

การศึกษากระบวนการเชื่อมท่อกับเพลลาวัสดุ AISI 304 ด้วยการเชื่อมด้วยแรง  
เสียดทาน

A STUDY OF FRICTION WELDIND PROCESS ON AISI 304  
STAINLESS STEEL PIPE AND SHAFT



ธีรพล เกษตรสิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

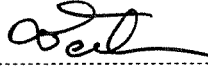
การศึกษากระบวนการเชื่อมต่อกับเพลลาวัสดุ AISI 304 ด้วยการเชื่อมด้วยแรง  
เสียดทาน



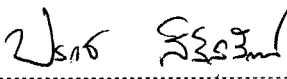
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

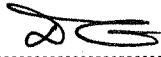
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษากระบวนการเชื่อมท่อกับเพลลาวัสดุ AISI 304 ด้วยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน  
A Study of Friction Welding Process on AISI 304 Stainless Pipe and Shaft  
ชื่อ - นามสกุล      นายธีรพล เกษตรสิน  
สาขาวิชา      วิศวกรรมการผลิต  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.  
ปีการศึกษา      2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปรานีตพลกรัง, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ปรกช สิริสุวัฒน์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการเชื่อมต่อกับเพลลาวัสดุ AISI 304 ด้วยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน
นักศึกษา	นายธีรพล เกษตรสิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมที่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่ต้องการตัวประสานในการเชื่อม ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อม จึงส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทาน ที่เหล็กกล้าไร้สนิมหน้าตัดกลมแบบท่อและเพลลา ซึ่งเพลลาต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 32 มิลลิเมตร และเพลลาท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 32 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 26 มิลลิเมตร และขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไข ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที แรงดันในการกดแช่ 20 บาร์ 10 วินาที และแรงดันในการกดอัด 25, 30 และ 35 บาร์ เวลาในการอัด 5, 7 และ 9 วินาที เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็ง ซึ่งผลการทดลองจะถูกนำมาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกับการเชื่อมทิก โดยจะทดสอบแรงดึง ทดสอบความแข็ง และ ศึกษาโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคจากชิ้นงานที่มีตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มแรงดันในการกดอัดชิ้นงานและเพิ่มวินาทีในการกดชิ้นงานส่งผลต่อขนาดของครีปชิ้นงาน และเพิ่มความร้อนในการหลอมละลายมากขึ้น จะส่งผลต่อการหลอมลึกและการเกาะยึดของรอยต่อ ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน การเพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการลดขนาดของเกรนและช่องว่างระหว่างเม็ดเกรน ตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุด แรงดันในการกดอัด 35 บาร์ เวลาในการอัด 9 วินาที

**คำสำคัญ:** การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โครงสร้างมหภาคและจุลภาค

**Thesis Title** A Study of Friction Welding Process on AISI 304 Stainless Steel Pipe and Shaft  
**Name – Surname** Mr. Tirapon Kasetsin  
**Program** Manufacturing Engineering  
**Thesis Advisor** Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.  
**Academic Year** 2019

## ABSTRACT

Friction welding has become increasingly popular in industrial work as the method offers numerous advantages including no metal fillers required, and short welding time. However, due to very high heat generated at the joint being welded, changes affecting mechanical properties at microstructure of the welding material occur.

The research examines parameters affecting the friction welding of AISI 304 stainless steel pipe and shaft specimens with an outside diameter of 32 mm, an inside diameter of 26 mm, and 100 mm in length. The conditions exerted while welding involved the speed of 2500 rpm/min, the prepressure under 20 bars at 10 seconds, compression pressures under 25, 30 and 35 bars at the compression intervals of 5, 7 and 9 seconds, respectively. After the welding, the mechanical properties of specimens were tested and compared with those obtained by means of TIG welding. This included tensile test, hardness test, and the examination of both the macrostructure and microstructure of specimens with optimum parameters.

The results were summarized as the following. Increase of pressure level and time of pressure affected the burr size of the workpieces. Increase of heat during the melting affected the penetration of melting and the strength of joints, which increased the tensile strength of the workpieces. The increase of tensile strength resulted from reduction of the size of grains and the space between them. It was concluded that suitable parameters for maximum strength were compression pressure under 35 bars, and the compression time of 9 seconds.

**Keywords:** friction welding, AISI 304 stainless steel, macrostructure and microstructure

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จากคณาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง และ ดร.ปรกต สิริสุวัฒน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและคอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอ กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบความแข็งแรงโลหะ เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องกลึง เครื่องเลื่อย

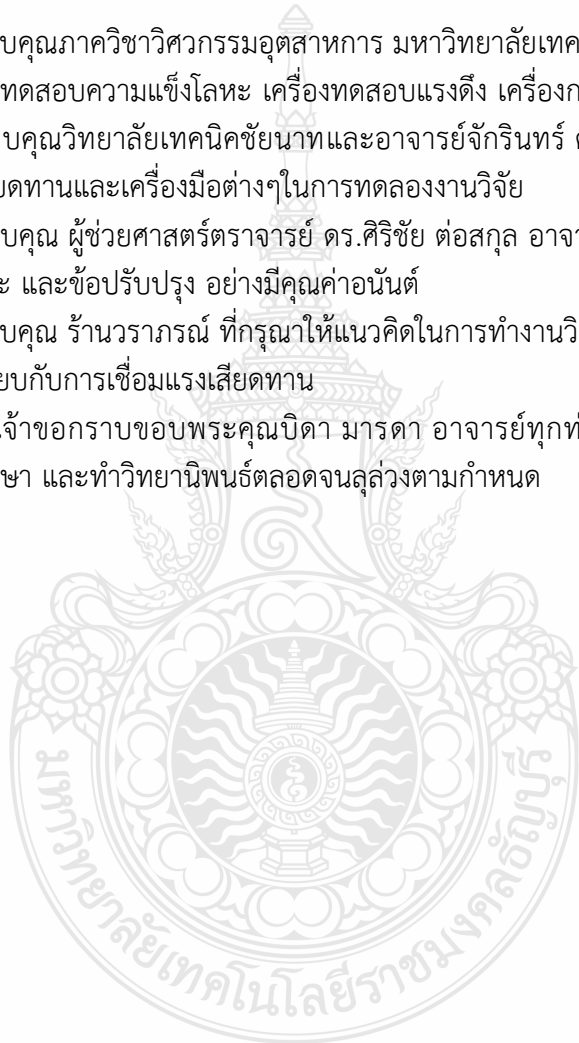
ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคนิคชัยนาทและอาจารย์จักรินทร์ คงสิบ ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและเครื่องมือต่างๆในการทดลองงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ร้านวารภรณ์ ที่กรุณาให้แนวคิดในการทำงานวิจัยและ ชี้แจงงานการเชื่อมทิกสำหรับนำมาเปรียบเทียบกับกรเชื่อมแรงเสียดทาน

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนลุล่วงตามกำหนด

นายธีรพล เกษตรสิน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 แนวคิดหรือที่มาของงานวิจัย.....	12
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม.....	17
2.3 ระบบไฮดรอลิก.....	23
2.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	27
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ.....	29
2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบทางโลหะวิทยา.....	38
2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างผลึก.....	41
2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการรีดขึ้นรูปโลหะแบบก้อน.....	44
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 การเตรียมเครื่องมือ.....	47
3.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	49
3.3 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบการเชื่อมทิก.....	52
3.4 การวัดผล.....	54
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	58
4.1 ขนาดครีบกาวเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	58
4.2 ผลการทดสอบแรงดึง.....	62
4.3 ผลการทดสอบความแข็ง.....	64
4.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก.....	68
4.5 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	74
4.6 การอภิปรายผล.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	82
5.1 สรุปผลการทำโครงการ.....	82
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม .....	84
ภาคผนวก .....	86
ภาคผนวก ก ผลการทำ Pre-Test.....	86
ภาคผนวก ข ชิ้นงานทดสอบ.....	94
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบแรงดึง.....	100
ภาคผนวก ง ชิ้นงานทดสอบ.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	108





## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 304.....	28
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	28
ตารางที่ 2.3 รูปร่างและขนาดขั้นต่ำทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) หน่วยเป็น มม. ....	35
ตารางที่ 3.1 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 3 วินาที.....	49
ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ 10 วินาที ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที.....	50
ตารางที่ 3.3 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 10 วินาที และเวลากดอัด 5, 7, และ 9 วินาที ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที.....	50
ตารางที่ 3.4 ค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	52
ตารางที่ 4.1 ค่าการวัดขนาดครีบของแต่ละตัวแปรจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน d1 และ d2....	59
ตารางที่ 4.2 ค่าการวัดขนาดครีบจากการเชื่อมทิก d1 และ d2.....	59
ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดระยะยุบของชิ้นงานหลังเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	61
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทาน.....	62
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	65



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน.....	18
รูปที่ 2.2 จังหวะหมุนเริ่มการเชื่อม.....	18
รูปที่ 2.3 จังหวะหมุนเพื่อเสียดสี.....	19
รูปที่ 2.4 จังหวะอัด.....	19
รูปที่ 2.5 กระบวนการเชื่อมทิก.....	21
รูปที่ 2.6 เครื่องไฮดรอลิกและกระบอกสูบไฮดรอลิก.....	23
รูปที่ 2.7 หัวกดเพชรทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม.....	31
รูปที่ 2.8 ลักษณะของชั้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่นและแบบแท่ง.....	33
รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงดึง และระยะยึด.....	34
รูปที่ 2.10 ชั้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) .....	35
รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	36
รูปที่ 2.12 ความเค้น - ความเครียด ซ้ายมีจุดคราก ขวาไม่พบจุดคราก.....	37
รูปที่ 2.13 ความเค้น - ความเครียด ซ้ายมีจุดคราก ขวาไม่พบจุดคราก.....	39
รูปที่ 2.14 กล้อง Microscope.....	41
รูปที่ 2.15 ผลึก BCC.....	41
รูปที่ 2.16 ผลึก FCC.....	42
รูปที่ 2.17 ผลึก HCP .....	42
รูปที่ 2.18 แสดงการเกิด Grain.....	43
รูปที่ 2.19 ผลการรีดขึ้นรูปร้อนทำให้เกรนเปลี่ยนแปลง.....	45
รูปที่ 2.20 การรีดเป็นแผ่น.....	45
รูปที่ 2.21 การรีดขึ้นรูป (Shape rolling).....	45
รูปที่ 2.22 การการรีดวงแหวนหรือห่วง (Ring rolling).....	46
รูปที่ 2.23 การรีดเกลียว (Thread rolling).....	46
รูปที่ 3.1 เครื่องกลึงแนวนอน.....	47
รูปที่ 3.2 ชุดไฮดรอลิก.....	48
รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมทิกของทางโรงงาน.....	48
รูปที่ 3.4 เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด 32 × 100 มิลลิเมตร.....	49
รูปที่ 3.5 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง.....	51
รูปที่ 3.6 ค่าตัวแปรในการเชื่อมทิก.....	52
รูปที่ 3.7 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง.....	53
รูปที่ 3.8 ลักษณะรอยเชื่อมทิก.....	53
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึง และเพื่อทดสอบแรงดึง.....	54
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 เครื่องไมโครคัดเตอร์.....	55
รูปที่ 3.12 เครื่องตรวจสอบความแข็ง Microhardness Vickers .....	55
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวนอน (Horizontal) .....	56
รูปที่ 3.14 เครื่องขีดกระดาศทราย .....	56
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope).....	57
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป .....	57
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่เปรียบเทียบกับงานรอยเชื่อม .....	58
รูปที่ 4.2 การวัดครีปของชิ้นงาน .....	59
รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยขนาดรอยเชื่อม d1.....	60
รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยขนาดรอยเชื่อม d2.....	60
รูปที่ 4.5 การวัดระยะยุบของชิ้นงานหลังเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน .....	61
รูปที่ 4.6 การทดสอบแรงดึงด้วยแรงเสียดทาน.....	62
รูปที่ 4.7 ลักษณะกราฟทดสอบแรงดึง.....	63
รูปที่ 4.8 ลักษณะของแนวเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง.....	63
รูปที่ 4.9 ค่าการทดสอบแรงดึงจากการเชื่อมทิก .....	64
รูปที่ 4.10 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Interface Zone.....	65
รูปที่ 4.11 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Heat Affected Zone .....	66
รูปที่ 4.12 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Base Zone.....	67
รูปที่ 4.13 ค่าการทดสอบความแข็งจากการเชื่อมทิก.....	68
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก .....	68
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก ที่ดีที่สุด.....	69
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Interface Zone ของการเชื่อมด้วยแรง เสียดทานและการเชื่อมทิก .....	70
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Heat Affected Zone ของการเชื่อมด้วย แรงเสียดทานและการเชื่อมทิก.....	71
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Best Zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการเชื่อมทิก.....	72
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก.....	73
รูปที่ 4.20 โครงสร้างใหม่ภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที	74
รูปที่ 4.21 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที	74
รูปที่ 4.22 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที	75
รูปที่ 4.23 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงทิก.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 บริเวณ 5 ตำแหน่งที่ทดสอบโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	76
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ความดัน 35 บาร์ 9 วินาที...	77
รูปที่ 4.26 บริเวณ 5 ตำแหน่งที่ทดสอบโครงสร้างจุลภาคและ ของการเชื่อมทิก .....	78
รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานการเชื่อมด้วยทิก .....	79
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค Interface zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและงานเชื่อมทิก.....	80



