปร่างแนวเชื่อม ด้วย วิธีการทางสถิติเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งและรูปร่างของรอยเชื่อม

#### 3.4.4 จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

3.4.4.1 วัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

3.4.4.2 เครื่องเชื่อมไฟฟ้า พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้กับเครื่อง

3.4.4.3 ลวดเชื่อม 6 ชนิด ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 6013, ลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ E 7016, ลวดเชื่อมสแตนเลส E308, ลวดเชื่อมสแตนเลส E316, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 240, ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง HF 350

3.4.4.4 เตาอบชุบแข็ง

3.4.4.5 เครื่อง Wire cut

3.4.4.6 เครื่องขัดกระดาษทราย และกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000, 1200

3.4.4.7 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์

3.4.4.8 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

#### 3.4.5 กำหนดวิธีการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในการทดลองจะดัดแปลงไปตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้วางแผนไว้ ซึ่งตัวพารามิเตอร์ที่เลือกใช้นั้นมีมากกว่าหนึ่งปัจจัยซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดมีดังนี้ไว้

ตารางที่ 3.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

|                                                   |                    |
|---------------------------------------------------|--------------------|
| วัสดุ (Material) :                                | SKD 11             |
| ขนาดของชิ้นงานทดสอบ (Dimensional Specimen) :      | 76 x 44 x 6 mm     |
| สภาพของชิ้นงานทดสอบ (Condition of the Specimen) : | Standard           |
|                                                   | Hardening          |
|                                                   | Tempering          |
| ลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrodes) :                     | Low Hydrogen E6013 |

|                                         |                       |
|-----------------------------------------|-----------------------|
| ลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrodes) :           | Low Hydrogen E7016    |
|                                         | Stainless Steel E308  |
|                                         | Stainless Steel E316  |
|                                         | Hard Surfacing HF-240 |
|                                         | Hard Surfacing HF-350 |
| ขนาดของลวดเชื่อม (Size) :               | Ø 3.2 mm              |
| ความเร็วในการเชื่อม (Speed) :           | 3 mm/s                |
| กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (Current) : | 100 A                 |

ตารางที่ 3.11 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

| ชนิดของชิ้นงาน | อุณหภูมิอบอ่อน<br>( องศาเซลเซียส ) | ชุบแข็ง (Hardening)<br>( องศาเซลเซียส ) | อบคืนตัว (Tempering)<br>( องศาเซลเซียส ) |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| SKD 11         | 830 -860                           | 1000 - 1050                             | อุณหภูมิ 525                             |

ตารางที่ 3.12 การออกแบบตารางเก็บข้อมูลค่าความแข็งหลังเชื่อมในการทดลองเบื้องต้น

| No | Diagonal (µm.) |    | Hardness | Hardness |
|----|----------------|----|----------|----------|
|    | D1             | D2 | HV       | HRC      |
| 1  |                |    |          |          |
| 2  |                |    |          |          |
| 3  |                |    |          |          |
| 4  |                |    |          |          |
| 5  |                |    |          |          |
| 6  |                |    |          |          |
| 7  |                |    |          |          |

ตารางที่ 3.13 การออกแบบตารางบันทึกผลค่าความกว้าง Weld Metal Zone และขนาดความกว้างของ HAZ

| ลวดเชื่อมไฟฟ้า<br>(Electrodes) | Condition of the Specimen |           |           |           |
|--------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | ตำแหน่งการวัด             | As welded | Quenching | Tempering |
| Low Hydrogen<br>E6013          | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |
| Low Hydrogen<br>E7016          | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |
| Stainless Steel<br>E308        | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |
| Stainless Steel<br>E316        | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |
| Hard Surfacing<br>HF-240       | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |
| Hard Surfacing<br>HF-350       | W (mm)                    |           |           |           |
|                                | L (mm)                    |           |           |           |
|                                | HAZ (mm)                  |           |           |           |
|                                | W/L(mm)                   |           |           |           |

W คือ ความกว้างของรอยเชื่อม

L คือ ความลึกของรอยเชื่อม

HAZ คือ บริเวณผลกระทบทางความร้อน

**ตารางที่ 3.14** การออกแบบตารางเก็บค่าความแข็งในบริเวณ Base Metal Zone, Weld Metal Zone และ บริเวณ HAZ

| ลวดเชื่อมไฟฟ้า<br>(Electrodes) | Condition of the Specimen |           |           |           |
|--------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | ตำแหน่งการวัด             | As welded | Quenching | Tempering |
| Low Hydrogen<br>E6013          | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |
| Low Hydrogen<br>E7016          | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |
| Stainless Steel<br>E308        | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |
| Stainless Steel<br>E316        | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |
| Hard Surfacing<br>HF-240       | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |
| Hard Surfacing<br>HF-350       | WM                        |           |           |           |
|                                | HAZ                       |           |           |           |
|                                | BM                        |           |           |           |

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| Weld metal; WM | คือ บริเวณเนื้อเชื่อม        |
| HAZ            | คือ บริเวณผลกระทบทางความร้อน |
| Base metal; BM | คือ โลหะงาน                  |

#### 3.4.6 ทดลองเชื่อมตามแผนการทดลอง

ทำการทดลองตามแผนที่ได้กำหนดไว้แล้วทำการเก็บข้อมูลใส่ในตารางบันทึกผล โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 3.4.7.1 เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมทดลอง
- 3.4.7.2 ทดลองเชื่อมตามแผนการทดลอง
- 3.4.7.3 ตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire cut
- 3.4.7.4 นำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย
- 3.4.7.5 นำชิ้นงานมาทดสอบค่าความแข็งก่อนและหลังการเชื่อมทดลอง
- 3.4.7.6 นำชิ้นงานมาทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคและวัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อม
- 3.4.4.7 สรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 3.2 แสดงรูปการทดลองเชื่อมวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

#### 3.4.7 การทดสอบความแข็งหลังเชื่อม ตามวิธีวิกเกอร์ส (Vickers; HV)

ในที่นี้วัสดุที่ใช้ในการทดสอบความแข็งเป็นโลหะ ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.4.7.1 เตรียมชิ้นงานให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อการทดสอบ คือทำการขัดผิวหน้าของชิ้นงาน ทดสอบโดยใช้กระดาษทรายเพื่อขัดสนิมและสิ่งสกปรกออก อีกทั้งเพื่อเป็นการปรับผิวหน้าชิ้นงานให้ได้ระนาบอีกด้วย กระดาษทรายที่ใช้มีตั้งแต่ เบอร์ 600 – 1200

3.4.7.2 เตรียมเครื่องทดสอบความแข็งแรงให้พร้อม โดยติดตั้งหัวกดแบบวิกเกอร์สเข้ากับที่จับแล้วขันให้แน่น แล้วปรับตั้งแรงกดที่ใช้ทดสอบให้เหมาะสมในที่นี่จะเลือกขนาดของแรงกดให้เหมาะสมตามชนิดของวัสดุ โดยการปรับให้หมุนปรับที่ตัวปรับแรงด้านข้างของตัวเครื่อง ซึ่งโดยปกติแล้วการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส นิยมใช้แรงกดขึ้นงาน 30 กิโลกรัม

3.4.7.3 นำชิ้นงานวางลงบนฐานของเครื่องทดสอบแล้วหมุนให้แท่นระดับค่อยๆยกตัวสูงขึ้นจนกระทั่งชิ้นงานเริ่มสัมผัสกับหัวกดทดสอบจนสเกลหน้าปัดถึงระดับ 100 ซึ่งเป็นระดับที่อ้างอิงจึงหยุดจากนั้นเลื่อนคันโยกเพื่อปล่อยแรงทดสอบลงบนผิวชิ้นงานซึ่งต้องใช้เวลาในการทดสอบ 10-15 วินาที แล้วเลื่อนคันโยกกลับสู่ตำแหน่งเดิม

3.4.7.4 เลื่อนฐานรองชิ้นงาน เพื่อนำชิ้นงานมาส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อหาขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดทดสอบทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกันแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.4.7.5 ทำการคำนวณหรือเปิดตารางมาตรฐานเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุ

3.4.7.6 ข้อควรระวังในการทดสอบ

- 1) ผิวงานชิ้นงานทดสอบจะต้องสะอาดและได้ระนาบ
- 2) ความหนาของวัสดุทดสอบไม่ควรต่ำกว่า 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด (ขึ้นอยู่กับมาตรฐานการทดสอบ)
- 3) สำหรับเส้นทแยงมุมของรอยกดควรหาค่าเฉลี่ยก่อนเสมอ
- 4) ควรหลีกเลี่ยงการทดสอบความแข็งแรงจากกรรมวิธีร้อน (Heating) หรือกรรมวิธีเย็น (Cold working)
- 5) อย่าทำการทดสอบใกล้กับที่ที่มีความสั่นสะเทือนเพราะจะทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนได้

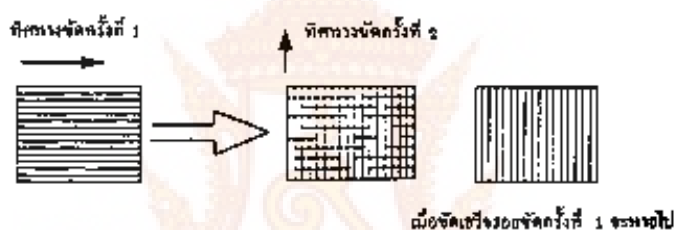


ภาพที่ 3.3 แสดงรูปของชิ้นงานที่นำไปทดสอบความแข็งแรง

### 3.4.8 วัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อม

การวัดขนาดพื้นผิวรอยเชื่อมเป็นการวัดเพื่อหาแนวโน้มการเชื่อมที่กระแสดำมี โอกาสจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวหรือเกิดการเสียหายกับรอยเชื่อมมากที่สุดขั้นตอนการวัดรอยเชื่อมมี ดังนี้

3.4.8.1 การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัด ควรวางกระดาษ ทรายลงบนกระจกหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำ อยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และ เมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็น ตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



ภาพที่ 3.4 ลักษณะแนวทางการขัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง [3]

การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะ ส่งผลให้โครงสร้างของ ชิ้นตรวจสอบ เกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิด ข้อผิดพลาด

3.4.8.2 การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมัน ของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมี ขนาดตั้งแต่ 0.05 - 0.3 ไมครอน การขัดด้วยผงนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

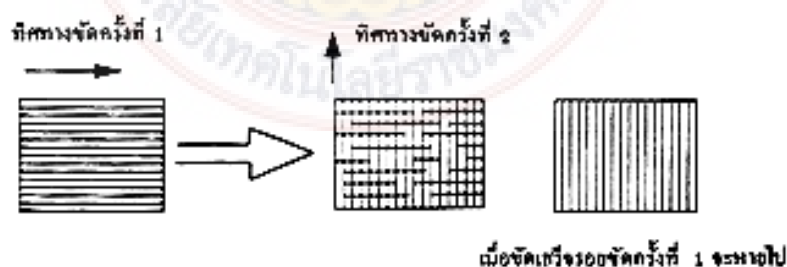
3.4.8.3 การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้าง ด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยาซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของ โลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้า เป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2 - 4 ผสมกับแอลกอฮอล์

3.4.8.4 เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วนำชิ้นงานไปทำการส่องกล้องเพื่อทำการวัดรอยเชื่อมโดยการอัตราค่าการซูมของกล้องประมาณ 8-16 เท่า ขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่นำมาทำการส่องกล้อง

### 3.4.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้น ควรตัดสินให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาดสำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้วและมีความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมควรมีขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้อย่างง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรที่จะหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบที่ได้กล่าวแล้วหลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นตอนต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และขัดจนถึงเบอร์ 600 ตามลำดับ ในการขัด ควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะแนวทางการขัดชิ้นงานทดสอบสลับเป็นตาราง

การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของ ชิ้นตรวจสอบ เกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้าง เกิดข้อผิดพลาด

2) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้น ตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา(Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรือ อาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 - 0.3 ไมครอน

การขัดด้วยผงนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการ นำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

3) การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้างด้วย แอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยาซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้า เป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2 - 4 ผสมกับแอลกอฮอล์

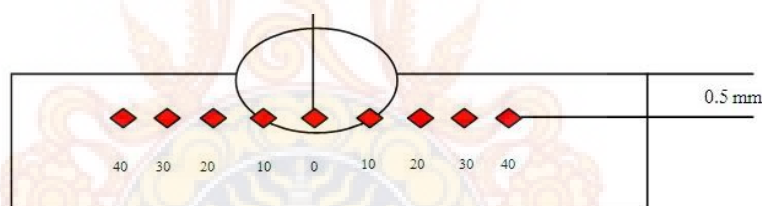


## บทที่ 4

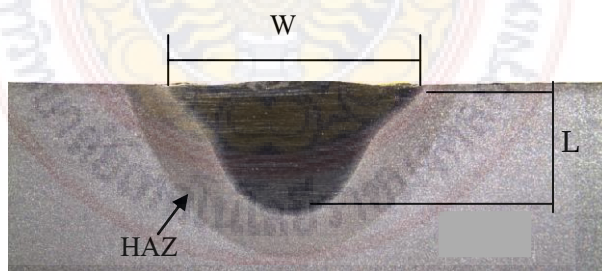
### วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 บทนำ

การทดลองทำตามขั้นตอนการทดลองที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยกำหนดปัจจัยไว้ 2 ปัจจัย คือ การทำกรรมวิธีทางความร้อน แบ่งออกเป็น 3 Condition คือ ขึ้นงานไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน(As welded) การชุบแข็ง(Quenching) และการอบคืนตัว(Tempering) ปัจจัยชนิดที่ 2 คือ ลวดเชื่อมมี 6 ชนิด ดังนี้ E6013 E7016 E308 E316 HF240 และ HF350 เพื่อศึกษาอิทธิพลที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ทำการเชื่อมเพื่อดูความสามารถของวัสดุเครื่องมืองานเย็นเปรียบเทียบค่าความแข็งและโครงสร้างทางจุลภาคและบริเวณ HAZ (Heat Affected ZONE) ของวัสดุที่ทำการเชื่อมแต่ละกรรมวิธีทางความร้อนและลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกันโดยศึกษาเฉพาะเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ดังนั้นผลการทดลองได้ผลออกมาดังนี้



ภาพที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของการกดความแข็ง



ภาพที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของการวัดความกว้างของรอยเชื่อม

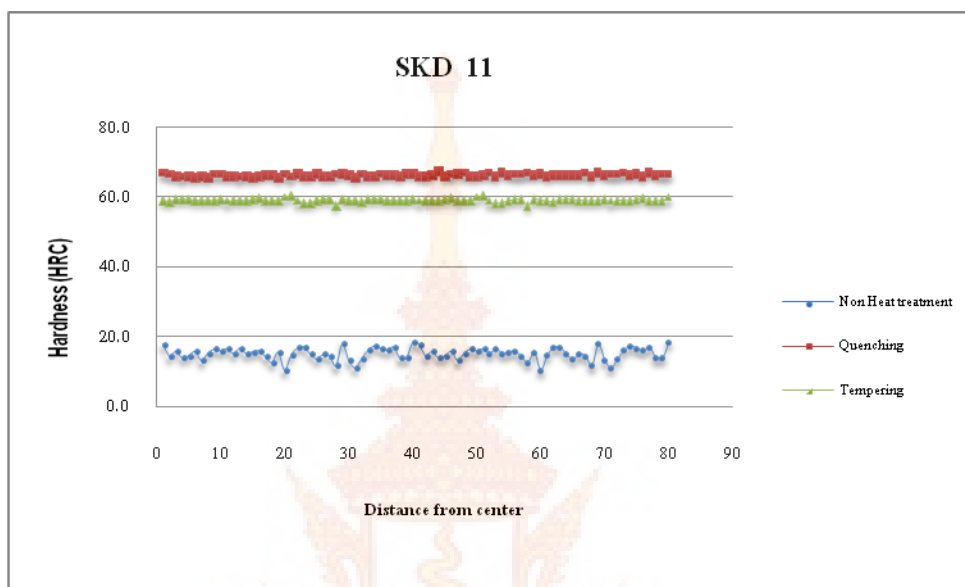
W คือ ความกว้างของแนวเชื่อม

L คือ ความลึกของแนวเชื่อม

HAZ คือ บริเวณกระทบร้อน (Heat-Affected ZONE)

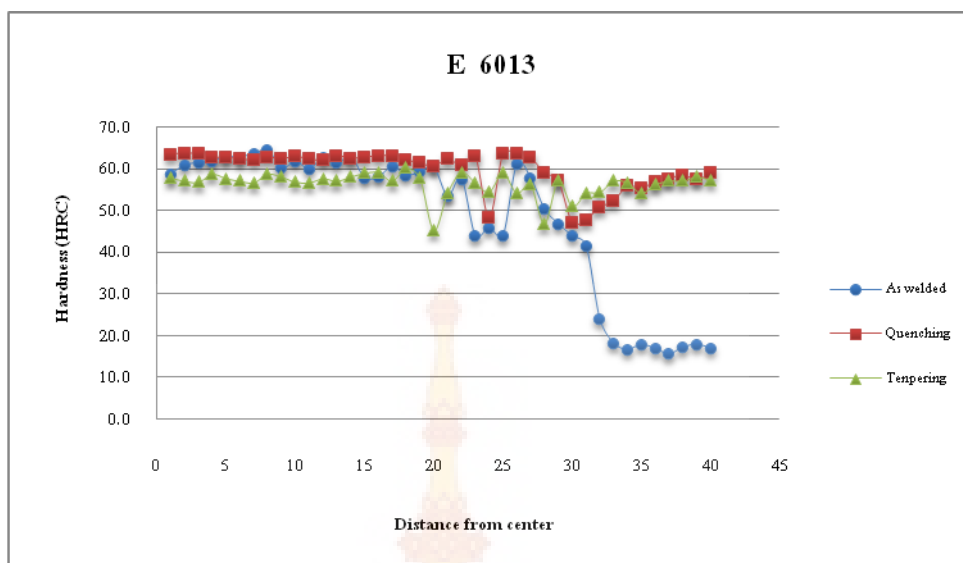
#### 4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็งภายหลังการเชื่อม

ค่าที่ได้จากการทดลองนำมาสร้างกราฟเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัยและระดับที่ต่างกัน



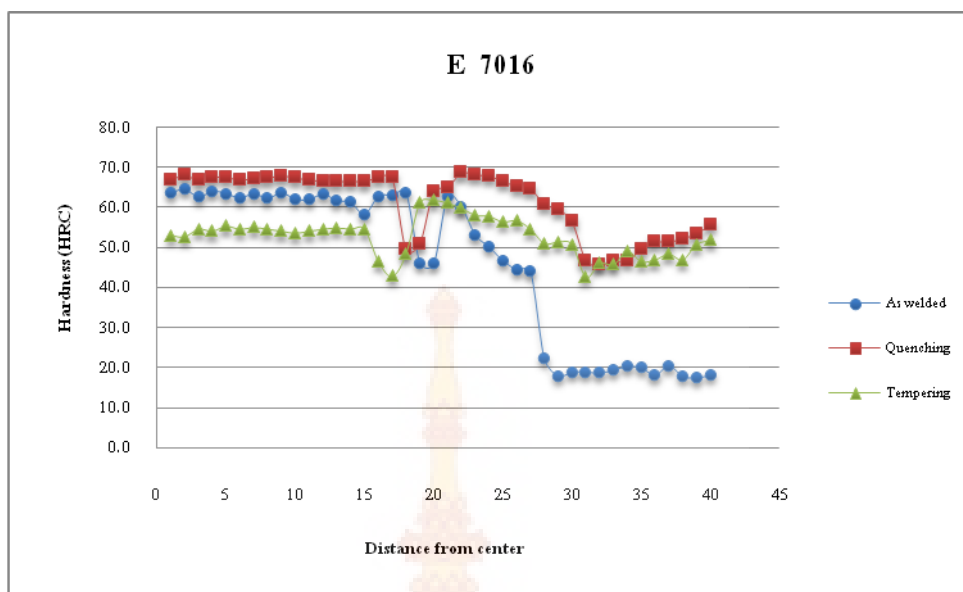
ภาพที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งวัสดุเกรด SKD 11 ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน 3 Condition

จากภาพที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของเหล็ก SKD 11 โดยที่สภาวะปกติเหล็กจะมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 17 HRC หลังการชุบแข็ง(Quenching) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 66 HRC และหลังการอบคืนตัว(Tempering) เหล็กจะมีค่าความแข็ง เฉลี่ยที่ 60 HRC ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีตามกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กเกรด SKD 11



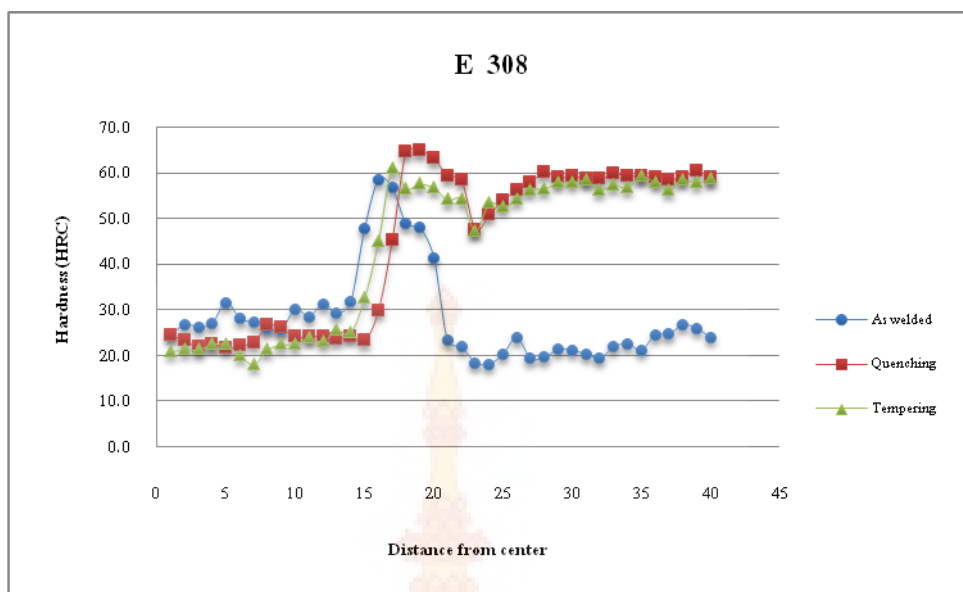
ภาพที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 6013 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 Condition ค่าความแข็งจะสูงที่สุด ณ บริเวณเนื้อเชื่อม เป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 6013 เข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้เหล็กบริเวณนั้นมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณช่วงกลางของกราฟที่มีค่าลดลงเป็นบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างหลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่วนบริเวณปลายของกราฟมีค่าต่ำลงและคงที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing) ในระหว่างเชื่อมทำให้ค่าความแข็งลดลงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของแต่ละ Condition



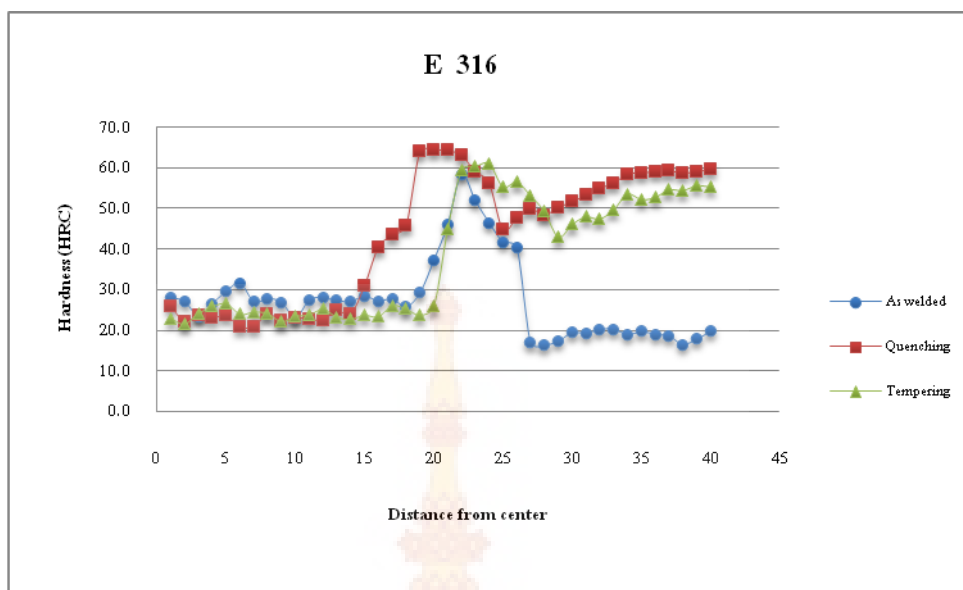
ภาพที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 7016 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 สถานะค่าความแข็งจะสูงที่สุด ณ บริเวณเนื้อเชื่อม เป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 7016 เข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้เหล็กบริเวณนั้นมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณช่วงกลางของกราฟที่มีค่าลดลงเป็นบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างหลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่วนบริเวณปลายของกราฟมีค่าต่ำลงและคงที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing) ในระหว่างเชื่อมทำให้ค่าความแข็งลดลงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของแต่ละ Condition