# บทที่ 1

## บทนำ

ศักยภาพของอุตสาหกรรมงานเชื่อมของประเทศไทยในปัจจุบันไม่สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้ทั้งยังมีต้นทุนการผลิตที่สูงและยังต้องการบุคลากรที่มีความชำนาญสูงแถมมีจำนวนน้อย และยังเป็นส่วนหนึ่งของปัญหาที่ทำให้เกิดผลเสียต่อผลผลิต จึงเป็นสาเหตุนำไปสู่การพัฒนาแนวทางใหม่ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตโดยใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอันจะนำไปสู่การยกระดับมาตรฐาน และความสามารถในการแข่งขันอุตสาหกรรมงานเชื่อมในประเทศ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยมีการนำเอาความรู้ทางด้านเทคนิค และ เทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้เป็นแนวคิด แล้วมีการนำไปประยุกต์ พัฒนาการให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดผลผลิตที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนด จึงทำให้เกิดการแข่งขันขึ้นทางด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ทางด้านกีฬา ฯลฯ ซึ่งการเชื่อมนี้ก็เป็นส่วนหนึ่งของวงการทางด้าน อุตสาหกรรม โดยจะนำเอาการเชื่อมเข้าไปประกอบชิ้นงานให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการจัดสร้าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด โดยในสมัยใหม่จะนิยมใช้กระบวนการเชื่อมที่มีความรวดเร็ว แนวยืดหยุ่น การยึดติดหรือการเชื่อมซึมลึกได้ดี แต่ก็ยังต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญ ในการเชื่อม เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ และชิ้นงานมีความคงทนแข็งแรง สามารถรับแรงที่มากระทำได้ ซึ่งก็จะต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการปฏิบัติงานเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เทคโนโลยีการเชื่อมในประเทศเป็นที่นิยมต่ออุตสาหกรรม และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเครื่องมือที่ใช้จำนวนมาก เวลาในการทำงานมาก จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการเชื่อมเป็นแบบเชื่อมด้วยแรงเสียดทานซึ่งการเชื่อมแรงเสียดทานนั้นทำโดยอาศัยการเสียดสี ระหว่าง 2 ชิ้นงาน โดยให้ชิ้นงานหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยการหมุน (Rotation) ส่วนอีกชิ้นงานหนึ่งที่อยู่นิ่ง (Static) ทำการเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่หมุน ทำให้ชิ้นงานทั้งสองเกิดแรงเสียดทานสูงมากจนเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายกลายเป็นลักษณะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งปัจจุบันการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกับการเชื่อมทิกนั้น ยังไม่มีการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แบบท่อและเพลลาแต่อย่างใด และค่าตัวแปรความดันกับเวลามีผลต่อค่าแรงดึงและความแข็งอย่างไร

งานวิจัยนี้กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมาทดแทนวิธีการเดิมโดยจะศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่องานเชื่อมระหว่างท่อกับเพลลา คือ ความเร็วรอบ ความดัน และเวลา จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมทิกเพื่อตัดสินใจเลือกกระบวนการเชื่อมที่ดีที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรในที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทาน
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทานกับการเชื่อมทิก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทานกับการเชื่อมทิก

## 1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 สำหรับการวิจัยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เหล้าตันซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 32 มิลลิเมตร และ เหล้าท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 32 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 26 มิลลิเมตร และขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร
- 1.3.2 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน 2,500 รอบ/นาที
- 1.3.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานแช่ชิ้นงาน 10 วินาที เวลาในการกดอัด 5 วินาที 7 วินาที และ 9 วินาที ตามลำดับ
- 1.3.4 ความดันที่ใช้ในการกดแช่ 20 บาร์ และความดันที่ใช้ในการกดอัด 25 บาร์ 30 บาร์ และ 35 บาร์ ตามลำดับ
- 1.3.5 ทดสอบแรงดึงขนาดชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 32 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 26 มิลลิเมตร และขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร
- 1.3.6 ทดสอบความแข็ง (Microhardness Vickers)
- 1.3.7 ศึกษาโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมแรงเสียดทานและการเชื่อมทิกด้วยชิ้นงาน
- 1.3.8 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจากการเชื่อมแรงเสียดทานด้วยชิ้นงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยการปฏิบัติงานจริง
- 1.4.2 ทำให้ทราบหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก
- 1.4.3 ทำให้ทราบตัวแปรที่เหมาะสมของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้น เป็นกระบวนการเชื่อมหนึ่ง ที่มีความสะดวกและทำการเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในการเชื่อมนั้นจะอาศัยความเร็วรอบ (Speed Round ) ความดัน (Pressure) เวลา (Time) เป็นอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมด้วย การเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากแบบ ( Mass product ) และนิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมยานยนต์

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 M.Kimura, K.Suzukib1, M.Kusakaa and K.Kaizua [1]

การศึกษาผลของสภาวะการเสียดทานของการเชื่อมต่อกันระหว่าง อลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยจะทดสอบการความต้านทานแรงดึงและความเหนียวรั้งการตัดงอของรอยเชื่อมข้อต่อระหว่างอลูมิเนียมบริสุทธิ์และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการทดสอบจะใช้เครื่องเชื่อมแรงเสียดทาน โดยมีเงื่อนไขตัวแปรในการเชื่อม ดังนี้ ค่าความเร็วรอบ 1,650 รอบต่อนาที แรงเสียดทานในการกดแช่ ที่ 30 MPa และ เวลาการกดแช่ ตั้งแต่ 0.04 ถึง 3.0 วินาที แรงกดอัด 30 ถึง 150 MPa และระยะเวลาในการกดอัด ประมาณ 6.0 วินาที เพื่อสังเกตการณ์การเกิดการรวมตัวกันระหว่างกระบวนการเสียดสีจึงทำการทดลอง 3 วิธีดังต่อไปนี้ 1. เมื่อหมดเวลาในการกดอัดชิ้นงานเครื่องจะทำการหยุดหมุนทันทีทั้ง 2 ชิ้นงาน 2. ชิ้นงานที่หมุนจะค่อยๆหยุดหมุน เมื่อหมดเวลาในการเกิดแรงเสียดทาน แต่ชิ้นงานที่กดอัดแบบยังคงกดอัดของชิ้นงาน เพื่อสังเกตการณ์ประสานของรอยต่อทั้ง 2 ชิ้นงาน 3. ชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นหมุนและกดอัดไปพร้อมกัน

##### 2.1.2 E.Bouarroudja, S.Chikhb, S.Abdia, D.Mirouda [2]

การเชื่อมชิ้นส่วนโลหะทรงกระบอก 2 ชั้น โดยการหมุนอย่างรวดเร็วของชิ้นส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสร้างผลกระทบความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน โดยระยะเวลาของแรงเสียดทานที่มีผลอย่างมาก ต่อการเชื่อมระบบแรงเสียดทาน แบบต่อประสานที่เกิดขึ้น ดังนั้นการหาเวลาในการเสียดสีที่ดีที่สุดเป็นสิ่งสำคัญมากในการเชื่อมที่มีคุณภาพดี โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ในลักษณะของงานนั้น วัตถุประสงค์ ของการศึกษาในครั้งนี้ คือ การกำหนดเวลาการเสียดทานที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการสำหรับข้อต่อประสานที่ดี โดยจะหาตัวแปรที่เหมาะสม โดยการกำหนด วินาทีและแรงในการกดแช่ชิ้นงาน และวินาทีแรงในการกดอัดชิ้นงาน เพื่อศึกษาหาตัวแปรความเร็วรอบที่เหมาะสม จากนั้นทำการหาตัวแปรต่อมาโดยหา วินาทีในการกดอัดชิ้นงาน และนำไปหาตัวแปรถัดมาคือ ความดันในการกดอัดชิ้นงาน จากนั้นนำมาสรุปเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับคุณภาพของรอยเชื่อม

##### 2.1.3 สุรียา ประสมทอง, และคณะ [3]

การเชื่อมด้วยความเสียดทาน เป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการความนิยมใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่นไม่ต้องการตัวประสาน ไม่เกิดควัน หรือมลพิษ ให้อายุเชื่อมที่มีคุณภาพดี เสมอเต็มหน้า ไม่มีรูพรุนหรือฟองอากาศ ตลอดจนใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีความร้อนสูงเกิดขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยทำการทดลองเชื่อมเหล็กคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขการเชื่อม คือ เวลาในการเสียดทาน 2 4 และ 6 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 20 30 และ 40 MPa เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 14 MPa ความเร็วในการหมุนชิ้นงานเชื่อม 900 รอบ เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรง ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำกว่าโลหะฐานซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทาน

#### 2.1.4 สู่ทัศน์ ชมชิต และคณะ [4]

กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน การเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของการเชื่อมโลหะของวัสดุที่คล้ายกัน และแตกต่างกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เพื่อลดขั้นตอนการทำงาน และทำงานได้รวดเร็วเพิ่มมากขึ้น โดยทำการทดลองภายใต้ตัวแปรสำคัญนี้ แรงที่ใช้ในการเสียดสี (P1) ที่ 1.0 MPa, เวลาที่ใช้ในการเสียดสี(t1) ที่ 8 วินาที, แรงที่ใช้ในการอัด (P2) ที่ 1.5 MPa, 2.0MPa และ 2.5 MPa, เวลาที่ใช้ในการอัด(t2) ที่ 2, 3 และ 4 วินาที และความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบต่อนาที จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบ และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้แรงและเวลาในการอัดที่เหมาะสมมีผลต่อการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง การเชื่อมโลหะ

#### 2.1.5 สุรสิงห์ อารยางค์กูร, และคณะ [5]

กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีความร้อนสูงเกิดขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อม จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยทำการทดลองเชื่อมเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1050) หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมคือ เวลาในการเสียดทาน 9 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 10 บาร์ เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 60 บาร์ และความเร็วในการหมุนชิ้นงานเชื่อม 1200 รอบต่อนาที เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรง โดยการทดสอบดึงและนำชิ้นงานมาทดสอบหาค่าความแข็งแรง ตลอดจนศึกษาลักษณะ และองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อม ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานเดิม ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดจากการที่เกรนของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียดมากกว่าเกรนเดิมของเหล็กก่อนทำการเชื่อม อย่างไรก็ตามกลับพบว่าค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมนั้นลดลง โดยพบว่าที่บริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมนั้น มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเกือบเท่าชิ้นงานเดิมที่บริเวณห่างจากกลางรอยเชื่อมออกมา ซึ่งการศึกษาลักษณะ และองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาค พบว่าสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนเฟสที่บริเวณรอยเชื่อม จากเฟสเพิลไลท์ (Pearlite)ซึ่งมีค่าความแข็งแรงมากกว่าไปเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่า



### 2.1.6 ช่วงชัย ชุปวา, และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ [6]

ในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีตัวแปรหลายตัว ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมบทความนี้จะเสนอถึงอิทธิพลของเวลาในการเสียดทาน และแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กเพลลาขาว AISI 1015 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีชิ้นงานทดลองทั้งสิ้น 768 ชิ้น ทำการทดลองภายใต้ เวลาในการเสียดทาน 4 ค่า เวลาในการอัด 4 ค่า แรงดันในการเสียดทาน 3 ค่า แรงดันในการอัด 4 ค่า และความเร็วรอบในการเสียดทาน 4 ค่า จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบมาตรฐาน ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เฉพาะอิทธิพลของเวลาในการเสียดทาน และความดันในการอัดเท่านั้น ซึ่งได้ข้อสรุปว่า เมื่อเวลาและแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ส่วนอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆ จะได้นำมาศึกษาวิเคราะห์

### 2.1.7 จักรินทร์ คงสิบ [7]

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมเพิ่มมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่ต้องการตัวประสาน ในการเชื่อม ไม่เกิดควัน รอยเชื่อมมีคุณภาพดีเสมอเต็มหน้า ไม่มีรูพรุน ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อม จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนปานกลาง (Annealing) และทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร จำนวน 720 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมคือ แรงดันในการอัด 20, 30 และ 40 บาร์ เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที อุณหภูมิในการอบอ่อน 790, 850 และ 970 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่ออนาที เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็ง ทดสอบแรงดึง และองค์ประกอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อมการเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทานระหว่างอุณหภูมิปกติของชิ้นงานและการนำ ชิ้นงานไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่าที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมชิ้นงาน ค่าแรงดึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน แต่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติของรอยเชื่อมจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมีเกรนที่ละเอียดมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อน จึงส่งผลทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากกว่า

จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างท่อและเพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ความดันในการกดอัด 25 30 และ 35 บาร์ เวลาที่ 5 7 และ 9 ความเร็วรอบที่ 2500 รอบ เพื่อนำมาทดแทนกระบวนการเชื่อมที่อุตสาหกรรมผลิตลูกสูบปั้มน้ำที่ใช้เวลาในการเชื่อมมากโดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการเชื่อมที่กระทำในลูกสูบปั้มน้ำมีแรงดึงและแรงกดในสภาวะสุญญากาศจากนั้นวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงและความหนาของครีปในแนวเชื่อม เพื่อสรุปตัวแปรที่ดีที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม

เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุ ส่วนใหญ่เป็นโลหะและเทอร์โมพลาสติก โดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในบ่อหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งแตกต่างกับการบัดกรีอ่อน และการบัดกรีแข็ง ซึ่งไม่มีการหลอมละลายของชิ้นงาน มีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในการเชื่อม เช่น การใช้เปลวไฟแก๊สออกซิเจน การอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้โอเล็คตรอนบีม การเสียดสี การใช้คลื่นเสียง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมมีการเชื่อมในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน กรรมวิธีการต่อโลหะให้ติดกันโดยการให้ความร้อน หรือแรงกดหรือทั้งสองอย่างร่วมกันบริเวณที่ต้องการต่อเชื่อมโลหะนั้นให้ประสานติดเป็นชิ้นเดียวกันซึ่งแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเชื่อมด้วยการหลอมละลาย (Fusion welding) เป็นการเชื่อมประสานโลหะให้ติดกัน โดยให้ความร้อนที่บริเวณแนวเชื่อมจนเกิดการหลอมละลายประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ความร้อนในการหลอมละลายอาจจะเกิดจากการอาร์ค หรือความร้อนจากการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจนรวมทั้งความร้อนจากการอาร์คของอิเล็กโทรดแล้วหลอมละลายลงไปแนวเชื่อม ตลอดจนแหล่งความร้อนจากเทคโนโลยีขั้นสูงในรูปแบบอื่น ๆ แสงเลเซอร์ พลาสมา หรือความถี่สูง เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่สองเป็นการเชื่อมด้วยความดัน (Welding with pressure) เป็นการเชื่อมโลหะให้ติดกันโดยให้ความร้อนที่บริเวณแนวเชื่อมจนอุณหภูมิเกือบจะถึงจุดหลอมละลายหรืออยู่สถานะพลาสติก (Plasticity) ขณะเดียวกันก็ให้แรงดันแก่ชิ้นงานให้ติดกันบริเวณพื้นที่ได้รับแรงกด ซึ่งปัจจุบันได้พัฒนาให้เป็นการเชื่อมแบบอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หรือการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์

### 2.2.1 การเชื่อมแบบเสียดทาน

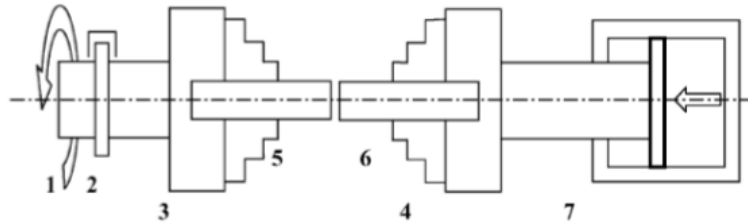
การเชื่อมด้วยความดันแหล่งพลังงานความร้อนในการเชื่อมได้จากการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงาน จากแรงเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีของชิ้นงานโดยตรง แรงที่เกิดจากการขัดถูหรือการหมุนของชิ้นงานด้วยความเร็ว จนเกิดความร้อนสูงถึงช่วงสถานะพลาสติกบริเวณแนวเชื่อมภายใต้แรงกดดันของชิ้นงานโดยไม่มีพลังงานอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในการให้ความร้อน ซึ่งปัจจุบันกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานได้รับการพัฒนาให้เป็นส่วนหนึ่งของสายการผลิตในอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ โดยได้พัฒนาให้อยู่ในรูปแบบเครื่องจักรและหุ่นยนต์เชื่อม

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานจะสามารถเชื่อมโลหะได้หลายชนิด ทั้งโลหะที่เหมือนกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงแต่มีบางพวกที่เชื่อมเสร็จแล้วรอยเชื่อมที่ได้เสร็จแล้วเพื่อให้ได้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงาน และโลหะกลุ่มนี้ส่วนมากจะได้แก่กลุ่มโลหะผสมและเหล็กกล้าไร้สนิมที่ชุบแข็งได้ แต่กลุ่มเหล็กคาร์บอนและโลหะผสมจะง่ายต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน [8]

#### 1) ส่วนประกอบของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน (รูปที่ 2.1)

- มอเตอร์ (Motor)
- เบรก (Brake)
- หัวจับเครื่องกลึงหมุน (Rotating Chuck)
- หัวจับเครื่องกลึงไม่หมุน (Non Rotating Chuck)

- ชิ้นงานหมุน (Rotating Workpiece)
- ชิ้นงานไม่หมุน (Non Rotating Workpiece)
- กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic Cylinder)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน [8]

## 2) หลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

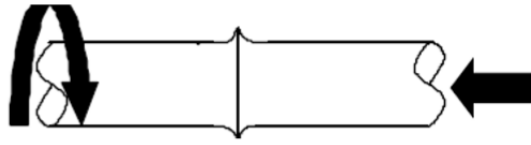
กระบวนการเชื่อมด้วยเสียดทานนั้นอาศัยหลักการการเสียดสีทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้ชิ้นงานอ่อนตัวในระดับที่สามารถอัดให้ติดกันได้ ในกระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองนั้น ทำได้โดยการหมุนชิ้นงานด้านหนึ่งด้วยความเร็วและค่าแรงบิดที่เหมาะสม จากนั้นให้แรงดันที่เหมาะสมแก่ชิ้นงานอีกด้านหนึ่งให้เคลื่อนเข้าหาชิ้นงานด้านที่กำลังหมุน เมื่อชิ้นงานสัมผัสกันทำให้เกิดการเสียดสี จนเกิดความร้อนที่หน้าสัมผัสทั้งสองจนเกิดการอ่อนตัวจึงหยุดการหมุนของชิ้นงานอย่างรวดเร็วพร้อมทั้งให้แรงดันที่เหมาะสม ให้ชิ้นงานเคลื่อนเข้าอัดติดเป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานทั้งสองได้รับจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น แรงบิด แรงดัน ความเร็วรอบในการหมุนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานนั้น เป็นต้น

## 3) บริเวณกระทบร้อน (HAZ)

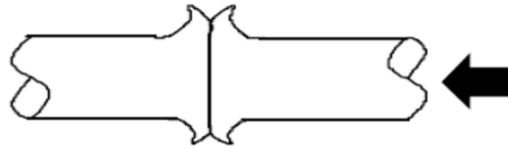
บริเวณที่อยู่ใกล้แนวรอยเชื่อม ซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากขณะทำการเชื่อม แต่มีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอที่จะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อรอยเชื่อม บริเวณนี้จะได้รับความร้อนสูงมากขณะเชื่อมและจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดมาก หรือมีความหนาของชิ้นงานมาก จากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้บริเวณ HAZ มีโครงสร้างที่แข็ง เปราะ และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำ HAZ จึงเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้มาก



รูปที่ 2.2 จังหวะหมุนเริ่มการเชื่อม [6]



รูปที่ 2.3 จังหวะหมุนเพื่อเสียดสี [6]



รูปที่ 2.4 จังหวะอัด [6]

#### 4) ข้อจำกัดของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน [9]

- ชิ้นงานจะต้องเป็นรูปกลมหรือค่อนข้างกลม ณ จุดสัมผัส ขนาดและรูปร่างจะถูกรักษาควบคุมโดยการหมุน
- ชิ้นงานจะต้องทนแรงบิด และแรงดันในแนวแกนระหว่างเกิดความร้อนและแรงอัด
- ตัวจับชิ้นงานจะต้องแข็งแรงและทนต่อ Shock and torque load
- กระบวนการจะต้องมีรูปแบบควบคุมให้อยู่ในแนวราบและ Angular butt – weld ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน
- เครื่องจักรจะต้องออกแบบให้มีการเชื่อมของชิ้นงานเป็นรูปวงกลมหรือเกือบกลม

#### 2.2.2 การเชื่อมแบบทิก (TIG)

การเชื่อมแบบ TIG (Tungsten Inert Gas) TIG ย่อมาจาก TUNGSTEN INERT GAS ใช้การนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสแตน ส่งผ่านไปที่แนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงาน โดยใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งทั่ว ๆ ไปนิยมใช้แก๊สอาร์กอน เป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม มีชื่อเรียกการเชื่อมนี้ว่า GTAW. ย่อมาจาก คำว่า gas tungsten arc welding ชื่อที่เรียกมาจากสมาคมการเชื่อมทางอเมริกา (American welding society หรือ AWS.) การเชื่อมวิธีนี้เบื้องต้นจะเชื่อมโดยไม่ต้องมีเนื้อลวดแต่ใช้ความร้อนเป็นตัวหลอมเนื้องานให้ติดกัน นอกเสียจากการเชื่อมบางชิ้นงานที่อาจจะต้องมีลวดเติมเพื่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน และได้แนวเชื่อมที่ต้องการโดยใช้เชื่อมจำพวก แมกนีเซียม อลูมิเนียม สแตนเลส ปัจจุบันการเชื่อมแบบนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ใช้เชื่อมแม่พิมพ์ ภาชนะบรรจุ ของเหลวและแก๊ส งานประกอบโครงสร้างที่ต้องการความเที่ยงตรง และความแข็งแรงของรอยเชื่อม นอกจากนี้กรรมวิธีการเชื่อม TIG ยังเชื่อมได้ทั้งโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous metals) และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non Ferrous metal) ซึ่งถือว่าเป็นโลหะพิเศษที่ใช้กระบวนการเชื่อมอื่น ๆ ได้ยาก [10]

กรรมวิธีการเชื่อมโลหะแบบทิก (TIG - GTAW) คือความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์ค ระหว่างแท่งทังสเตนอีเล็กโทรด (Tungsten electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมบริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย ซึ่งเรียกว่า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น จนกระทั่งความร้อนจากการอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงานในบริเวณดังกล่าวจนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย ดังนั้นเมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใด ๆ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นหลอมติดกัน แต่เนื่องจากแท่งทังสเตนอีเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือไม่สิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วย กรณีที่ทำการเชื่อมโลหะบาง ๆ อาจไม่จำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer metal) ก็ได้การเชื่อม TIG สามารถเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 0.79 mm ถึง 4 mm [10]

#### 1. อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมด้วยวิธีทิก (TIG-GTAW)

- 1) เครื่องเชื่อม (Power Source)
- 2) ระบบระบายความร้อน (Cooling System)
- 3) แก๊สปกคลุม (Shielding gas)
- 4) หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch & Equipment)

เครื่องเชื่อมทิกควรเป็นเครื่องเชื่อมที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งต้องมีระบบความถี่สูง (H.F) และสวิตช์อัตโนมัติ (Solenoid Valve) สำหรับการควบคุมการไหลของแก๊สและน้ำ เพื่อให้สมบูรณ์ในการหลอมละลายการเชื่อม และการระบายความร้อนของหัวเชื่อมรวมตัวกันอยู่ในเครื่องด้วย โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมจะเป็นแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์-เรกติไฟเออร์ (Transformer - Rectifier) หรือ เครื่องแบบเอนเนอเรเตอร์ ขับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ก็ได้ รวมไปถึงเครื่องเชื่อมแบบ Inverter และยังสามารถนำมาใช้งานได้สะดวกและมีฟังก์ชันเพื่อใช้ให้เกิดความสะดวกมากยิ่งขึ้น ในแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์เรกติไฟเออร์นั้น ผู้ปฏิบัติสามารถเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะงานได้ คือ กระแสตรงขั้วลบ (DCEN, DC-) และกระแสตรงขั้วบวก (DCEP, DC+) หรือ กระแสสลับ (AC) สำหรับระบบความถี่สูงนั้นช่วยให้การเริ่มต้นในการอาร์คง่ายขึ้น เครื่องเชื่อม TIG แบบ Transformer-Rectifier สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสไฟตรง DC และกระแสไฟสลับ AC

#### 2. ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม

กระแสไฟที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมทิก นั้นมี 3 แบบด้วยกันคือ

- 1) กระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN.
- 2) กระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP.
- 3) กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) ACHF.