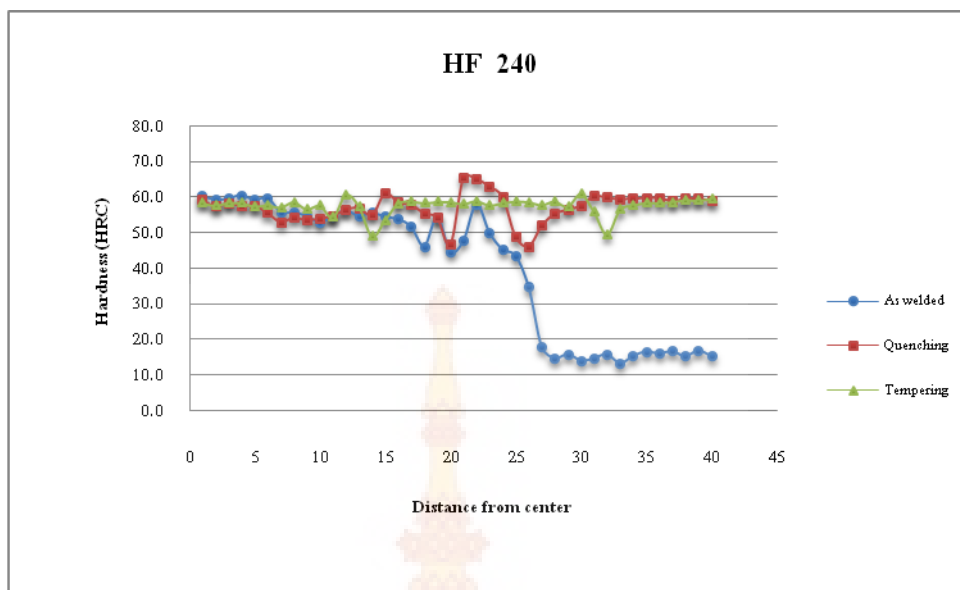
ภาพที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 308 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4. 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 Condition ค่าความแข็งจะสูงที่สุด ณ บริเวณกระทบร้อน ( Heat Affected Zone) เป็นผลมาจากความร้อนจากกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการชุบแข็ง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 21 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 ส่วนบริเวณปลายของกราฟมีค่าต่ำลงและคงที่ เป็นผลมาจากอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing) ในระหว่างเชื่อมทำให้ค่าความแข็งลดลงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของแต่ละ Condition



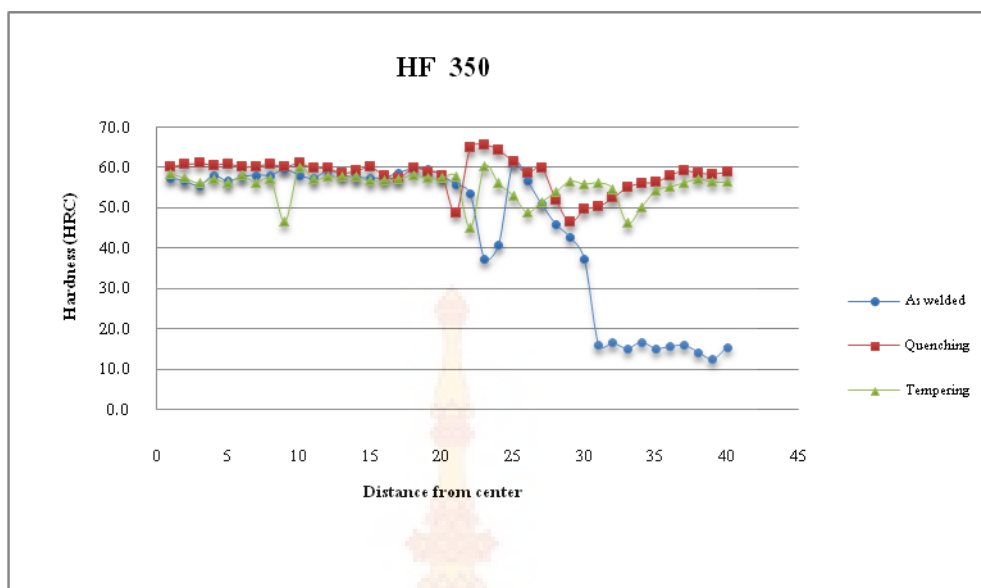
ภาพที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด E 316 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 Condition ค่าความแข็งจะสูงที่สุดในบริเวณกระทบร้อน ( Heat Affected Zone) เป็นผลมาจากความร้อนจากกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการชุบแข็ง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 23 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 316 ส่วนบริเวณปลายของกราฟมีค่าต่ำลงและคงที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing) ในระหว่างเชื่อมทำให้ค่าความแข็งลดลงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของแต่ละ Condition



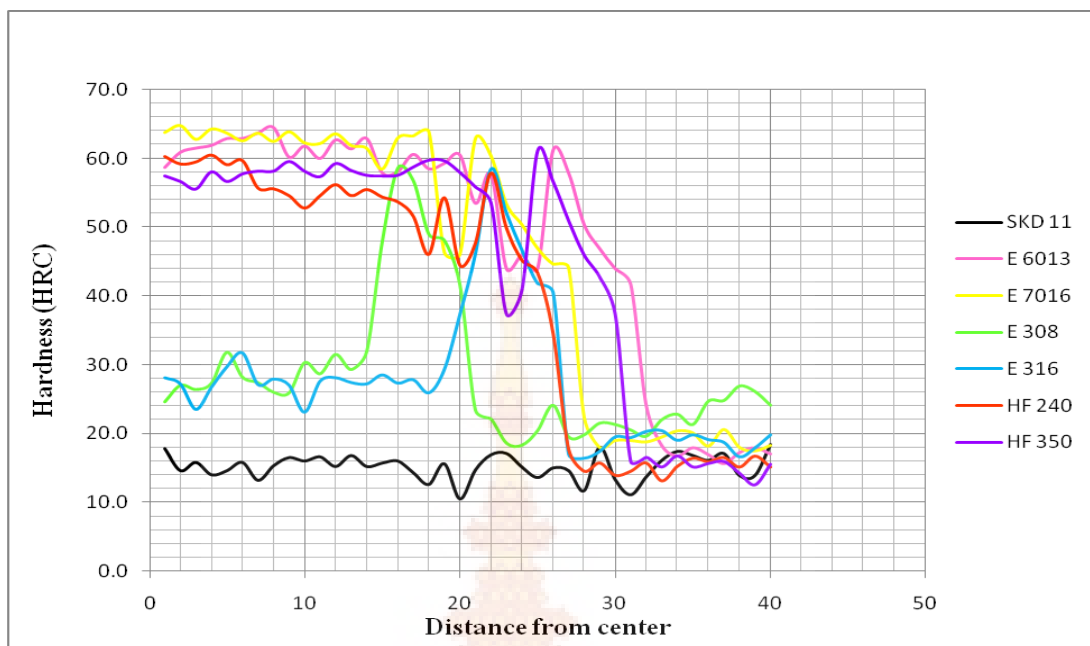
ภาพที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด HF 240 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4. 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสังเกตได้ว่าที่ Condition การชุบแข็ง (Quenching) และ Condition การอบคืนตัว (Tempering) ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 60 HRC ซึ่งมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับค่าความแข็งของเหล็กเกรด SKD 11 หลังการชุบแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม HF 240 ไม่มีผลทำให้เหล็กเกรด SKD 11 มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ลวดเชื่อมเกรด Hard facing จึงเหมาะสำหรับเป็นลวดเชื่อมเพื่อเชื่อมซ่อมเหล็กเกรด SKD 11



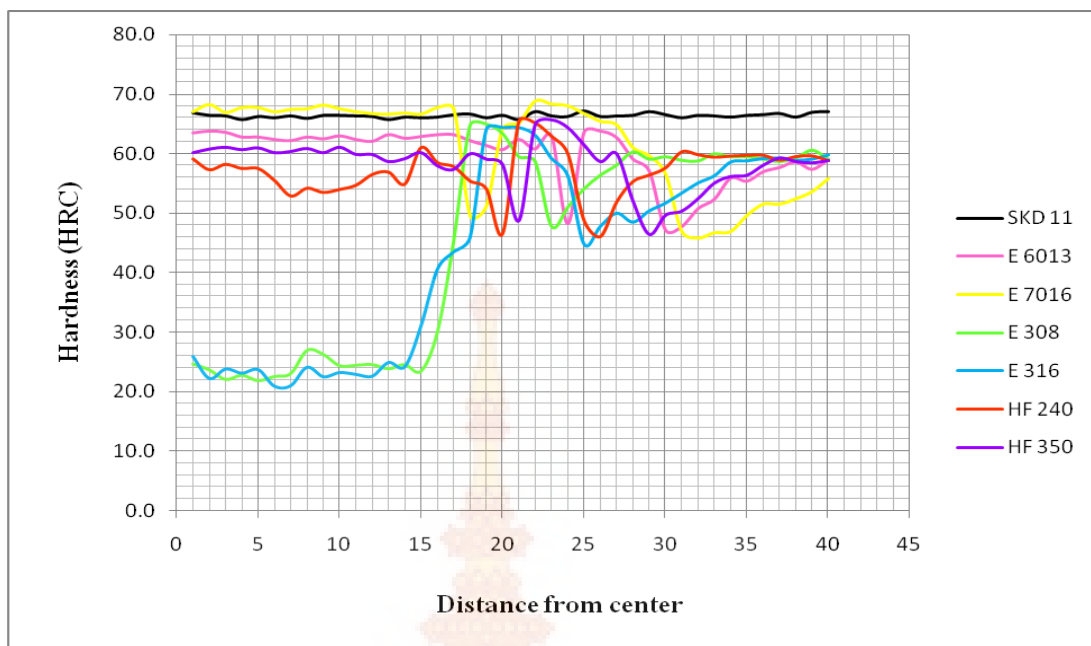
ภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยลวด HF 350 ทั้ง 3 Condition

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม จะสังเกตได้ว่าที่ Condition การชุบแข็ง(Quenching) และสภาวะการอบคืนตัว(Tempering) ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 60 HRC ซึ่งมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับค่าความแข็งของเหล็กเกรด SKD 11 หลังการชุบแข็ง(Quenching) ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม HF 350 ไม่มีผลทำให้เหล็กเกรด SKD 11 มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ลวดเชื่อมเกรด Hard facing จึงเหมาะสมสำหรับเป็นลวดเชื่อมเพื่อเชื่อมซ่อมเหล็กเกรด SKD 11



**ภาพที่ 4.10** แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11  
ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด

จากภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด และระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม จากกราฟลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 24.6 HRC, 28.1 HRC ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ส่วนลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 58.7 HRC, 63.7 HRC, 60.3 HRC, 57.5 HRC ตามลำดับ เป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 เข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้เหล็กบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าส่วนบริเวณปลายของกราฟของลวดเชื่อมทุกชนิดมีค่าต่ำลงและคงที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing) ในระหว่างเชื่อมทำให้ค่าความแข็งลดลงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะงาน (Base metal) เมื่อเทียบกับเหล็กเกรด SKD 11 จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 17 HRC



ภาพที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11

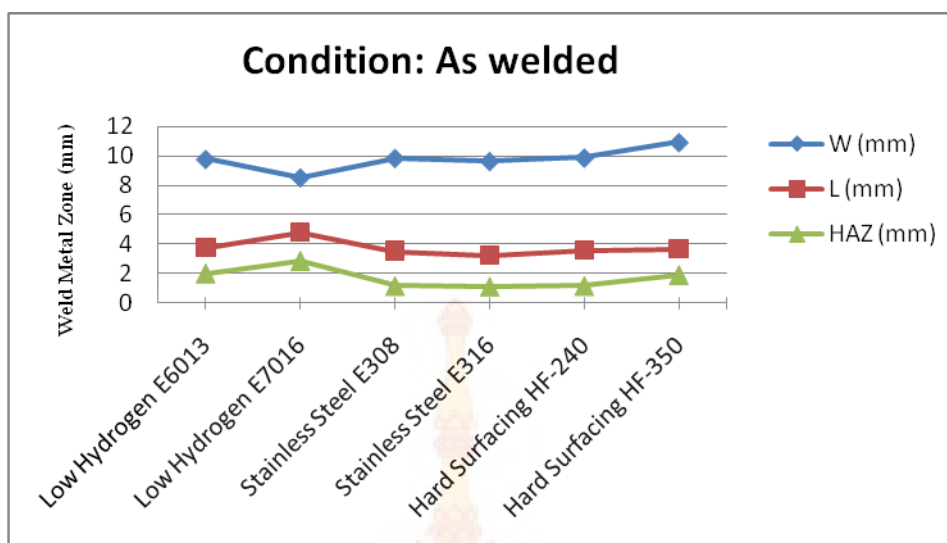
ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการชุบแข็ง (Quenching)

จากภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม จากกราฟลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 24.6 HRC, 25.9 HRC ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ส่วนลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 63.5 HRC, 67 HRC, 59.1 HRC, 60.2 HRC ตามลำดับ เป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 เข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้เหล็กบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าส่วนบริเวณปลายของกราฟของลวดเชื่อมทุกชนิดมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 60 HRC ซึ่ง มีค่าน้อยกว่าเหล็กเกรด SKD 11 ที่ผ่านการชุบแข็งที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 65 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการอบคืนตัว (Tempering) ในระหว่างเย็นตัวลงอย่างช้าๆในกระบวนการเชื่อม

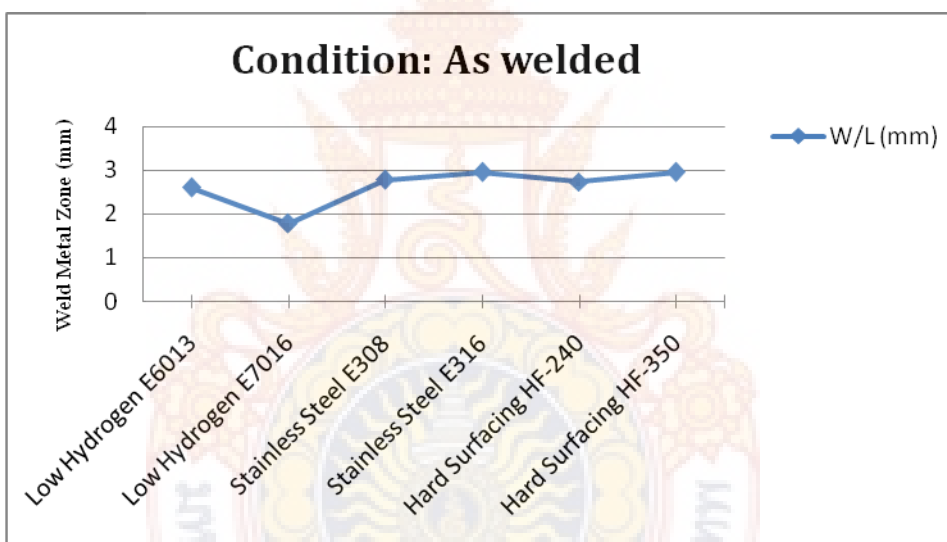


**ภาพที่ 4.12** แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการอบคืนตัว(Tempering)

จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม จากกราฟลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 21.1 HRC, 22.8 HRC ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และลวดเชื่อม E 316 ส่วนลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเท่ากับ 57.8 HRC, 52.9 HRC, 58.5 HRC, 58.3 HRC ตามลำดับ เป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 6013, E7016, E 308, E 316, HF 240, HF 350 เข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลทำให้เหล็กบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้น่ากราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการอบคืนตัว ในภาพที่ 4.12 มาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเกรด SKD 11 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด หลังการชุบแข็งในภาพที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งทั้งหมดที่ผ่านการชุบแข็ง นำมาทำการอบคืนตัว จะมีค่าลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 5 HRC ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีตามกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กเกรด SKD 11



(A)

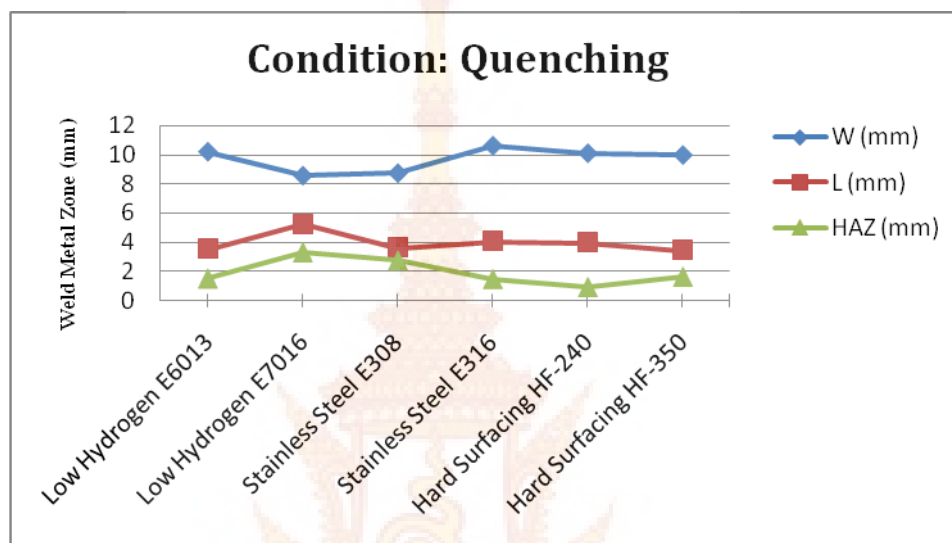


(B)

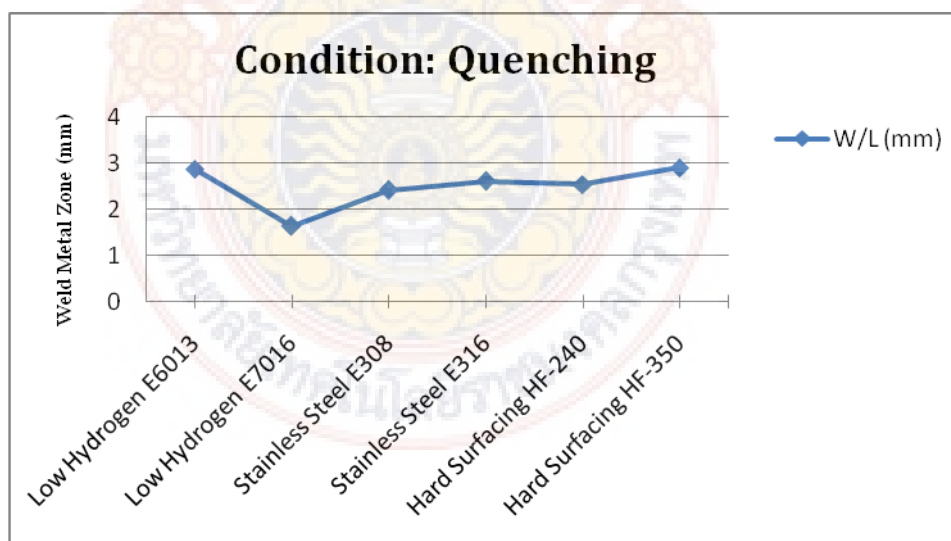
**ภาพที่ 4.13** แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับ Condition As welded กับชนิดของลวดเชื่อม

จากภาพที่ 4.13 (A) แสดงกราฟที่ Condition As welded จากการทดลองจะทราบถึงความสัมพันธ์ของ Condition As welded และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อขนาดรูปร่างของรอยเชื่อม จะสังเกตเห็นได้ว่าลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีขนาดความกว้าง(W) ความลึก(L) และบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก

จากภาพที่ 4.13 (B) แสดงความสัมพันธ์ Condition As welded และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อความลึกและความกว้างของแนวเชื่อมจะสังเกตว่า ลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีผลกระทบต่อสัดส่วนความกว้างกับความลึกของรอยเชื่อม ที่ใกล้เคียงกันมาก สรุปได้ว่า ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกัน ไม่มีผลต่อค่าความกว้างต่อความลึกของรอยเชื่อม



(A)

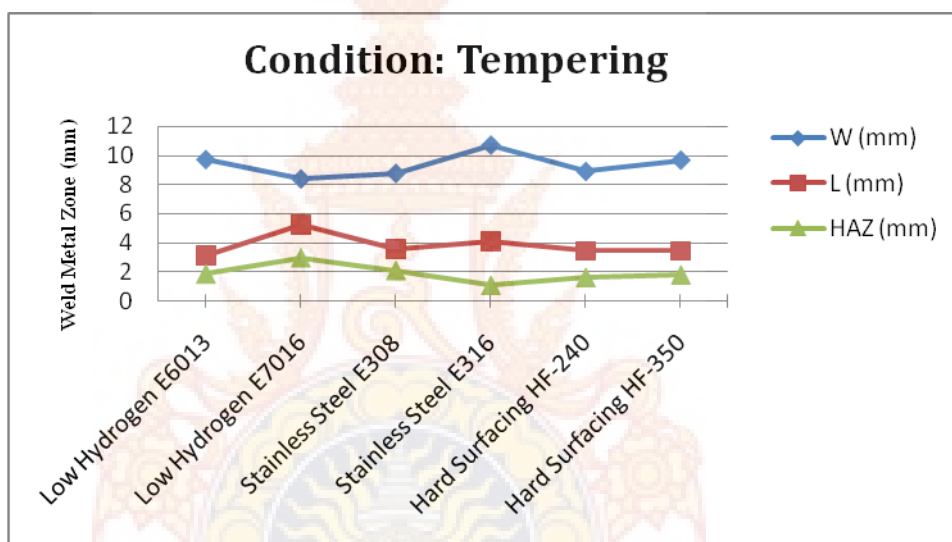


(B)

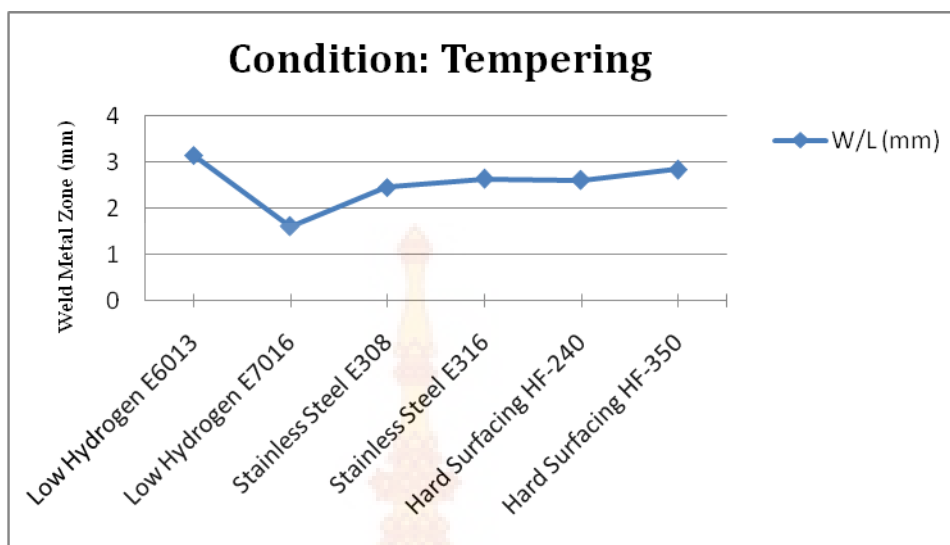
ภาพที่ 4.14 แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับ Condition Quenching กับชนิดของลวดเชื่อม

จากภาพที่ 4.14 (A) แสดงกราฟที่ Condition Quenching จากการทดลองจะทราบถึงความสัมพันธ์ของ Condition Quenching และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อขนาดรูปร่างของรอยเชื่อม จะสังเกตเห็นได้ว่าลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีขนาดความกว้าง ( W) ความลึก ( L) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก

จากภาพที่ 4.14 (B) แสดงความสัมพันธ์ Condition Quenching และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อความลึกและความกว้างของแนวเชื่อมจะสังเกตว่า ลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีผลกระทบต่อสัดส่วนความกว้างกับความลึกของรอยเชื่อม ที่ใกล้เคียงกันมาก สรุปได้ว่า ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกัน ไม่มีผลต่อค่าความกว้างต่อความลึกของรอยเชื่อม



(A)

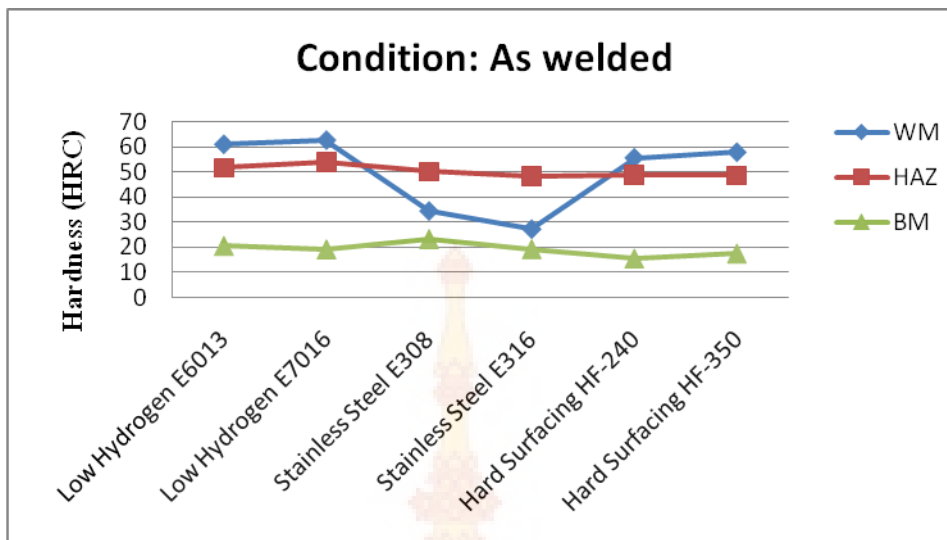


(B)