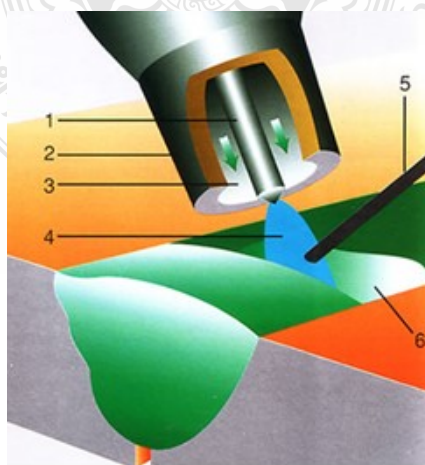
กระแสตรงขั้วลบ หมายความว่า หัวเชื่อมหรือแท่งทังสเตนอีเล็กโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน บรรจุไฟฟ้าลบบไหลจากหัวเชื่อมหรืออีเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 70% และเกิดที่แท่งทังสเตนอีเล็กโทรดประมาณ 30% แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก

กระแสตรงขั้วบวก DCEP กระแสตรงขั้วบวก หมายความว่า หัวเชื่อมหรือทั้งสแตนอิลเล็กโทรดใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ดังนั้น ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 30% และเกิดที่ทั้งสแตนอิลเล็กโทรดประมาณ 70% แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนกว้างกินลึกลงน้อย แ่งทั้งสแตนอิลเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ จะมีขนาดโตกว่าทั้งสแตน อิลเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN และ ACHF

กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง AC.HF กระแสไฟสลับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์มาอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟสลับ จะพบว่าในครึ่งไซเคิลแรกทั้งสแตนอิลเล็กโทรดเป็นขั้วบวกออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานตรงบริเวณที่ทำการอาร์ค จะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้นในครึ่งไซเคิลต่อมาทั้งสแตนอิลเล็กโทรดเป็นขั้วลบ ขณะที่ทั้งสแตนอิลเล็กโทรดจะเย็นลง แต่กลับเกิดความร้อนมากที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสผ่านจาก แ่งทั้งสแตนอิลเล็กโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวกนั้น เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเอาระบบความถี่สูง (High Frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์คในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นกระแสบวก (AC) การทำ เช่นนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแ่งทั้งสแตนอิลเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานได้ ตลอดเวลาและสม่ำเสมอ

กระแสสลับและความถี่สูง (ACHF) มีผลดีต่อการเชื่อมอลูมิเนียมเพราะให้การซึมลึกในการเชื่อม และขจัด Aluminum Oxide ที่พื้นผิวในขณะที่ทำการเชื่อม จึงให้การซึมลึกในการเชื่อมมีผลดี และกระแสไฟฟ้าเชื่อมทำให้ออกไซด์ที่เคลือบผิวของชิ้นงานแตกออกจากกันก่อนที่ชิ้นงานจะละลาย กระแสไฟสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกได้ด้วย สามารถเชื่อมอลูมิเนียมที่มีความบางประมาณ 1 มม. โดยไม่ต้องป้อนลวดเชื่อมและให้ความร้อนก่อนการเชื่อม การใช้ชนิดของกระแสไฟที่แตกต่างกันมีผลกับความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วย จึงเป็นผลให้ลักษณะการกินลึกลงบริเวณที่เกิดการอาร์คนั้น แตกต่างกันไปตลอดจนการเลือกใช้ทั้งสแตนอิลเล็กโทรด ให้เหมาะสมสำหรับกระแสไฟเชื่อม นั้น ๆ ด้วย[11]

### 3. ส่วนประกอบของหัวเชื่อม TIG



รูปที่ 2.5 กระบวนการเชื่อมทิก [12]

1) ตัวทอร์ช (Torch Body) เป็นส่วนลำตัวของหัวเชื่อมและทางเดินของแก๊สปกคลุมน้ำระบายความร้อน รวมไปถึงกระแสเชื่อม

2) ฝาครอบ (Cap) เป็นส่วนปลายสุดของหัวเชื่อมมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สไหลออกและยังเป็น ตัวป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปปนกับแก๊สภายในหัวเชื่อมมีทั้งแบบฝาครอบสั้น (Short Back Cap) และแบบฝาครอบยาว (Long Back Cap)

3) Collet or Electrode Collet เป็นตัวจับแท่งทั้งสแตนซึ่งกำหนดขนาดตามขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทั้งสแตน ทำด้วยทองแดงผสมเป็นตัวนำความร้อนได้ดีและนำไฟฟ้าได้ดี

4) Collet Body ยึดติดกับลำตัวหัวเชื่อมด้วยเกลียว ซึ่งทำด้วยทองแดงผสม ทำหน้าที่บีบจับ Collet ให้จับลวดทั้งสแตนได้แน่น และยังมีรูเพื่อให้แก๊สปกคลุมไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลาย

5) Nozzle ควบคุมทิศทางการไหลของแก๊สปกคลุม Nozzle ทำจากวัสดุหลายชนิด เช่น กระจี๊อง (เซรามิก) โลหะแก้วชนิดที่ทำด้วยเซรามิกจะเป็นที่นิยมใช้และราคาถูก

6) แท่งทั้งสแตนอีเล็กโทรด (Tungsten Electrode) ทำหน้าที่สำหรับการอาร์ค และนำความร้อนไปยังชิ้นงาน ไม่ได้เป็นลวดสำหรับเติมแนวเชื่อม ทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 6,170 องศาเซลเซียส

#### 4. กระบวนการเชื่อมทิก

1) ลวดทั้งสแตน / Tungsten electrode

2) หัวปกคลุมแก๊ส / Nozzle

3) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม / (Argon) Inert atmosphere

4) เปลวอาร์ค / Welding Arc

5) ลวดเติม / Filler metal rod

6) บ่อหลอมละลาย / Molten pool

ข้อดีของการเชื่อมระบบทิก คือ การใช้งานง่าย มองเห็นแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายชัดเจน จากการอาร์คที่สะอาดไม่มีควัน ให้แนวเชื่อมที่สวยงามเพราะไม่ต้องใช้ฟลักซ์ แนวเชื่อมที่ได้ทำให้ไม่ต้องเคาะสแลค ตัดปัญหาแล็กฝังตัวในแนวเชื่อม สาเหตุแนวเชื่อมที่ไม่แข็งแรงจนผู้ร่อนได้ง่าย การเชื่อมทิกนิยมใช้ในการเชื่อมงานบางทั้งสแตนเลส และอลูมิเนียม นอกจากนี้แล้วยังนิยมใช้ในการเชื่อมยึดไส้ (root passes) ในงานเชื่อมท่ออีกด้วย ทั้งยังใช้ในระบบเชื่อมอัตโนมัติ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือการเชื่อมด้วยวิธีนี้มีควันน้อยมากจึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

ข้อด้อยราคาเครื่องเชื่อมค่อนข้างสูง ต้องใช้ความชำนาญในการเชื่อม การเชื่อมที่สามารถทำได้ช้ากว่าการเชื่อมด้วยวิธีอื่น และเกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงานเชื่อมสูงกว่าด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องใช้แก๊ส มีการตั้งค่างานที่ซับซ้อน อีกทั้งต้องมีแหล่งจ่ายไฟและต้องใช้แก๊ส [12]

## 2.3 ระบบไฮดรอลิก (Hydraulics)

ไฮดรอลิกนั้นแต่เดิมมาจากรากศัพท์ในภาษากรีก คือ "Hydro" ซึ่งมีความหมายว่าน้ำ และ "aulis" นั้นหมายถึงท่อ แต่เดิมนั้น คำว่าไฮดรอลิก หมายถึง เฉพาะการไหลของน้ำในท่อเท่านั้น แต่ปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมแล้วไฮดรอลิก หมายถึง การไหลของของเหลวทุก ๆ ชนิด (ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมัน) ที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายทอดกำลังงานในการ เปลี่ยนแปลง กำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล คือการทำให้กระบอกสูบไฮดรอลิกและมอเตอร์ ไฮดรอลิกทำงาน [13]



รูปที่ 2.6 เครื่องไฮดรอลิกและกระบอกสูบไฮดรอลิก

### 2.3.1 โครงสร้างของระบบไฮดรอลิก แบ่งออกเป็น 3 ส่วน

1. ส่วนจ่ายกำลังประกอบด้วย ถังพัก กรอง ปั้มน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนี้ในระบบไฮดรอลิกถือว่าเป็นชุดต้นกำลัง โดยถังพักจะทำหน้าที่เก็บและพักน้ำมันไว้สำหรับใช้กับระบบ ส่วนปั้มน้ำมันไฮดรอลิก จะทำหน้าที่ดูดน้ำมันและส่งจ่ายให้กับระบบในรูปของการไหล โดยรับกำลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ น้ำมันที่ออกจากปั้มนั้นมีทั้งต่อเวลาหรืออัตราการไหล (Flow-rate) ซึ่งมักใช้สัญลักษณ์เป็นตัว  $Q$  ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานในรูปการไหลของของเหลว
2. ส่วนควบคุมประกอบด้วย วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมัน ซึ่งเป็นเพียงอุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่ใช้ในส่วนควบคุมการทำงานของระบบ
3. ส่วนเคลื่อนที่ เป็นกลุ่มของอุปกรณ์ให้งานเชิงกล ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานที่มาจากการไหลของ ๆเหลวในที่นี้คือน้ำมันเป็นพลังงานกล คือ กระบอกไฮดรอลิก นั่นเอง

### 2.3.2 ถังน้ำมันไฮดรอลิกและระบบการกรองน้ำมัน

1. หน้าที่ของถังน้ำมันไฮดรอลิกมีดังต่อไปนี้
  - 1) เป็นที่เก็บและพักน้ำมัน



2) เป็นที่ขจัดสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น เศษผงชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฮดรอลิก น้ำ หรือ เศษผงอื่น ๆ ที่ติดมากับน้ำมันไฮดรอลิก

3) เป็นที่ระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก

4) เป็นที่ขจัดฟองอากาศที่เกิดจากน้ำมันไหลฟุ้งกลับถึงน้ำมัน

5) การออกแบบขนาดของตัวถังน้ำมันไฮดรอลิก นั้นควรจะเผื่อขนาดของถังน้ำมันไว้ สำหรับเป็นพื้นที่ว่างด้านบนของถังน้ำมันประมาณ 10 % ของปริมาณน้ำมัน ทั้งนี้เพื่อให้ ฟองอากาศ เล็ดลอดตัวหนีขึ้นออกจากน้ำมัน ท่อไหลกลับของน้ำมันไฮดรอลิกควรอยู่สูงจากพื้นด้านล่าง ของถังน้ำประมาณ 2 นิ้ว และที่ปลายท่อไฮดรอลิกควรเป็นรูปปากเฉียงเข้าหาผนังของถังน้ำมัน ทั้งนี้ เพราะเมื่อ น้ำมันไหลกลับมานั้นจะได้วิ่งเข้าหาผนังก่อน ซึ่งทำให้สิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่ติดมากับน้ำมัน ไฮดรอลิกกระทบกับผนังและตกลงด้านล่าง ต่อจากนั้นน้ำมันซึ่งได้เอาสิ่งสกปรกออกแล้วบางส่วน ไหลเวียนไปอีกด้านหนึ่งของถังน้ำมันและถูกปั๊มดูดเอาไปใช้งานต่อไปสำหรับท่อขนาดเล็ก ๆ อื่น ๆ นั้น ควรจะอยู่เหนือระดับน้ำมัน เพื่อป้องกันการเกิดคาล์วน้ำในขณะถอดเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนท่อ ท่อดังกล่าวคือ ท่อจากวาล์วควบคุมความดันต่าง ๆ เป็นต้น

2. อุปกรณ์ที่อยู่บนถังน้ำมันไฮดรอลิก ตามปกติแล้วจะประกอบไปด้วยสิ่งต่อไปนี้

1) มอเตอร์ไฟฟ้า ( Electric Motor ) ใช้สำหรับขับปั๊มไฮดรอลิก วิธีการต่อเข้ากับปั๊มส่วนมากมักใช้คัปปลิง ( Coupling ) ชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible Coupling)

2) ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) ทำหน้าที่ดูดและส่งน้ำมันไฮดรอลิกเข้าไปในระบบ

3) วาล์วควบคุมความดัน (Pressure Control Valves) ส่วนมากมักจะเป็นรีลิว วาล์ว (Relief Valve) หรือบางครั้งอาจจะมีวาล์วควบคุมทิศทาง หรืออาจจะมีวาล์วอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่า จะออกแบบวงจรให้มีลำดับการทำงานหรือให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการอย่างไร บางครั้งอาจจะต้อง ออกแบบก๊อมน้ำมันโฟลด์ ซึ่งทำหน้าที่ให้วาล์วต่าง ๆ จับยึดโดยภายในของก๊อมน้ำมันโฟลด์นี้จะต้อง เจาะรูน้ำมันไว้ให้น้ำมันไหลผ่านได้สะดวกแทนการเดินท่อน้ำมันภายนอก ดังนั้นปัญหาการรั่วของ น้ำมันไฮดรอลิกที่เกิดจากการขันข้อต่อในระบบการเดินท่อไม่แน่นก็จะหมดไป แต่สำหรับการใช้ก๊อมน้ำมันโฟลด์ก็มีปัญหาเหมือนกันถ้าหากว่าผู้ออกแบบหรือผู้เจาะรูน้ำมันที่ก๊อมน้ำมันโฟลด์ไม่ดี เช่น ออกแบบหรือเจาะรูให้ชิดกันมากเกินไป เหล็กที่นำมาเจาะนั้นแตกหรือเป็นรอยร้าวซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันที่มีความดันสูง ๆ เช่น ที่ความดัน 5,000 หรือ 6,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แทรกตัวถึงกันได้ เป็น ผลให้การทำงานของระบบผิดพลาด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้บางครั้งหาสาเหตุการทำงานของวงจรที่ผิดพลาด ไม่เจอ บางครั้งก็ต้องทิ้งก๊อมน้ำมันโฟลด์นี้แล้วเจาะก๊อมน้ำมันใหม่ก็ยังมี

4) อุปกรณ์หล่อเย็น (Oil Cooler) ทำหน้าที่ระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกที่มี อุณหภูมิที่สูงเกิน 60°C พอจะสรุปได้ว่า ถังน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องรองรับอุปกรณ์เหล่านี้รวมทั้งน้ำมันไฮดรอลิกได้ ฉะนั้นโครงสร้างจึงต้องแข็งแรงและสามารถเคลื่อนย้ายไปในที่ต่าง ๆ ได้ จะต้องมีส่วนสำหรับ ใช้ยกด้วยรอกหรือ อุปกรณ์ทุ่นแรงอื่น ๆ ได้สะดวก ด้านล่างของถังน้ำมันจะต้องมีช่องว่างเพื่อให้อากาศ ไหลผ่านเพื่อถ่ายเทความร้อนของน้ำมันให้กับอากาศรอบ ๆ บริเวณนั้น

### 2.3.3 ปัมไฮดรอลิกและระบบการควบคุม (Hydraulic Pump & Controls)

การควบคุมปัมด้วยวิธีชดเชยความร้อน (Pressure Compensated Control) ปัมลูกสูบ (Piston Pump) ชนิดปรับปริมาตรได้ (Variable Volume) จะมีแผ่นเอียงเป็นตัวควบคุมการไหลออกของน้ำมัน การเอียงของแผ่นเอียงนี้จะถูกควบคุมด้วยกลไกสปริงและความดันของน้ำมัน ไฮดรอลิก ความดันด้านเอาต์พุตของปัมจะต่ออยู่กับลูกสูบเซอร์โว (Servo Piston) โดยผ่านทางชุดสปูลชดเชย (Compensator Spool) ในจังหวะปกติสปริงจะดันให้แผ่นเอียงมีมุมเอียงสูงสุด แต่เมื่อความดันด้านเอาต์พุตสูงขึ้นทำให้ความดันนี้ชนะแรงสปริงของชุดชดเชยและยอมให้น้ำมันผ่านสปูล (Spool) ออกไปเข้าลูกสูบเซอร์โว ทำให้ความดันน้ำมันจากลูกสูบเซอร์โวไปดันให้แผ่นเอียง มุมเอียงลดน้อยลงเป็นผลให้การส่งน้ำมันออกจากปัมน้อยลงตามไปด้วยน้ำมันภายในของลูกสูบเซอร์โว จะถูกระบายออกทางช่องระบาย (Case) เมื่อความดันทางด้านเอาต์พุตลดน้อยลงกว่าค่าของแรงสปริง ทำให้แรงสปริงดันให้แผ่นเอียงมีมุมเอียงมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งและการส่งน้ำมันก็เพิ่มขึ้นอีกครั้งเช่นกัน สำหรับความดันของน้ำมันภายในห้องชดเชย (Compensator) จะมีรูภายในต่อเข้ากับช่องระบายเพื่อระบายน้ำมันออกทิ้ง

2.3.4 ระบายลูกสูบไฮดรอลิก (hydraulic Cylinders) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่ากำลังของระบบไฮดรอลิกนั้นประกอบด้วยค่า 2 ค่าด้วยกัน คือ แกลลอน/นาที (gallon per minute – GPM) และ ปอนด์/ตารางนิ้ว (Pound / Square Inch – PSI) เมื่อกำลังของระบบไฮดรอลิกส่งเข้าไปในกระบอกสูบแล้ว จะทำให้กระบอกสูบเปลี่ยนกำลังไฮดรอลิกให้เป็นกำลังทางกลไก (Mechanical Power) ในรูปของการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงหรือในรูปของการหมุน ( Rotary )

1. ชนิดของกระบอกสูบ (Cylinder Type) กระบอกสูบชนิดสองทิศทางมีก้านสูบเดี่ยว กระบอกสูบแบบดูเพล็กซ์ กระบอกสูบแบบแทนเต็ม กระบอกสูบชนิดสองก้านสูบ

1) กระบอกสูบชนิดแรก (Double Acting , Single Rod Cylinder) คือ กระบอกสูบชนิดสองทิศทาง มีก้านสูบเดี่ยววิ่งเข้า – ออกภายในกระบอกสูบ

2) กระบอกสูบชนิดที่สอง (Double Rod Cylinder) เป็นแบบสองทิศทาง แต่มีก้านสูบสองข้างต่อออกจากลูกสูบตรงกลางตัวเดียว

3) กระบอกสูบชนิดที่สาม (Tandem Cylinder) เป็นแบบสองทิศทาง ที่มีลูกสูบตั้งแต่สองลูกเป็นต้นไป แต่มีก้านสูบเพียงอันเดียวสำหรับใช้ทำงาน

4) กระบอกสูบชนิดที่สี่ (Duplex Cylinder) เป็นกระบอกสูบชนิดสองทิศทาง แต่ ก้านสูบไม่ต่อกัน

2. ความเร็วของก้านสูบขณะที่สูบวิ่งออก ความเร็วของก้านสูบขึ้นอยู่กับว่าให้มีการบรรจุน้ำมันเข้าลูกสูบได้รวดเร็วเพียงใด ปกติมักวัดกันเป็นหน่วยฟุตต่อนาที (ft / min) ใช้สูตรคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วของก้านสูบ (Rod Speed,ft/min)} = \frac{\text{แกลลอน / นาที} \times 19.25}{\text{พื้นที่ลูกสูบ ( ตารางนิ้ว )}} \quad (2.1)$$

### 3. ข้อสรุปทั้งหมดของกระบอกสูบ

- 1) กระบอกสูบไฮดรอลิก เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของไหล ให้เป็นพลังงานกลในแนวเส้นตรง (Linear Mechanical Power)
- 2) กระบอกสูบไฮดรอลิกแบ่งออกเป็นหลากหลายชนิดต่าง ๆ คือ ชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) ก้านสูบคู่ (Double Rod) ชนิดทิศทางเดียว (Single Acting) ชนิด สองทิศทาง (Double Acting) แบบแทนเต็ม (Tandem) แบบดูเพล็กซ์ (Duplex)
- 3) Major Area คือพื้นที่รับความดันของน้ำมันด้านลูกสูบ (Cap End)
- 4) Minor Area คือพื้นที่รับความดันของน้ำมันด้านก้านลูกสูบ (Rod End)
- 5) ความเร็วของกระบอกสูบ ขึ้นอยู่กับว่าให้มีอัตราการไหลของน้ำมันไปบรรจุในกระบอกสูบได้รวดเร็วเพียงใด
- 6) ในอัตราการไหลของน้ำมันคงที่ ความเร็วของก้านสูบในจังหวะวิ่งกลับจะรวดเร็วกว่าจังหวะวิ่งออก
- 7) อัตราน้ำมันที่ไหลออกจากกระบอกสูบ ด้านก้านสูบของลูกสูบชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) จะมีน้อยกว่าอัตราการส่งน้ำมันที่เข้าทางด้านก้านลูกสูบ
- 8) อัตราน้ำมันที่ไหลออกจากกระบอกสูบ ด้านลูกสูบของลูกสูบชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) จะมีมากกว่าอัตราการส่งน้ำมันที่เข้าทางด้านก้านสูบ
- 9) ทุกครั้งที่กระบอกสูบต้องการเคลื่อนที่ไหล ต้องมีแรงชนะความเสียดทานของไหลบวกกับน้ำหนักของไหล
- 10) กระบอกสูบแบบแทนเต็ม (Tandem) จะให้ได้แรงเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างการใช้กระบอกสูบชนิดนี้ คือ การที่ไม่สามารถขยายขนาดของกระบอกสูบให้โตขึ้นได้ อันเนื่องจากขนาดของเนื้อที่หรือข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ
- 11) จุดประสงค์ในการใช้กระบอกสูบแบบดูเพล็กซ์ (Duplex) เพื่อต้องการค่าช่วงชักที่แน่นอนและการทำงานที่ช่วงชักนั้นซ้ำ ๆ กัน
- 12) ความเร็วของก้านสูบชนิดก้านสูบคู่ (Double Rod) ได้เท่ากันทั้งจังหวะวิ่งเข้า และวิ่งออกเมื่ออัตราการไหลคงที่
- 13) การกระทำที่ยากอย่างหนึ่งของกระบอกสูบคือ การที่ให้กระบอกสูบ 2 ตัววิ่งเข้า – ออก พร้อม ๆ กัน
- 14) การเพิ่มความเร็วแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) คือการเอาน้ำมันที่ระบายออกทางด้านก้านสูบของกระบอกสูบกลับมาเข้าทางด้านลูกสูบอีกครั้งหนึ่ง
- 15) กระบอกสูบที่มีอัตราส่วน 2 ต่อ 1 คือ กระบอกสูบที่มีพื้นที่หน้าตัดด้านลูกสูบโตเป็น 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดด้านก้านสูบ ซึ่งมักจะใช้ในวงจรรีเจนเนอเรทีฟ
- 16) การคำนวณความเร็วและแรงของก้านสูบ เมื่อเป็นวงจรรีเจนเนอเรทีฟนั้นจะใช้พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านพื้นที่ด้านลูกสูบ
- 17) ระหว่างที่เป็นวงจรรีเจนเนอเรทีฟ แรงของก้านสูบจะได้น้อยลงแต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น

18) การที่ซีลของกระบอกสูบรั่ว จะมีผลกระทบต่อความเร็วของก้านสูบและทำให้เกิดความดันเพิ่มขึ้นในจุดต่าง ๆ ในบางกรณี

19) ความดันจะเพิ่มสูงมากทางด้านก้านสูบ เมื่อกระบอกสูบตัวนั้นถูกควบคุมอัตรา การไหลแบบมิเตอร์ – เอาต์ (Meter – Out) หรือมีวาล์วกัน

2.3.5 วงจรไฮดรอลิก (Hydraulic Circuits) ระบบไฮดรอลิกประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ชุดต้นกำลัง (Power Unit) วาล์วควบคุมทางด้าน (Pressure Control Valve) วาล์วควบคุมทิศทาง การไหลของน้ำมัน (Directional Control Valve) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน (Flow Control Valve) อุปกรณ์ระบบท่อทาง (Piping System) และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ (Accessories) การนำเอา ระบบไฮดรอลิกไปใช้งานกับเครื่องจักรจะต้องนำเอาอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาต่อร่วมกัน เพื่อควบคุมการ ทำงานของเครื่องจักรให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เรียกว่า วงจรไฮดรอลิก

การนำวงจรไฮดรอลิกไปใช้งานนั้นมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ของผู้ใช้ว่าต้องการลักษณะการทำงานเป็นแบบใด ถ้าเป็นการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน วงจรที่ใช้จะเป็นแบบธรรมดาแต่บางครั้งอาจนำวงจรต่าง ๆ มารวมกันเพื่อควบคุมการทำงานที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับพิจารณาเลือกใช้วงจรให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน [14]

## 2.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เหล็กกล้าสเตนเลส แต่ละชนิดหรือเกรดจะมีส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างทางโลหวิทยา และ สมบัติตลอดจนข้อจำกัดและประโยชน์ใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้วเราสามารถแบ่ง เหล็กกล้าสเตนเลสออกเป็น 6 กลุ่มใหญ่ ตามลักษณะโครงสร้างทางโลหวิทยา คือ

1. Austenitic
2. Ferritic
3. Martensitic
4. Duplex
5. Precipitation hardening
6. Super alloys

### 2.4.1 สเตนเลสเกรดที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม

1. Type 304 เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยมี 18% chromium และ 8% nickel เป็นส่วนผสมโดยประมาณมีสมบัติดังนี้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถขึ้นรูปเย็นและ เชื่อมได้ดี ตัวอย่างการใช้งาน เช่น เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะเครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน แท็งก์น้ำ อ่าง ซ้อน ส้อม อุตสาหกรรมอาหาร และ งานขึ้นรูปลึง งานตกแต่ง