**ภาพที่ 4.15** แสดงอัตราส่วนของความกว้างของแนวเชื่อมเทียบกับ Condition Tempering กับชนิดของลวดเชื่อม

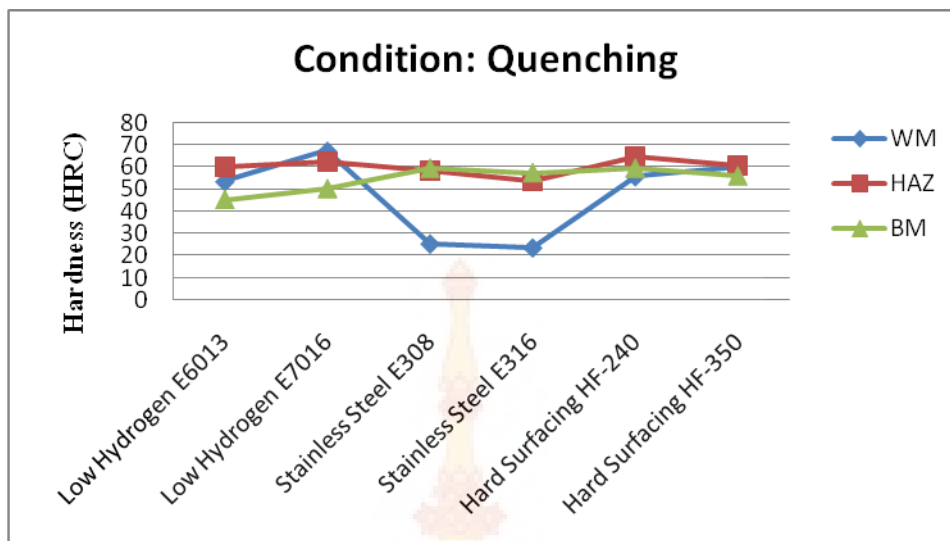
จากภาพที่ 4.15 (A) แสดงกราฟที่ Condition Tempering จากการทดลองจะทราบถึงความสัมพันธ์ของ Condition Tempering และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อขนาดรูปร่างของรอยเชื่อม จะสังเกตเห็นได้ว่าลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีขนาดความกว้าง ( W ) ความลึก ( L ) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก

จากภาพที่ 4.15 (B) แสดงความสัมพันธ์ Condition Tempering และชนิดของลวดเชื่อม ที่มีผลต่อความลึกและความกว้างของแนวเชื่อมจะสังเกตว่า ลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิดมีผลกระทบต่อการลดส่วนความกว้างกับความลึกของรอยเชื่อม ที่ใกล้เคียงกันมาก สรุปได้ว่า ลวดเชื่อมที่ต่างชนิดกัน ไม่มีผลต่อค่าความกว้างต่อความลึกของรอยเชื่อม



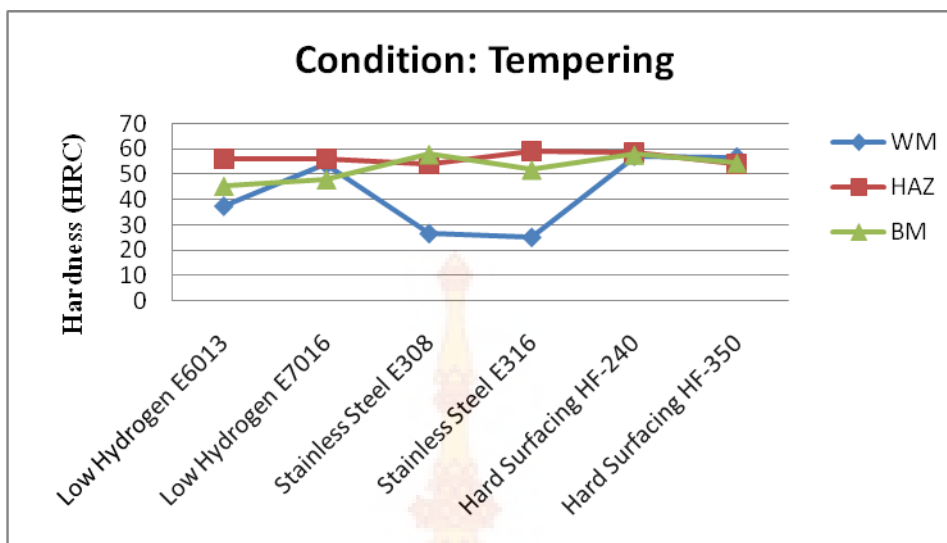
**ภาพที่ 4.16** แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone, HAZ, และ บริเวณ Base Metal Zone ของ ลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition As welded

จากภาพที่ 4.16 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของบริเวณ เนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) ของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 จะมีค่าความแข็งต่ำมากกว่าบริเวณอื่น ๆ อาจเป็นผลมาจาก จากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และ E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็ง บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) มีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 แต่บริเวณที่เป็น บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด จะมีค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าบริเวณนี้ไม่ได้รับผลกระทบจาก กระบวนการเชื่อมเท่าใดนัก



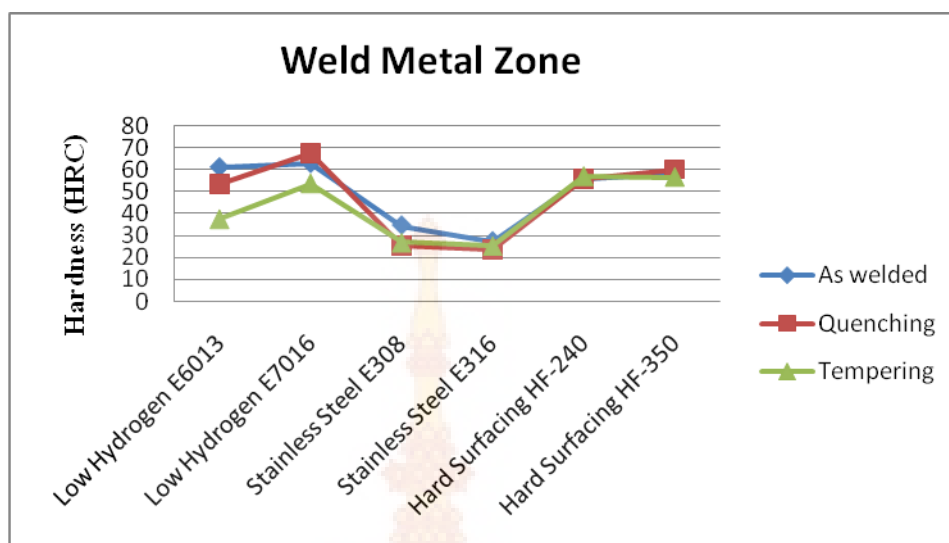
**ภาพที่ 4.17** แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone , HAZ , และ บริเวณ Base Metal Zone ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition Quenching

จากภาพที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของบริเวณ เนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) ของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 จะมีค่าความแข็งต่ำมากกว่าบริเวณอื่น ๆ อาจเป็นผลมาจาก จากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และ E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็ง บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) มีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 แต่บริเวณที่เป็นบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด จะมีค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าบริเวณนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเท่าใดนัก



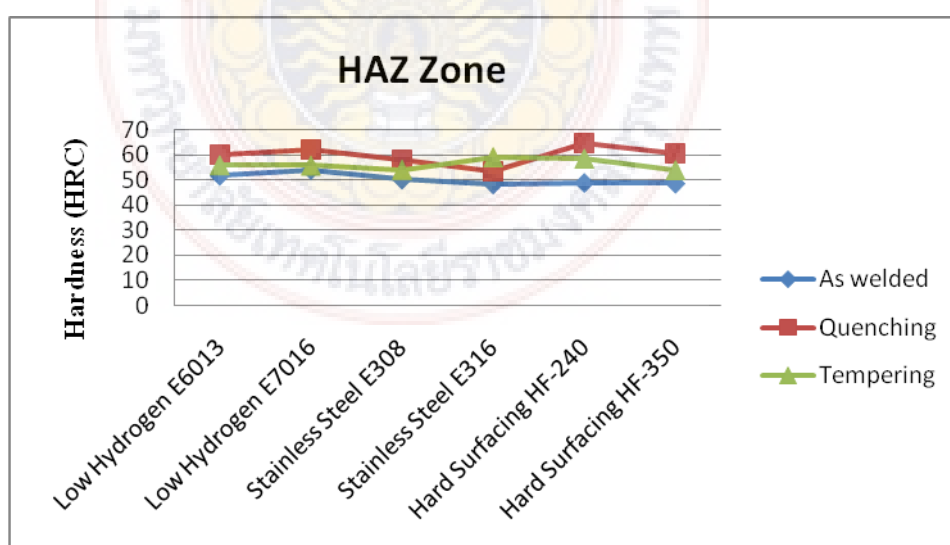
ภาพที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งบริเวณ Weld Metal Zone , HAZ , และ บริเวณ Base Metal Zone ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด Condition Tempering

จากภาพที่ 4.18 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของบริเวณ เนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) ของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 จะมีค่าความแข็งต่ำมากกว่าบริเวณอื่น ๆ อาจเป็นผลมาจาก จากจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อม E 308 และ E 316 ไม่ส่งผลกระทบทำให้ความแข็ง บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone) มีค่าความแข็งตามคุณสมบัติของลวดเชื่อม E 308 และ E 316 แต่บริเวณที่เป็นบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของลวดเชื่อมทั้ง 6 ชนิด จะมีค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าบริเวณนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเท่าใดนัก



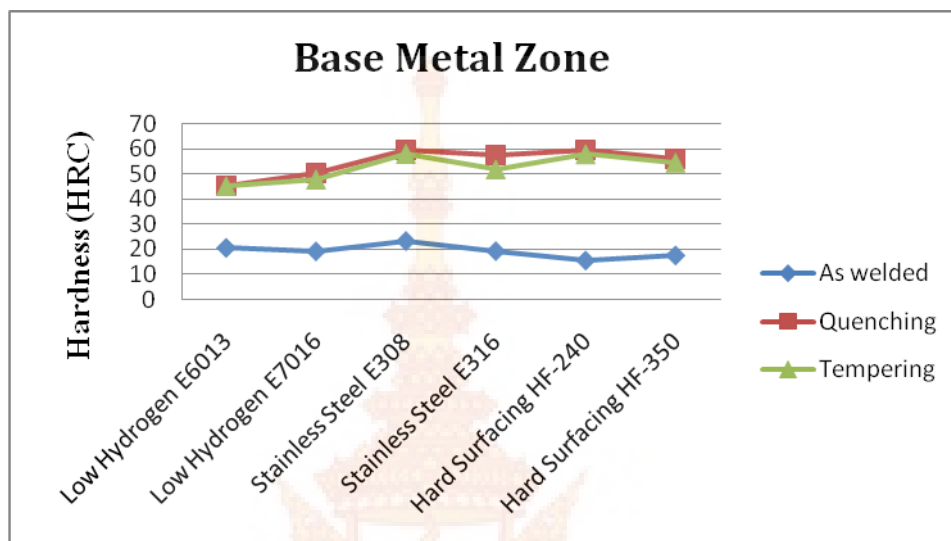
ภาพที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Weld metal Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.19 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งที่ ลวดเชื่อม E 308 และ E 316 ทั้ง 3 Condition ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการเชื่อมจึงทำให้ค่าความแข็ง ต่ำมาก การใช้ลวดเชื่อม E 308 และ E 316 ไม่เหมาะสมเพราะจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวเสียหาย ขึ้นกับวัสดุ



ภาพที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ HAZ Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน

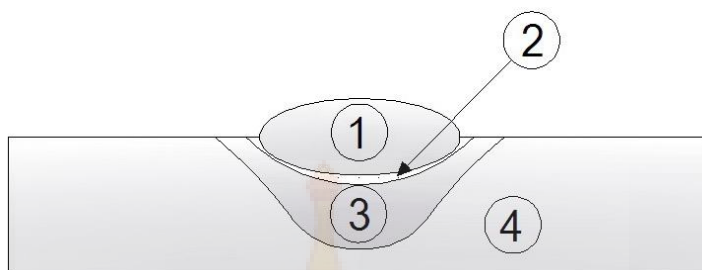
จากภาพที่ 4.20 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งที่บริเวณ HAZ Zone ในแต่ละ Condition นั้นมีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันนั้นหมายถึงอุณหภูมิที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมนั้นไม่มีผลกระทบต่อชิ้นงานบริเวณ HAZ Zone จึงทำให้ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Base Metal Zone กับ Condition ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.21 จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งที่บริเวณ โลหะงาน (Base Metal Zone) ใน Condition As welded มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า Condition Quenching และ Condition Tempering เนื่องจากค่าความแข็งที่บริเวณ โลหะงาน (Base Metal Zone) ไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเชื่อม ส่งผลให้ค่าความแข็งของแต่ละ Condition คงคุณสมบัติค่าความแข็งเดิมไว้

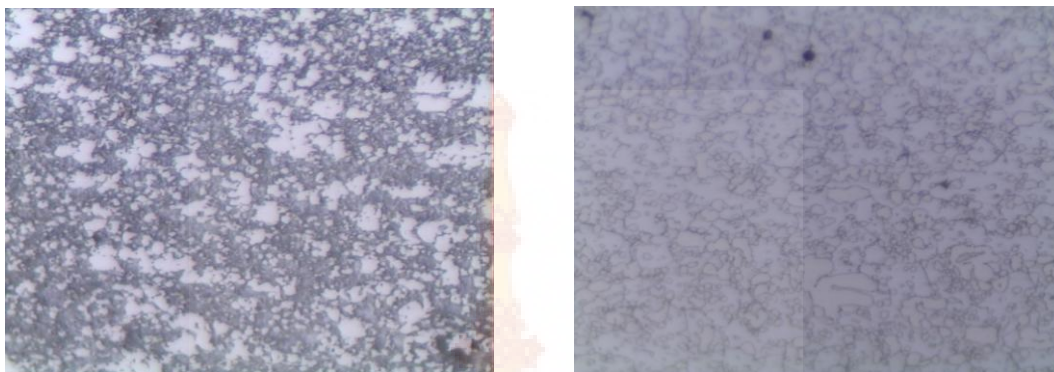
#### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค



ภาพที่ 4.23 แสดงตำแหน่งการส่องกล้องทางจุลภาค

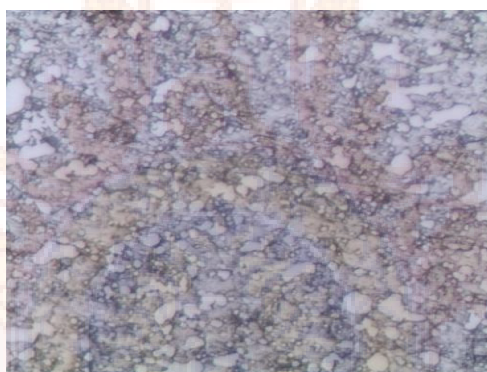
- 1 คือ เนื้อเชื่อม (Weld metal)
- 2 คือ Interface weld Zone
- 3 คือ บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected ZONE)
- 4 คือ บริเวณโลหะงาน (Base Metal)

นำชิ้นงาน SKD 11 ที่ได้จากการกัดกรด มาส่องด้วยกล้องขยายทางจุลภาค ที่กำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัยและระดับที่ต่างกัน



(a)

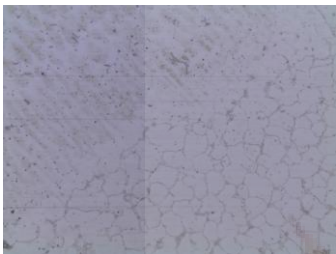
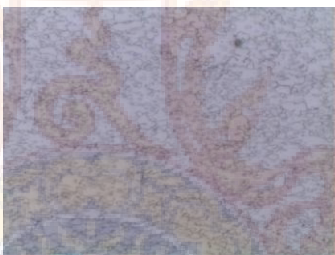
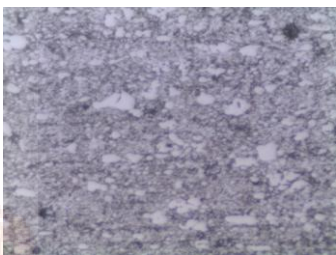
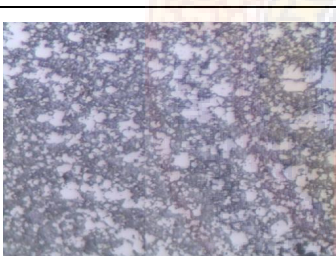
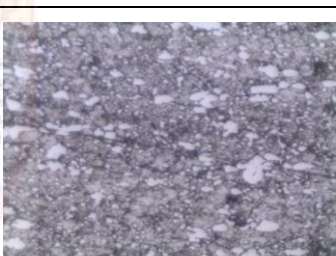
(b)



(c)

ภาพที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11

- (a) โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ก่อนการชุบแข็ง
- (b) โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 หลังการชุบแข็ง(Quenching)
- (c) โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 หลังการอบคืนตัว(Tempering)

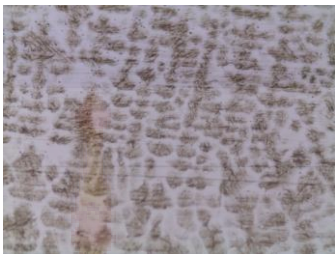
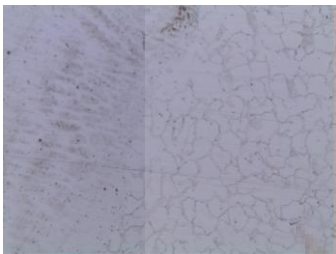
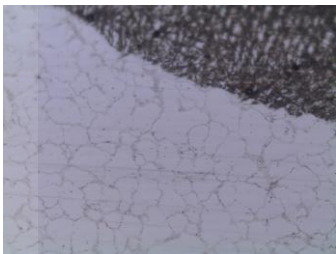
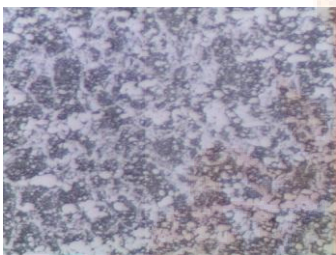
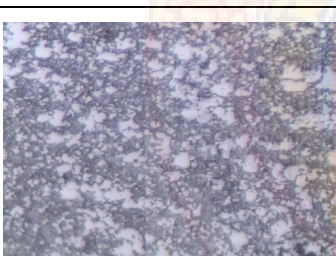
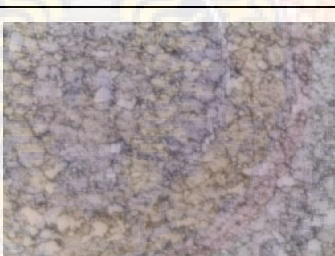
| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |   |   |   |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 6013 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่า

ตารางที่ 4.1 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 6013

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ           |
|------|-----------|------------------|--------------------------|
| 1    | As welded | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนต์ไคท์      | มีผลึกคาร์ไบด์ของธาตุผสม |
| 2    | As welded | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
| 3    | As welded | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนต์ไคท์      | -                        |
| 4    | As welded | เฟอร์ไรท์        | -                        |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -                        |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -                        |

จากตารางที่ 4.1 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 6013 ไม่เหมาะสมที่จะนำเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) มีโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่า บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline ซึ่งความแตกต่างกันของโครงสร้าง จะส่งผลให้บริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ได้รับการสึกหรอจากการใช้งานก่อนบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline

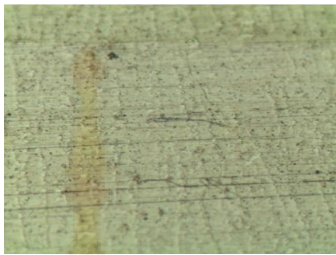
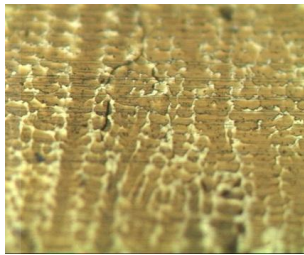
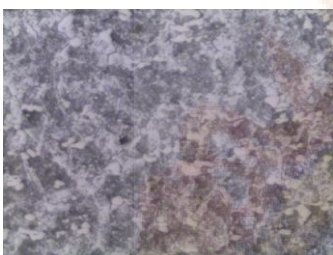
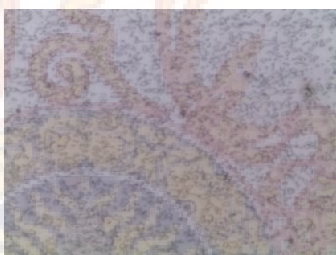
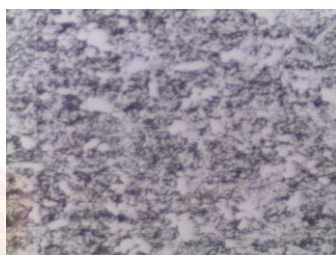
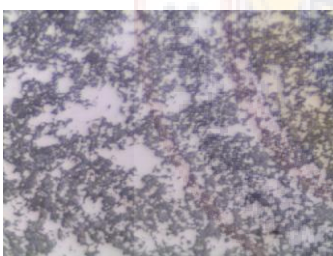
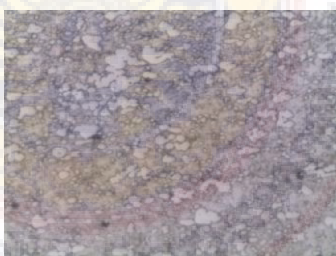
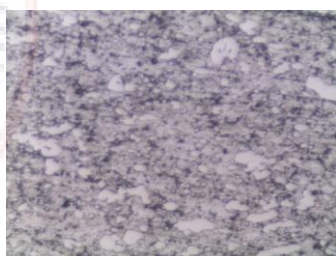
| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |   |   |   |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 7016 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า

ตารางที่ 4.2 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 7016

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ           |
|------|-----------|------------------|--------------------------|
| 1    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | มีผลึกคาร์ไบด์ของธาตุผสม |
| 2    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -                        |
| 3    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                        |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -                        |
| 4    | As welded | เฟอร์ไรท์        | -                        |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -                        |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -                        |

จากตารางที่ 4.2 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 7016 ไม่เหมาะสมที่จะนำเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) มีโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่า บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline ซึ่งความแตกต่างกันของโครงสร้าง จะส่งผลให้บริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ได้รับการสึกหรอจากการใช้งานก่อนบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline

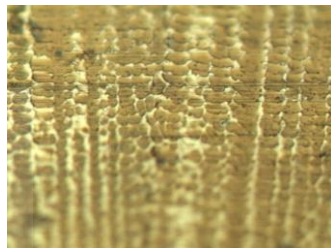
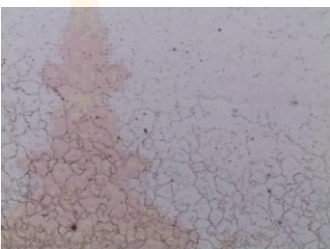
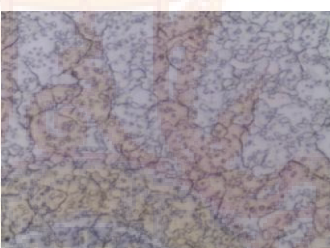
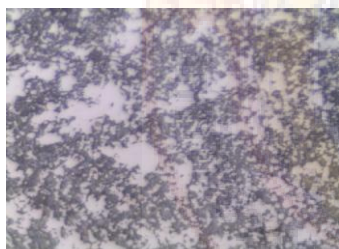
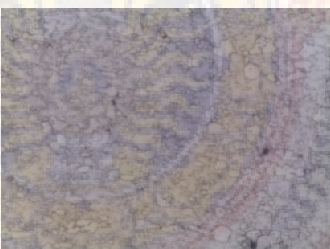
| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |   |   |   |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า

ตารางที่ 4.3 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ |
|------|-----------|------------------|----------------|
| 1    | As welded | เฟอร์ไรต์        | -              |
|      | Quenching | เฟอร์ไรต์        | -              |
|      | Tempering | เฟอร์ไรต์        | -              |
| 2    | As welded | เพิร์ไลต์        | -              |
|      | Quenching | เพิร์ไลต์        | -              |
|      | Tempering | เพิร์ไลต์        | -              |
| 3    | As welded | ซีเมนไต์         | -              |
|      | Quenching | ซีเมนไต์         | -              |
|      | Tempering | ซีเมนไต์         | -              |
| 4    | As welded | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -              |

จากตารางที่ 4.3 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308 ไม่เหมาะสมที่จะนำเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline มีโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่าบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ซึ่งความแตกต่างกันของโครงสร้าง จะส่งผลให้บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline ได้รับการสึกหรอจากการใช้งานก่อนบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)