2. Type 304L เป็นเกรด 304 ที่ผสมคาร์บอนต่ำ ( $\leq 0.03\%$ ) โดยมีสมบัติ เมื่อ ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนโดยเฉพาะโครงสร้างหนาที่ต้อง ผ่านการเชื่อมตัวอย่าง การใช้งาน เช่น อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้งานเหล็กที่ หนาโดยไม่ต้องทำ sensitization ทำหม้อไอน้ำ เครื่องถ่ายเทความร้อน แท็งก์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 304 [15]

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
304	Min	-	-	-	-	-	18.0	-	8.0	-
	Max	0.80	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0	-	10.5	0.10
304L	Min	-	-	-	-	-	18.0	-	8.0	-
	Max	0.030	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0	-	12.0	0.10

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [15]

Density (kg/m <sup>3</sup> )	8000
Young's Modulus (Gpa)	190
Tensile Strength (Mpa)	520
Yield Strength (Mpa)	240
Poisson's ratio	0.27-0.30
Brinell Hardness (HB)	88

#### 2.4.2 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดวัสดุอื่นในส่วนของสมบัติที่เกี่ยวข้องความร้อนสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม และมีข้อสังเกตอยู่ 3 ประการ คือ

1. การที่มีจุดหลอมเหลวสูงทำให้มีอัตราความแข็งดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส
2. การนำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้งานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการสมบัติการนำความร้อนที่ดี (เครื่องถ่ายเทความร้อน)
3. การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวที่มาก ๆ ได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย เช่น ในการทำหลังคา

#### 2.4.3 สมบัติเชิงกล

เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80% จึงทำให้มีสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความแข็งและความแกร่ง จะเห็นว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มีความแข็งแรง และโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทก โดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมให้มีค่าที่เป็นกลางของทั้งความแข็งแรง ความแกร่งและความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก

โลหะทุกชนิดโดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะหรือออกไซด์ที่เกิดบนผิวเหล็ก โดยทั่วไปจะปฏิกิริยาออกไซด์ทำให้เกิดสภาพผิวเหล็กผุกร่อนที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% ขึ้นไป ทำให้สมบัติฟิล์มออกไซด์บน

ผิวเปลี่ยนแปลง ไปกลายเป็นฟิล์มปกป้อง หรือพาสซีฟเลเยอร์ (Passive Layer) ที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งปรากฏกันว่า พาสซีวิตี (Passivity) ฟิล์มป้องกันนี้จะมีขนาดบางมาก และมองตาเปล่าไม่เห็นฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่น และทำหน้าที่ป้องกันเหล็กกล้าไร้สนิม จากการกัดกร่อนทั้งหมดหากนำไปผลิตแปรรูปหรือใช้งานในสภาพที่เหมาะสมเมื่อเกิดการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา

ความคงทนของพาสซีฟเลเยอร์ เป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังขึ้นกับสภาพการกัดกร่อนอันได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรดปริมาณสารละลายคลอไรด์และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มโครเมียมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิกเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน โดยทั่วไป ให้ทนสภาวะการกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่นการกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) [15]

## 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

ด้วยความรู้ความชำนาญของข้อกำหนดอุตสาหกรรมของภาครัฐ เราวิเคราะห์วัสดุและผลิตภัณฑ์ของลูกค้านับพันทุก ๆ วัน นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร นักเคมี และนักเทคโนโลยีของเรามีคุณภาพความเชี่ยวชาญด้วยประสบการณ์นับปีในอุตสาหกรรม พวกเขาใช้ความชำนาญศาสตร์และศิลป์ในการใช้เครื่องมือ เพื่อให้บริการทดสอบ วิเคราะห์ วิจัย วัสดุและผลิตภัณฑ์หลากหลาย ด้านความปลอดภัย และคุณภาพ การทดสอบสามารถทำกับผลิตภัณฑ์ สายการผลิต เครื่องต้นแบบ การสร้างสรรค์และบริการทำได้ทั้งภายในห้องปฏิบัติการภาคสนามหรือที่สถานที่ผลิตที่เป็นของลูกค้า

เนื่องจากข้อกำหนดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศได้มีการพัฒนาอินเตอร์เทคโนโลยีสามารถช่วยลูกค้าให้ได้ข้อกำหนดและเป็นไปตามกฎที่ต้องการ บ่งชี้ได้ว่าอันตรายมีโอกาสเกิดขึ้นที่ใด ตัดสินได้ว่ากรณีใดต้องมีปฏิบัติการแก้ไขและป้องกันและควบคุมแหล่งข้ออุปทานเรื่องความปลอดภัย คุณภาพ และประสิทธิภาพได้อย่างต่อเนื่อง

### 2.5.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วัสดุที่มีความแข็งสูงก็จะมี ความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ดังนั้นการวัดความแข็งเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดในการที่จะทราบค่า Ultimate tensile strength ของวัสดุนั้น ๆ เทคนิคของการวัดค่าความแข็งแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่

1. การวัดความแข็งแบบบริเนล Brine hardness test
2. การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ Rockwell and Superficial Rockwel
3. การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ Vickers microharness test

โดยมีหลักการที่เหมือนกันคือ เครื่องวัดความแข็งจะมีหัวกด (Indenter) ที่มีรูปร่างทรงกลมหรือปิรามิดสำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดขนาดต่าง ๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดขนาดรอยกดเพื่อนำมาคำนวณความแข็ง

### 1. การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

ใช้สัญลักษณ์ HBN or HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และมีความแข็ง 850 HV10-1500 HV10 จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf ความแข็งตามบริเนลสามารถหาได้จาก

$$HB = \frac{\text{แรงทดสอบ}}{\text{พื้นที่ของรอยกด}} \quad (2.2)$$

ผิวงานที่จะทดสอบต้องเรียบปราศจากวัสดุหลอกล่อนและเหมาะสมกับวัสดุที่อ่อนเหนียว ความหนาของชิ้นงานต้องมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของความหนาของรอยกด เวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 15-25 วินาที หลังจากนั้นจึงวัดขนาดของรอยกดและเทียบค่าความแข็งได้จากตารางเทียบความแข็ง สมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties) หมายถึง ความสามารถในการรับแรงหรือภาระ (Load) ในลักษณะต่าง ๆ โดยสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญ ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) คือ ความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วิธีการที่วัดความแข็งได้อย่างแม่นยำ ทำได้โดยอาศัยเครื่องวัดความแข็ง (Hardness Tester) โดยเครื่องวัด ความแข็งจะมีตัวกด (Indenter) สำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบวมขนาดต่าง ๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดรอยบวมนั้นเพื่อนำมาคำนวณหาความแข็งในแต่ละวิธี การวัดความแข็งซึ่งจะมีวิธีการคำนวณหาค่าแตกต่างกันออกไป

### 2. การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness test)

ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ 1) Diamond Cone 120° (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง 2) Steel Ball (เหล็กกล้าทรงกลม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 หรือ 3/8 นิ้ว ใช้กับโลหะทั่วไป และวิธีการใช้เครื่อง ROCKWELL SCALE HARDNESS TESTER (MODEL: AR - 10)มีดังต่อไปนี้

- 1) เลือกหัวกด และ Load ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ
- 2) วางชิ้นงานบนฐานรอง (Anvil) หมุนฐานรองขึ้นให้หัวกดสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน เครื่องจะกดผิวหน้าโดยใช้ Minor Load
- 3) ใช้มือทั้งสองข้างหมุนแขน handle ตามเข็มนาฬิกาอย่างสม่ำเสมอ จนเข็มทั้ง 2 บนหน้าปัดเข้าไปอยู่ในตำแหน่ง SET แล้วหยุด หากหมุนเกินให้เปลี่ยนตำแหน่งวัด แล้วเริ่มต้นใหม่
- 4) กดแป้นสปริงให้ไฟดับ The load control จะเริ่มกดชิ้นงานโดย Major load
- 5) เมื่อไฟติดอีกครั้ง อ่านค่าความแข็งที่ได้จากหน้าปัดหมุนฐานรองลง วัดตำแหน่ง

### 3. การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

จะใช้หัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ระหว่างด้านของหน้าเพชร แรงที่ใช้กดทั่ว ๆ ไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 2-1000 N. ทั้งนี้ก็ยัง

ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบค่าความแข็ง จะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น (mm.)

$$HV = \frac{1.854F}{d^2} \quad \text{มีหน่วยเป็น N/mm}^2 \quad (2.3)$$

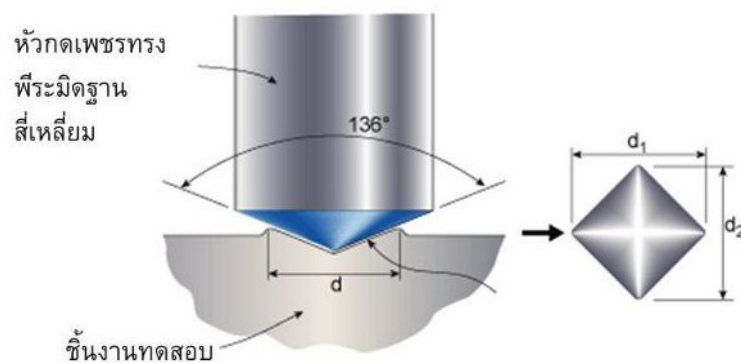
F = Applied load, (N)

d = Diagonal length of square-impression, (mm)

เงื่อนไขในการทดสอบความแข็งแบบ Vickers ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเรียบปราศจากออกไซด์วัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด ความหนาของชิ้นทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยแตกผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่า ของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด d ตามเกณฑ์ และจะทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 10°C หรือ 35°C ระยะห่างระหว่างรอยกด ให้ถือเกณฑ์ดังนี้ เหล็กกล้า ทองแดงและทองเหลือง อย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

#### 1) Micro-Vickers Hardness Testing

Micro Hardness Test การวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงปิรามิดมุม 136° ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d1 และ d2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังรูป ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.7 หัวกดเพชรทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม [16]



เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$HV = \frac{\text{แรงกดทดสอบ}(F)}{\text{พื้นที่รอยกดบนผิวทดสอบ}(S)} \quad (2.4)$$

การทดสอบเนื่องจากรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กมาก จึงต้องให้ผิวชิ้นทดสอบ เรียบ ปราศจากออกไซด์หรือผ่านการกัดกรดมาก่อน เพื่อที่จะได้เห็นโครงสร้างจุลภาค และสามารถเลือกกดบนโครงสร้างที่ต้องการได้ ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาท่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d) และอุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10 - 35 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างรอยกดให้ถือตามเกณฑ์ดังนี้ เหล็กกล้า (Steel) ทองเหลือง (Brass) และทองแดง (Copper) ห่างอย่าง น้อยที่สุด 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด โลหะเบา เช่น ดีบุก (Sn) ตะกั่ว (Pb) การติดตั้งกล้องจะต้องมั่นคง ไม่สั่นสะเทือน เพราะจะส่งผลให้ค่ารอยกดที่ได้ คลาดเคลื่อน การให้แรงกดจะต้องสม่ำเสมอ ให้เวลากดแช่บนผิวงานเท่ากันเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ก่อนวัดขนาดควรขยายและมีแสงสว่างให้เพียงพอในการวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด

## 2) ข้อจำกัดของการทดสอบ

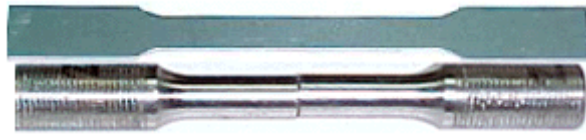
- หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

- ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกดระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด[16]

## 2.5.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการ ใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะแตกต่างกันไป สำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่นหรืออาจ ทำเป็นแท่ง โดยข้อมูลที่ได้คือกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมหรือแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน



รูปที่ 2.8 ลักษณะของชิ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่นและแบบแท่ง [17]

โมดูลัสของความเป็นอิลาสติก เป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เมื่อได้ รับแรงกระทำสามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุในระยะแรก ที่ยังแสดงสมบัติยืดหยุ่นอยู่ สำหรับโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 % ของความเครียด โดยที่โมดูลัส ของความเป็นอิลาสติกนี้เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะ (bond strength) ระหว่างอะตอมของโลหะหรือของโลหะผสม โลหะที่มีค่าโมดูลัสของความเป็นอิลาสติกสูงจะแกร่ง ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างง่าย เช่น เหล็กกล้ามีค่าโมดูลัสของการยืดตัว  $30 \times 10^6$  psi. (207 GPa) ในขณะที่โลหะอลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ  $10 - 11 \times 10^6$  psi (69 - 76 GPa) โปรดสังเกตว่า ในช่วงความยืดตัวของแผนภาพความเค้นและความเครียดค่าโมดูลัสจะไม่มีการ เปลี่ยนแปลง เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น

ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก เป็นค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ ณ จุดที่เปลี่ยน สมบัติจากอิลาสติกไปเป็นพลาสติก หรืออีกนัยหนึ่งหมายความว่าวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรเมื่อความเค้นหรือความเครียดมีค่ามากกว่านี้ สำหรับวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนเราจะ สังเกตได้จากที่กราฟมีค่าความชันเท่ากับศูนย์ ส่วนในกรณีที่วัสดุไม่แสดงจุดครากอย่างอย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.2% หรือ 0.1% ของ plastic strain ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียด เป็นค่ากำหนดในการหาจุดคราก อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า offset yield

ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรม สูงสุดในแผนภาพความเค้นและความเครียดค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทางวิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรขึ้นอย่างมาก ก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้าโลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่า strength ลดลง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่างภายใต้แรงดึงเมื่อเทียบกับระยะการวัด (gage length) ของชิ้นงานทดสอบ และยังเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อน (ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปโลหะยิ่งอ่อนยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมากแสดงว่าโลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก สำหรับโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.062 นิ้ว (1.6 mm) จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว สูง ถึง 35 % แต่ถ้าเป็นโลหะอลูมิเนียมผสม (ความแข็งแรงสูงกว่า) 7075-T6 ที่หนาเท่ากัน จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เพียง 11 % เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้เราทราบว่าโลหะนั้นอ่อนเพียงใดแล้วยังจะเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นว่าโลหะ นั้นมีคุณภาพอย่างไรอีกด้วย

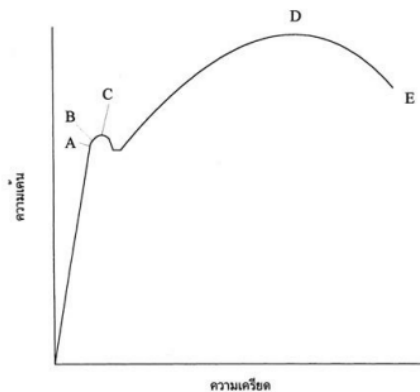
## 1. ขั้นตอนในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงดึง ก่อนอื่นชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทำรอย โดยการขีดหรือตอกด้วยเหล็กนำศูนย์ เพื่อกำหนดความยาวพิกัด  $L_0$  (ดูรูปที่ 2.1) จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดบริเวณปลายทั้งสองข้างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (ดูรูปที่ 2.10) เครื่องทดสอบจะค่อย ๆ ดึงชิ้นทดสอบช้า ๆ ขณะที่ทำการดึงเครื่องจะทำการบันทึกเส้นโค้ง แรงดึง  $F$  - ระยะยืด  $L$  ในช่วงแรกเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันสูง โดยระยะยืดมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดึง ซึ่งในช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึง ชิ้นงานทดสอบจะหดกลับไปยังความยาวเดิม จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อจุดที่แรงเริ่มตกลงนี้เรียกว่าแรงที่จุดคราก  $F_e$  (Yield Point) ในขณะที่ชิ้นทดสอบยังคงยึดตัวต่อไปจนกระทั่งแรงดึงเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่คราวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งความชันลดลงเรื่อย ๆ ช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงจะพบว่าชิ้นทดสอบมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดตัวถาวร (Plastic) เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงต่อไปอีกจะพบว่าแรงดึงจะเริ่มลดลง และถ้าสังเกตที่ชิ้นทดสอบจะพบว่าชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคอดลง ซึ่งจุดที่คอดนี้คือจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน แรงสูงสุด  $F_m$  และแรงที่จุดคราก  $F_e$  จะถูกนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึง  $R_m$  (Tensile Strength) และค่าความเค้นคราก  $R_e$  (Yield Stress)

1) การวัดขนาดชิ้นทดสอบ ก่อนอื่นต้องทำการวัดขนาดชิ้นทดสอบ โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ การวัดต้องทำที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของความยาวเริ่มต้นและบริเวณตรงกลาง จากนั้นจึงนำค่าทั้งสามมาคิดค่าเฉลี่ย ค่าที่ต่ำกว่า 10 มม. ให้วัดให้ได้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ส่วนค่าที่สูงกว่า 10 มม. ให้วัดได้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง หลังจากนั้นจึงทำการจัดแบ่งความยาวพิกัดออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน เพื่อใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวหรือความยืด A

2) การจับยึดชิ้นทดสอบจะต้องถูกจับยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง โดยที่ต้องระมัดระวังให้แกนกลางของชิ้นทดสอบเป็นแนวเดียวกันกับแนวของแรงดึงของเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดัดงอ (Bending)

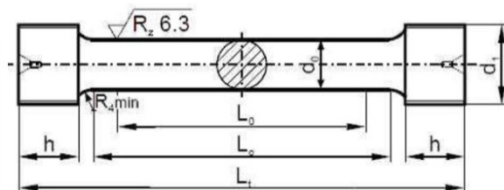
3) ความเร็วในการดึงเนื่องจากความเค้นคราก  $R_e$  (Yield Stress) และค่าความต้านแรงดึงสูงสุด  $R_m$  (Tensile Strength) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงด้วย ดังนั้นความเร็วในการดึงจึงต้องถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ความเร็วในการดึงเพื่อหาค่า  $R_e$  จะใช้ความเร็วไม่เกิน  $30 \text{ N/mm}^2$  ต่อวินาที



รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงดึง และระยะยืด [18]

2. รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบตลอดจนวิธีการผลิตเพื่อใช้ในการทดสอบแรงดึงสำหรับโลหะทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ตามมาตรฐาน DIN 50125 หรือมาตรฐาน DIN 50120 สำหรับการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้า

Zugprobe DIN 50125-B14 "70



$d_0$ : Probendurchmesser       $L_0$ : Anfangsmesslänge ( $L_0=5d_0$ )  
 $d_1$ : metrisches ISO-Gewinde       $L_c$ : Versuchslänge ( $L_c>L_0+d_0$ )  
 $h$ : Kopfhöhe       $L_t$ : Gesamtlänge  
 Bezeichnung einer Zugprobe (Form B) mit Probendurchmesser  $d_0=14\text{ mm}$  und Anfangsmesslänge  $L_0=70\text{ mm}$ :

รูปที่ 2.10 ชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) [18]

ตารางที่ 2.3 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) หน่วยเป็น มม. [18]

เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบ $d_0$	เส้นผ่านศูนย์กลางปลายจับ $d_1$	ระยะปลายจับ $h$ อย่างน้อย	ความยาวพิกัด $L_0$	ความยาวช่วงขนาน $L_c$	ความยาวรวม $L_t$ อย่างน้อย
6	8	25	30	36	95
8	10	30	40	48	115
10	12	35	50	60	140
12	15	40	60	72	160
14	17	45	70	84	180
16	20	50	80	96	205
18	22	55	90	108	230
20	24	60	100	120	250
22	30	70	125	150	300



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงดึง

แผ่นภาพนี้ไม่สามารถใช้เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกับวัสดุชนิดอื่นซึ่งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้ เช่น ชิ้นทดสอบซึ่งมีความหนามากกว่าและสั้นกว่าจะใช้แรงดึงจนชิ้นทดสอบขาด ถูกยืดสูงกว่าและถูกยืดน้อยกว่าชิ้นทดสอบซึ่งบางกว่าและยาวกว่าแต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าชิ้นทดสอบที่ใช้แรงดึงสูงกว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเสมอไปดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำแรงดึงให้เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาว ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเค้น } \sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2.5)$$

$$\text{ความเครียด } \epsilon = \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right) \times 100 \% \quad (2.6)$$

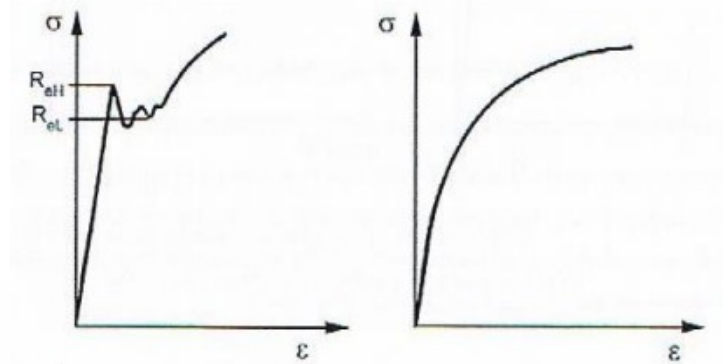
F = แรงดึง (N)

S<sub>0</sub> = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (N/mm<sup>2</sup>)

ΔL = ระยะยืด (mm)

L<sub>0</sub> = ความยาวพักักัด (mm)

การหาค่าความเค้นคราก R<sub>e</sub> (Yield Stress) เส้นโค้งของแผ่นภาพ σ - ε นี้จะมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ คือ ลักษณะที่หนึ่งส่วนต่อระหว่างช่วงยืดหยุ่นกับช่วงพลาสติกเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกลักษณะหนึ่งเป็นไปได้อย่างไม่ต่อเนื่องโดยมีจุดหักอย่างชัดเจนลักษณะหลังนี้จุดหักจะเป็นจุดกำหนดค่าความเค้นคราก R<sub>e</sub> ส่วนลักษณะแรกจะต้องใช้ค่าความเค้นพิสูจน์ R<sub>p</sub> (Proof Stress) และสามารถแทนค่าความเค้นครากได้จากการคำนวณโดยนำแรงที่จุดคราก F<sub>e</sub> หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ S<sub>0</sub> ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.12 ความเค้น - ความเครียด ซ้ำมีจุดคราก ขวาไม่มีจุดคราก [18]

ความยืด A (Elongation) ค่าความยาวขึ้นทดสอบหลังจากถูกดึงขาด  $L_0$  วัดได้ โดยการนำชิ้นทดสอบที่ถูกดึงขาดมาต่อเข้ากันโดยต้องระวังให้แกนของส่วนที่ขาดอยู่ในแนวเดียวกัน และต้องถูกประกบกันให้สนิทขณะทำการวัด

ข้อสังเกตผลการทดสอบจะใช้ได้เสมอไม่ว่ารอยขาดจะอยู่บริเวณใดในช่วงความยาวพิกัด  $L_0$  ถ้าค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้น แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของรอยขาดถ้าวัดจากขอบที่ใกล้ที่สุดมีค่าน้อยกว่า  $1/3 L_0$  และค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้นให้ถือว่าผลการทดสอบยังใช้ไม่ได้ต้องทำการทดสอบใหม่ เพราะถ้าตำแหน่งรอยขาดอยู่ในช่วง  $1/3 L_0$  ถึง  $2/3 L_0$  ค่า A ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าเนื่องจากช่วงที่มีการยืดตัวของวัสดุมากที่สุดจะอยู่บริเวณใกล้รอยขาดในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปวัสดุมีการยืดตัวน้อยลงไปตามลำดับในการกำหนดขนาดความยาวพิกัด  $L_0$  ต้องกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดได้ตามมาตรฐานต้องระบุไว้ในรายงานอย่างชัดเจนถึงขนาด  $L_0$  ที่ใช้ทั้งนี้ในการทดสอบวัสดุถ้าเพิ่มขนาดความยาวพิกัด  $L_0$  ขึ้นค่าความยืด A ที่ได้จากการทดสอบจะลดลงในขณะที่ลดความยาวของพิกัด  $L_0$  ลง ค่าความยืด A จะเพิ่มขึ้นทั้ง ๆ ที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณใกล้รอยขาดเนื้อวัสดุจะยืดตัวถาวรมากที่สุดในขณะที่ห่างออกไปจะยืดตัวถาวรน้อยลงตามลำดับแต่การคำนวณค่าความยืดเป็นการคำนวณเฉลี่ยทั้งความยาวพิกัด  $L_0$

ยังโมดูลัส E (Young' Modulus) ในแผนภาพ  $\sigma - \epsilon$  พบว่าในช่วงต้นของเส้นโค้งวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยที่ค่าความเค้น  $\sigma$  จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด  $\epsilon$  ตามกฎของฮุก (Hooke's law)

$$\text{ยังโมดูลัส } \square = \frac{\square}{\square} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) จะใช้ได้เฉพาะในช่วงยืดหยุ่นเท่านั้นค่ายังโมดูลัสของวัสดุเป็นค่าซึ่งบ่งถึงความต้านทานของวัสดุต่อการยืดตัวในช่วงยืดหยุ่น[18]