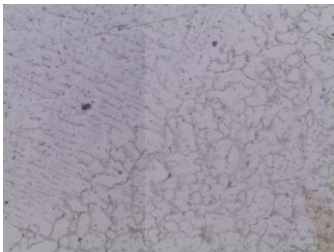
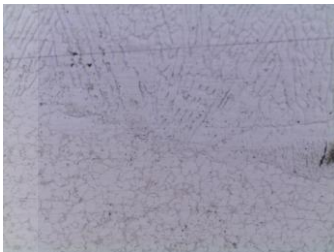
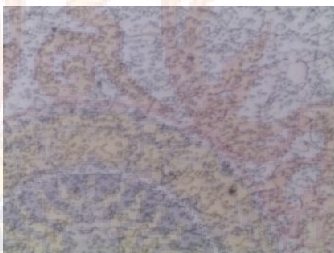
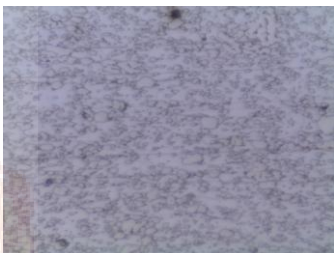
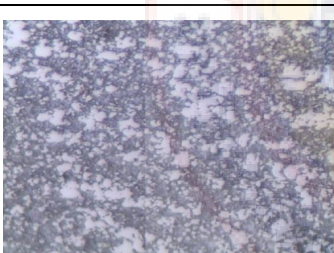
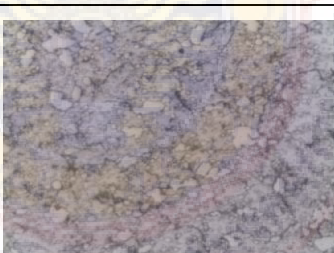
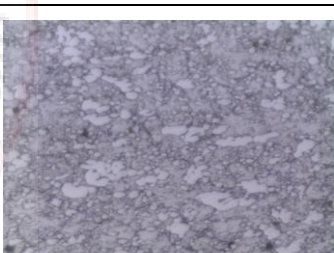
| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |    |    |    |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 316 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า

ตารางที่ 4.4 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 316

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ |
|------|-----------|------------------|----------------|
| 1    | As welded | เฟอร์ไรต์        | -              |
|      | Quenching | เฟอร์ไรต์        | -              |
|      | Tempering | เฟอร์ไรต์        | -              |
| 2    | As welded | เพิร์ไลต์        | -              |
|      | Quenching | เพิร์ไลต์        | -              |
|      | Tempering | เพิร์ไลต์        | -              |
| 3    | As welded | ซีเมนไตต์        | -              |
|      | Quenching | ซีเมนไตต์        | -              |
|      | Tempering | ซีเมนไตต์        | -              |
| 4    | As welded | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -              |

จากตารางที่ 4.4 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E 308 ไม่เหมาะสมที่จะนำเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline มีโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่าบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ซึ่งความแตกต่างกันของโครงสร้าง จะส่งผลให้บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) และบริเวณ Interface weldline ได้รับการสึกหรอจากการใช้งานก่อนบริเวณโลหะงาน (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)

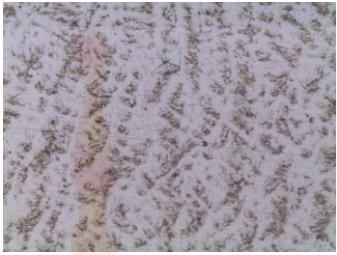
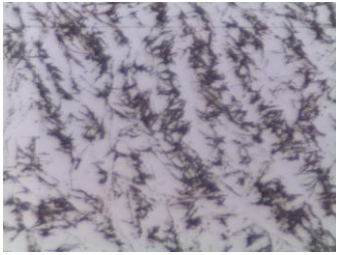
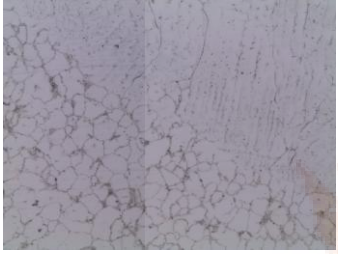
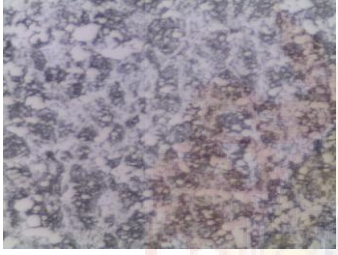
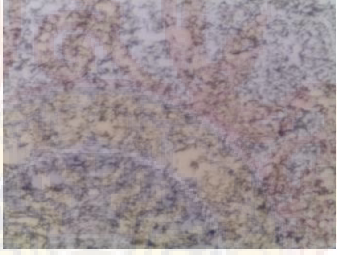
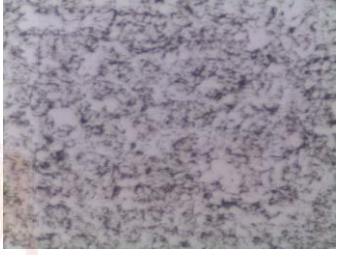
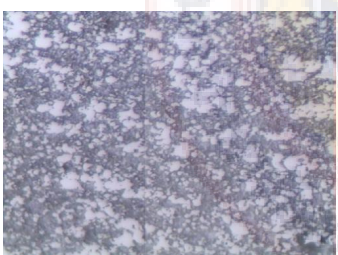
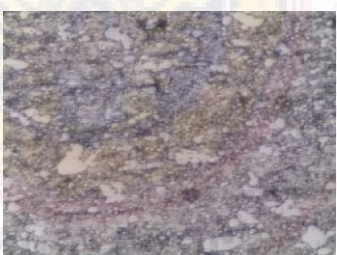
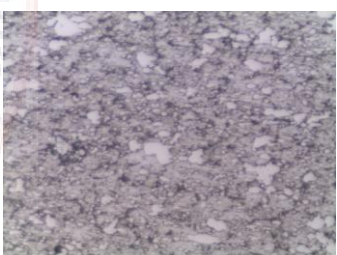
| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |   |   |   |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 240 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า

ตารางที่ 4.5 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 240

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ |
|------|-----------|------------------|----------------|
| 1    | As welded | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -              |
| 2    | As welded | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -              |
| 3    | As welded | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -              |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -              |
| 4    | As welded | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -              |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -              |

จากตารางที่ 4.5 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 240 เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal), บริเวณ Interface weldline, บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณโลหะงาน (Base metal) มีโครงสร้างที่คล้ายเคียงกัน และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ซึ่งส่งผลให้เมื่อนำลวดเชื่อมประเภท Hard Facing ใช้เชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมประเภท Low Carbon และประเภท Stainless

| Pos | Condition                                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | As welded                                                                           | Quenching                                                                            | Tempering                                                                             |
| 1   |    |    |    |
| 2   |   |   |   |
| 3   |  |  |  |
| 4   |  |  |  |

ภาพที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 350 ด้วยกำลังขยายเท่ากับ 400 เท่า

ตารางที่ 4.6 แสดงผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 350

| Pos. | Condition | โครงสร้างพื้นฐาน | โครงสร้างอื่นๆ     |
|------|-----------|------------------|--------------------|
| 1    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | มีการบิดของธาตุผสม |
| 2    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -                  |
| 3    | As welded | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Quenching | ซีเมนไคท์        | -                  |
|      | Tempering | ซีเมนไคท์        | -                  |
| 4    | As welded | มาร์เทนไซต์      | -                  |
|      | Quenching | มาร์เทนไซต์      | -                  |
|      | Tempering | มาร์เทนไซต์      | -                  |

จากตารางที่ 4.6 ผลโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด SKD 11 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม HF 350 เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal), บริเวณ Interface weldline, บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณโลหะงาน (Base metal) มีโครงสร้างที่คล้ายเคียงกัน และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ซึ่งส่งผลให้เมื่อนำลวดเชื่อมประเภท Hard Facing ใช้เชื่อมซ่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมประเภท Low Carbon และประเภท Stainless

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของวัสดุด้วยโปรแกรม MINITAB 13

การออกแบบการทดลองเชิง Factorial โดยใช้ค่าความแข็ง ( HRC) เป็นค่าตอบสนอง (Response)

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบบริเวณโลหะงาน(Base metal)

| General Linear Model: Base metal versus Electrode Type, Condition |       |        |                                   |
|-------------------------------------------------------------------|-------|--------|-----------------------------------|
| Factor                                                            | Type  | Levels | Values                            |
| Electrode Type                                                    | fixed | 6      | E6013 E7016 E308 E316 HF240 HF350 |
| Condition                                                         | fixed | 3      | Aswelded Quenching Tempering      |

ตารางที่ 4.8 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests

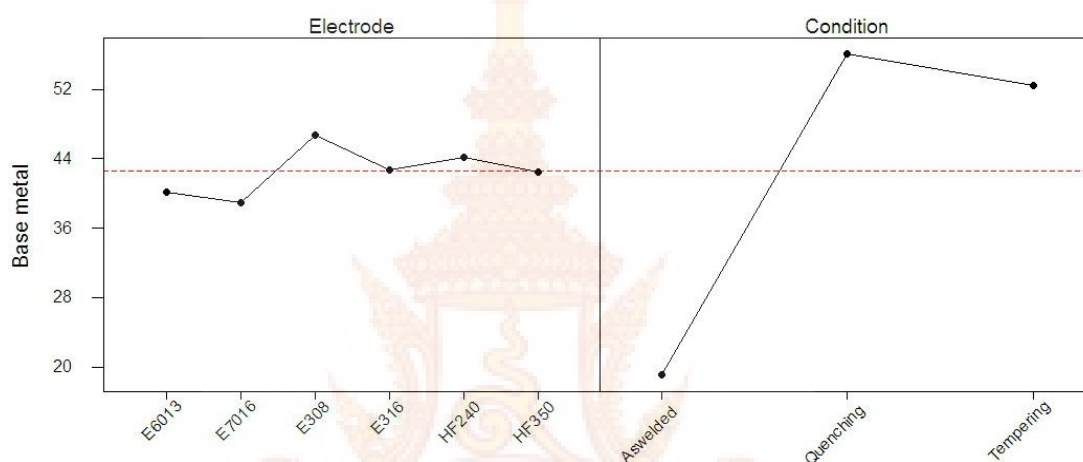
| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F      | P     |
|----------------|----|---------|---------|---------|--------|-------|
| Electrode Type | 5  | 117.32  | 117.33  | 23.47   | 2.08   | 0.152 |
| Condition      | 2  | 5003.17 | 5003.17 | 2501.58 | 221.44 | 0.000 |
| Error          | 10 | 112.97  | 112.97  | 11.30   |        |       |
| Total          | 17 | 5223.46 |         |         |        |       |

Unusual Observations for Base met

| Obs | Base metal | Fit     | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|------------|---------|--------|----------|----------|
| 8   | 15.4000    | 20.6833 | 2.2407 | -5.2833  | -2.11R   |

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 จะเป็นผลการวิเคราะห์จะเป็นผลการวิเคราะห์ผลตามการออกแบบการทดลองเชิง Factorial โดยผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปร Condition มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (HRC) ของบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจาก  $\alpha = 0.05$  นั้น มีค่ามากกว่า P – value = 0.0001 ซึ่ง  $< \alpha = 0.05$  นั่นคือ Condition ที่ต่างกัน มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (HRC) ของบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11



ภาพที่ 4.30 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Electrode Type และ ตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณโลหะงาน (Base metal)

จากภาพ Main Effects Plot for HRC จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของตัวแปร Condition จะมีลักษณะของเส้นลาดชันลงมา ไม่มีแนวโน้มขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Condition มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อม แต่เส้นกราฟของตัวแปร Electrode Type จะมีลักษณะแนวโน้มของเส้นขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Electrode Type ไม่มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณโลหะงาน (Base metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อม

ตารางที่ 4.9 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone)

| General Linear Model: HAZ versus Electrode Type, Condition |       |        |          |           |           |                  |
|------------------------------------------------------------|-------|--------|----------|-----------|-----------|------------------|
| Factor                                                     | Type  | Levels | Values   |           |           |                  |
| Electrode Type                                             | fixed | 6      | E6013    | E7016     | E308      | E316 HF240 HF350 |
| Condition                                                  | fixed | 3      | Aswelded | Quenching | Tempering |                  |

ตารางที่ 4.10 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests

| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS | Adj MS | F    | P     |
|----------------|----|---------|--------|--------|------|-------|
| Electrode Type | 5  | 360.53  | 360.53 | 72.11  | 1.45 | 0.288 |
| Condition      | 2  | 669.14  | 669.14 | 334.57 | 6.73 | 0.014 |
| Error          | 10 | 496.93  | 496.93 | 49.69  |      |       |
| Total          | 17 | 1526.60 |        |        |      |       |

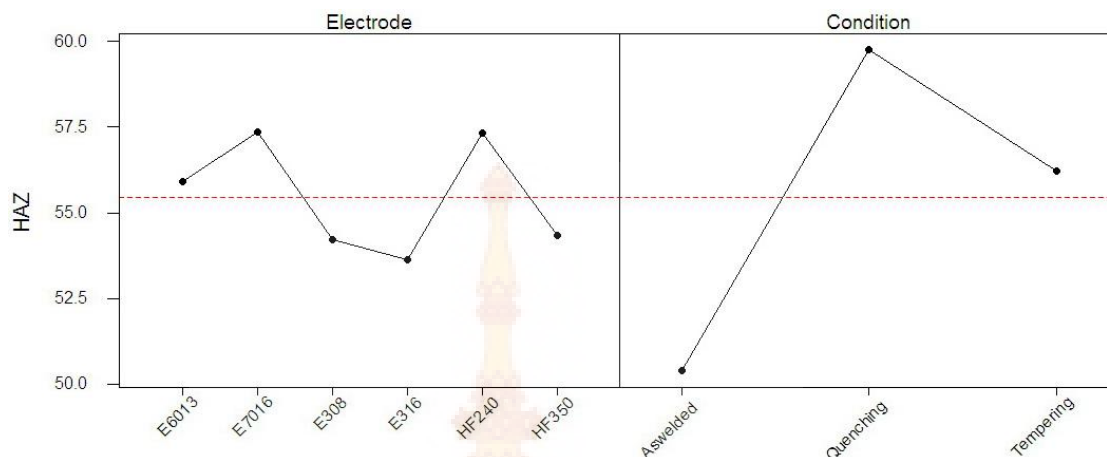
Unusual Observations for HAZ

| Obs | Base metal | Fit     | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|------------|---------|--------|----------|----------|
| 2   | 20.6000    | 35.9222 | 4.6995 | -15.3222 | -2.92R   |

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.10 จะเป็นผลการวิเคราะห์จะเป็นผลการวิเคราะห์ผลตามการออกแบบการทดลองเชิง Factorial โดยผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปร Condition มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (HRC) ของบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจาก  $\alpha = 0.05$  นั้น มีค่ามากกว่า P – value = 0.014 ซึ่ง  $< \alpha = 0.05$  นั่นคือ Condition ที่ต่างกัน มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง

(HRC) ของบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) ของวัสดุเหล็กเครื่องมือเกรด SKD 11



ภาพที่ 4.31 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Electrode Type และ ตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone)

จากภาพ Main Effects Plot for HRC จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของตัวแปร Condition จะมีลักษณะของเส้นลาดชันลงมา ไม่มีแนวโน้มขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Condition มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อม แต่เส้นกราฟของตัวแปร Electrode Type จะมีลักษณะแนวโน้มของเส้นขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Electrode Type ไม่มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณกระทบร้อน(Heat Affected Zone) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อม

ตารางที่ 4.11 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)

General Linear Model: Weld metal versus Electrode Type, Condition

| Factor         | Type  | Levels | Values                            |
|----------------|-------|--------|-----------------------------------|
| Electrode Type | fixed | 6      | E6013 E7016 E308 E316 HF240 HF350 |
| Condition      | fixed | 3      | Aswelded Quenching Tempering      |

ตารางที่ 4.12 Analysis of Variance for HRC, using Adjusted SS for Tests

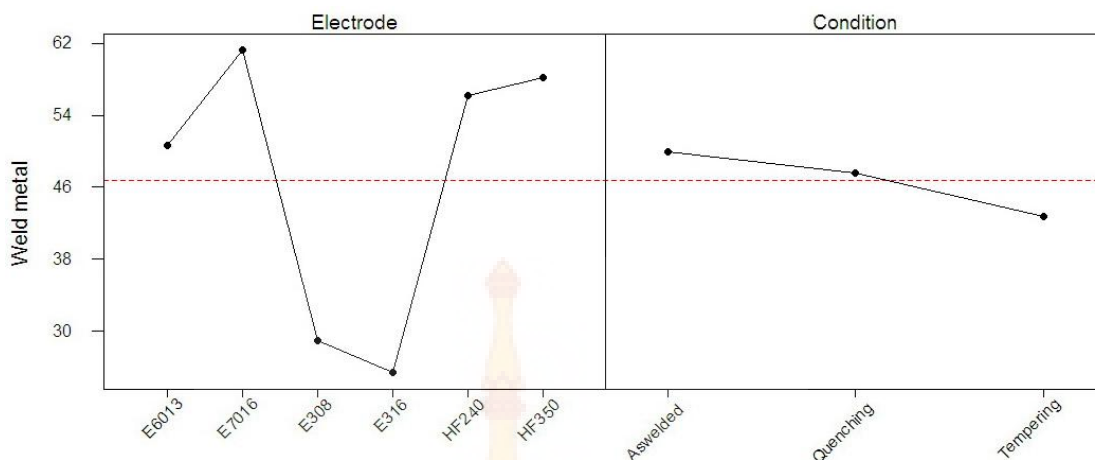
| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS | F     | P     |
|----------------|----|---------|---------|--------|-------|-------|
| Electrode Type | 5  | 3662.76 | 3662.76 | 732.55 | 25.09 | 0.000 |
| Condition      | 2  | 157.65  | 157.65  | 78.82  | 2.70  | 0.115 |
| Error          | 10 | 291.93  | 291.93  | 29.19  |       |       |
| Total          | 17 | 4112.34 |         |        |       |       |

Unusual Observations for Weld metal

| Obs | Base metal | Fit     | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|------------|---------|--------|----------|----------|
| 9   | 37.4000    | 46.6944 | 3.6020 | -9.2944  | -2.31R   |

R denotes an observation with a large standardized residual.

จากตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 จะเป็นผลการวิเคราะห์จะเป็นผลการวิเคราะห์ผลตามการออกแบบการทดลองเชิง Factorial โดยผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปร Electrode Type มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (HRC) ของบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจาก  $\alpha = 0.05$  นั้น มีค่ามากกว่า  $P - \text{value} = 0.0001$  ซึ่ง  $< \alpha = 0.05$  นั่นคือ Electrode Type ที่ต่างกัน มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (HRC) ของบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11



ภาพที่ 4.32 ภาพแสดง Main Effects Plot for HRC ของกราฟตัวแปร Electrode Type และ ตัวแปร Condition ที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)

จากภาพ Main Effects Plot for HRC จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของตัวแปร Electrode Type จะมีลักษณะของเส้นลาดชันลงมา ไม่มีแนวโน้มขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Electrode Type มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังจากการเชื่อม แต่เส้นกราฟของตัวแปร Condition จะมีลักษณะแนวโน้มของเส้นขนานกับเส้นอ้างอิง (Reference Line) จึงสรุปได้ว่า ตัวแปร Condition ไม่มีผลกระทบต่อค่าความความแข็ง (HRC) ของบริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) ของวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ภายหลังจากการเชื่อม

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

การศึกษาคูณสมบัติความแข็งแรงของเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 และลักษณะของรอยเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้า ภายหลังการชุบแข็ง(Quenching) เพื่อดูคุณสมบัติความแข็งแรงของเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD 11 ว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุลดลงมากเท่าไร เพื่อนำไปประกอบกับการซ่อมแซมชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักรที่ทำจากเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักรที่ทำจากเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เมื่อทำการซ่อมบำรุงแล้วมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักรก่อนที่จะเกิดการเกิดความเสียหายมากที่สุด จึงควรทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 และตัวแปรสำคัญในการทดลองครั้งนี้คือ ลวดเชื่อม 6 ชนิด คือ E 6013, E 7016, E308, E 316, HF240 และ HF 350 ลวดเชื่อมที่แตกต่างชนิดกัน จะเป็นการกำหนดอัตราการเย็นตัวของวัสดุ โครงสร้างภายในหลังการเชื่อมและค่าความแข็งแรงของวัสดุ และเมื่อทราบอัตราอัตราการเย็นตัว โครงสร้างภายในและค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ต่างกันทำให้สามารถวางแผนกระบวนการซ่อมแซมชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักรและควบคุมเกี่ยวกับต้นทุนและเวลาในการผลิตได้สะดวกขึ้น

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการนำผลของค่าความแข็งแรงของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 และลักษณะของรอยเชื่อมภายหลังการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้า ภายหลังการชุบแข็ง(Quenching) มาวิเคราะห์แนวโน้มด้วยวิธีเชิงกราฟและวิธีการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า

5.2.1 ลวดเชื่อม E 6013 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)มีความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 60 HRC เป็นผลมาจากธาตุต่างๆ ภายในลวดเชื่อมเข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ส่วนบริเวณโลหะงาน(Base metal)มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 56 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการอบคลายความแข็งแรง(Tempering) ในระหว่างการเชื่อม

5.2.2 ลวดเชื่อม E 7016 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)มีความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 62 HRC เป็นผลมาจากธาตุต่างๆ ภายในลวดเชื่อมเข้าไปผสมระหว่างกระบวนการเชื่อม ส่วนบริเวณโลหะงาน

(Base metal)มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 57 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการอบคลายความแข็ง (Tempering) ในระหว่างการเชื่อม

5.2.3 ลวดเชื่อม E 308 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)มีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 21 HRC เป็นผลมาจากธาตุต่างๆ ในลวดเชื่อมคงคุณสมบัติเดิมไว้ ส่วนบริเวณโลหะงาน(Base metal)มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม เป็นผลให้คงคุณสมบัติเดิมไว้หลังการชุบแข็ง(Quenching)

5.2.4 ลวดเชื่อม E 316 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal)มีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 23 HRC เป็นผลมาจากธาตุต่างๆ ในลวดเชื่อมคงคุณสมบัติเดิมไว้ ส่วนบริเวณโลหะงาน(Base metal)มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม เป็นผลให้คงคุณสมบัติเดิมไว้หลังการชุบแข็ง(Quenching)

5.2.5 ลวดเชื่อม HF 240 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) และบริเวณโลหะงาน(Base metal)มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 60 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อมไม่มีผลทำให้เหล็กเกรด SKD 11 มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

5.2.6 ลวดเชื่อม HF 350 บริเวณเนื้อเชื่อม(Weld metal) และบริเวณโลหะงาน(Base metal)มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 61 HRC ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆภายในลวดเชื่อมไม่มีผลทำให้เหล็กเกรด SKD 11 มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

5.2.7 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง(Factorial) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมตัวของตัวแปรสรุปได้ว่า ลวดเชื่อม และ Condition ในกระบวนการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 จากผลการวิเคราะห์พบว่าถ้าหากใช้ลวดเชื่อม HF 240 ที่ Condition การอบคลายความแข็ง (Tempering)ทำให้ได้ค่าความแข็ง (HRC) ของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 58 HRC โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 หลังการชุบแข็ง คือ ประมาณ 58-64 HRC ซึ่งผลค่าความแข็งที่ได้ใกล้เคียงกับค่าความแข็งของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 หลังการชุบแข็งมากที่สุด

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการนำเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ใช้เป็นวัสดุผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือเครื่องจักร คณะผู้จัดทำจึงได้เสนอแนวทางการศึกษาคุณสมบัติของเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ซึ่งมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.3.1 ในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ควรมีการอุ่นชิ้นก่อนทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงานระหว่างเชื่อม

5.3.2 ควรมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเชื่อมและเปลี่ยนเงื่อนไขการเชื่อมอื่นๆ เช่น กระแสไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมและควรมีการปรับเอียงองศาของหัว เป็นต้น เพื่อ ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมไฟฟ้า มากที่สุด



## บรรณานุกรม

- [1] ศิวะพงษ์ ลัมพาภิวัฒน์. 2550. การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นด้วยการเชื่อมเลเซอร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] สมหมาย สารมาท, วิชัย ฉัตรทินวัฒน์. 2541. การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] นายทวีศักดิ์ แวงเมฆ. 2551. การปรับปรุงคุณภาพด้านการชุบแข็งของแม่พิมพ์ทูปขึ้นรูปร้อนเหล็กกล้า JIS SKD61 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ. 2545. การศึกษาอิทธิพลของช่องว่างคมตัดระหว่างฟันซ์และคายที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] วรุณี จุฑาฤทธิ์, ภูมินท์ ลักษมีมงคลชัย. 2550. การอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ SKD61. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] A.P. Mackwood, R.C. Crafer. 2005. **Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review**, The University of Essex, Colchester.
- [7] มานพ ดันตระบัณฑิตย์. 2546. การทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ศ.ส.ท.