## 2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบทางโลหะวิทยา

ประโยชน์ที่สำคัญของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานคือ คุณภาพโลหะวิทยาของรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากอัตราความเร็วของการกระจายความร้อนในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของโลหะในช่วงที่เกิดพลาสติกในรูปของงานร้อนหรือบางกรณีจะเป็นงานเย็นระหว่างช่วงการอัด ดังนั้นโครงสร้างของเม็ดเกรนจะละเอียดมาก เมื่อโครงสร้างของโลหะในช่วงที่เกิดแรงบิดและอัดเพิ่มมากขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นจะเป็นการเชื่อมตัดผ่านออกไซด์หรือโลหะที่เรียกว่า “Mastication” ทำให้เชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ แตกต่างจากการเชื่อมแบบทำราบคือจะไม่เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนของการหลอมละลาย ผลของการเชื่อมมีลักษณะทางโลหะวิทยาที่ดี แต่ถ้ามืดการเย็นตัวอาจเกิดการเสียหายได้ จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมมากขึ้นหรือเกิดอุณหภูมิของการเชื่อมสูงสุด จะมีการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิต่ำลง สำหรับเหล็กที่คาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดที่จำเป็นคือ 1300°C และต้องไม่ปล่อยให้เกิดอุณหภูมิของการเติบโตของเกรน ซึ่งเกิดในช่วง 100°C เราเพียงขยายอัตราการเย็นตัวของโลหะ โดยยึดระยะเวลาที่อุณหภูมินี้ในการปฏิบัติรอยต่อของการอัดจะทาสาหรับการลดขนาดของเกรน แต่ถ้าใช้เวลานานมากเกินไปจะทำให้ปริมาณรอยเย็นมาก ดังนั้นในการเชื่อมแบบเสียดทานกับเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงสูงจึงควรทำการอบอุ่นภายหลังการเชื่อม

### 2.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscopic)

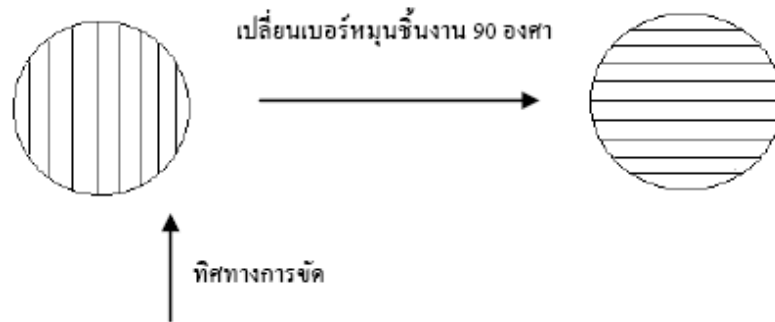
การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการดังนี้ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สแลกฝังในการเชื่อมของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบ (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบกับเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่

### 2.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscopic)

#### 1. การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

1) การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาด

2) การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ หรือผิวชิ้นงาน ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่มาจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 200 400 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่นั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้หน้าสารละลายสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นงานตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิมทำ เช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความเค้น – ความเครียด ซ้ายมีจุดคราก ขวาไม่พบจุดคราก [19]

3) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทาจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผลขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

4) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน[19]

### 2.6.3 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตาให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น

#### 1. ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

- 1) ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าตาเราจะมองเห็น
- 2) ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

#### 2. หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two point of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่ม resolving power และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical aperture of objective lens / NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมาก ภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม



3. ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์
  - 1) ลำกล้อง (Body tube) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างเลนส์ใกล้ตา กับเลนส์ใกล้วัตถุ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกกระทบ
  - 2) แขน (Arm) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ยึดระหว่างส่วนลากกล้องกับฐาน เป็นตำแหน่งที่จับเวลายกกล้อง
  - 3) แท่นวางวัตถุ (Specimens stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา
  - 4) ที่หนีบสไลด์ (Stage clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเคลื่อนสไลด์ให้สะดวกขึ้น
  - 5) ฐาน (Base) เป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งกล้อง ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด
  - 6) กระจกเงา (Mirror) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟภายในห้องให้ส่องผ่านวัตถุโดยทั่วไปกระจกเงามี 2 ด้าน ด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสะดวกและชัดเจน
  - 7) เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา
  - 8) ไดอะแฟรม (Diaphragm) อยู่ใต้เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ
  - 9) ปุ่มปรับรูปหยาบ (Coarse adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลากกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อทำให้เห็นภาพชัดเจน
  - 10) ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพ ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น
  - 11) เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จะติดอยู่กับจานหมุน (Revolving nose piece) ซึ่งจานหมุนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3 – 4 ระดับ คือ 4x 10x 40x 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ
  - 12) เลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลากกล้อง โดยทั่วไปมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ

#### 4. ประเภทของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscopes) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopes) ชนิดที่พบได้มากที่สุด คือชนิดที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรก เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เป็นอุปกรณ์ใช้แสงอย่างหนึ่ง มีเลนส์อย่างน้อย 1 ชิ้น เพื่อทำการขยายภาพวัตถุที่วางในระนาบโฟกัสของเลนส์นั้น ๆ ดังรูปที่ 2.14

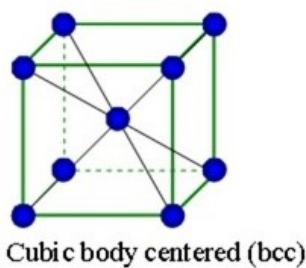


รูปที่ 2.14 กล้อง Microscope [20]

## 2.7 โครงสร้างผลึก

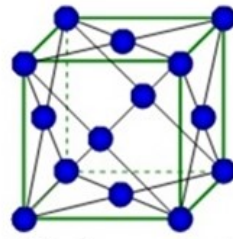
2.7.1 ระบบและโครงสร้างผลึก (System and Structure of Crystal) สสารที่เป็นของแข็งมีเนื้อวัสดุมีความหนาแน่นมีลักษณะโครงสร้างหลายรูปแบบต่าง ๆ คุณสมบัติของโลหะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับระบบและโครงสร้างผลึกที่อะตอมเรียงเกาะตัวกันอยู่ ซึ่งระบบและโครงสร้างของผลึกของโลหะ มักอธิบายให้ทราบได้โดยการศึกษาเรื่องต่อไปนี้ควบคู่กันไป ระบบผลึกที่สำคัญของโลหะ [21]

1. BCC (Body Centered Cubic) มีหน่วยเซลล์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โดยจะมีอะตอมอยู่ในตำแหน่งทั้ง 8 มุม และที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์ พิจารณารูปประกอบ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลึก BCC [21]

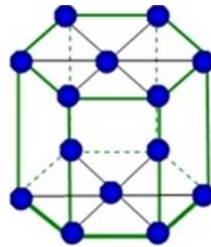
2. FCC (Face Centered Cubic) ซึ่งมีหน่วยเซลล์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีอะตอมอยู่ที่มุมทั้ง 8 มุม และที่กึ่งกลางในแต่ละด้านของลูกบาศก์อีก 6 ด้าน ซึ่งจะมีรูปร่าง ดังรูป ระบบผลึกแบบนี้มีอยู่ในโลหะ เช่น ทองแดง เงิน ทองคำ อะลูมิเนียม ตะกั่ว เหล็ก โครเมียม โคบอลต์ นิกเกิล และแพลทินัม เป็นต้น



Cubic face centered (fcc)

รูปที่ 2.16 ผลึก FCC [21]

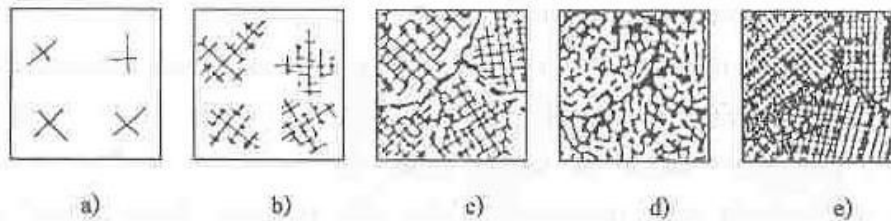
3. HCP (Hexagonal Closed Packed) พิจารณารูปที่ 2.17 ประกอบ ผลึกแบบนี้มีเซลล์เป็น รูป 6 เหลี่ยม ที่มีด้านที่ฐาน 2 ด้าน ยาวเท่ากัน แต่ด้านทั้ง (C) มีความยาวที่แตกต่างกันออกไป



Hexagonal

รูปที่ 2.17 ผลึก HCP [21]

2.7.2 การเกิดเกรนโลหะ ในสภาวะที่โลหะแข็งตัว ผลึกจะเริ่มแข็งตัวจากนิวเคลียส ซึ่งการก่อตัวของนิวเคลียสนี้ อาจจะก่อตัวขึ้นหลาย ๆ จุดพร้อม ๆ กัน และจากนั้นผลึกจะโตขึ้นเรื่อย ๆ จากการจับตัวกันเพิ่มขึ้นของอะตอมที่เข้าร่วมตัวกัน การรวมตัวกันของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กันกับการเย็นตัวของโลหะ ซึ่งการจับยึดตัวของอะตอมต่อไปเรื่อย ๆ เช่นนี้ เรียกว่า Dendrite การเจริญเติบโตของ Dendrite จะแผ่ขยายออกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะนั้นแข็งตัวหมดจึงจะหยุดการเจริญเติบโต Dendrite ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน มันจะขยายออกไปจนกระทั่งแขนงขยายตัวแผ่ออกไปชนกับแขนงของตัวข้างเคียง ซึ่งหมายถึงการเจริญเติบโตของผลึกสิ้นสุดลง ในช่วงนี้ของโลหะก็จะแข็งตัวหมดพอดี ผลึก แต่ละผลึกจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากการเติบโตของ Dendrite แต่ละตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน จากการที่ผลึกแต่ละผลึกไม่เท่ากันนี้เอง ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรน ซึ่งเรียกว่า Grain Boundary โดยจะแสดงการเกิดเกรน ดังนี้ a. นิวเคลียสเริ่มก่อตัวเล็กๆตามตำแหน่งต่าง ๆ b. จากผลึกขยายตัวเป็น Dendrite ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ c. Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนงของแต่ละตัวเกือบจะชนกัน d. Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนงของแต่ละตัวชนกันผลึกเริ่มหยุดก่อตัว e. เกิดเป็น Grain Boundary บริเวณของผลึก [21]



รูปที่ 2.18 แสดงการเกิด Grain [21]

1. ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของเกรน ได้แก่ ส่วนผสม (เพิ่มจำนวน nucleus ของการตกผลึก), อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ (เย็นเร็ว เกรนจะเล็ก), การแปรรูป: plastic deformation, ขบวนการทางความร้อน (heat treatment ของโลหะ) [22]

2. การแพร่ของอะตอมในโครงสร้างผลึก มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ [22]

1) การแพร่แบบแทนที่ (Substitutional diffusion) เป็นการแทรกตัวของอะตอมแปลกปลอมที่มีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมหลักจะเข้ามาแทนที่ ช่องว่างในผลึก ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของผลึก ก็มีส่วนทำให้อะตอมสามารถแพร่ได้ เมื่อความร้อนสูงขึ้น ช่องว่างในผลึกก็มีขนาดใหญ่ขึ้น อะตอมมีพลังงานสูงขึ้นก็สามารถเกิดการแพร่ได้เร็วขึ้น

2) การแพร่แบบแทรก (Interstitial diffusion) เป็นการแพร่ของอะตอมที่มีขนาดเล็ก เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างอะตอมหลัก เช่น C atoms แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของ Fe atoms ในโครงสร้าง BCC

3. ผลที่เกิดจากขนาดเกรน ขนาดของเกรนจะมีผลต่อโลหะในด้านความแข็งแรง, ความแข็ง, ความเปราะ และความเหนียวของโลหะ โลหะที่มีขนาดเกรนที่ใหญ่ทำให้ถูกฉีก, ทำลาย หรือ รั่วได้ง่าย เกรนโลหะที่มีขนาดเล็ก จะมีความต้านทานต่อการถูกทำลายที่สูงกว่า ซึ่งจะให้เกิดรอยแตก การแตกร้าวน้อย ๆ ในโลหะยากมากกว่า ขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า มีความแข็งแรงที่มากกว่า ขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่ เพราะฉะนั้น ในทางโลหะวิทยา จึงมีความพยายามที่จะทำให้เกรนมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อมีความต้องการใช้โลหะมีความแข็งแรง ความแข็งแรง, ความแข็ง และความเปราะเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กัน การที่ทำให้เกรนมีขนาดเล็กไม่เพียงแต่ทำให้เกิดลักษณะด้านความแข็งแรงที่ดีขึ้นเท่านั้น แต่มันยังส่งผลในด้านความแข็ง และความเปราะในโลหะอีกด้วย แต่ถ้าต้องการให้โลหะมีความเหนียวเป็นคุณสมบัติเด่นขนาดของเกรนจะต้องทำให้มีขนาดใหญ่ [23]

2.7.3 อุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) คืออุณหภูมิที่เกรนภายในโครงสร้างจุลภาคของการขึ้นรูปเย็นเริ่มต้นเปลี่ยนรูปใหม่อย่างมีขนาดสม่ำเสมอและไม่มีดิสโลเคชันในโครงสร้าง แรงผลักดันในการเกิดผลึกใหม่คือค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานภายในของการขึ้นรูปเย็นและพลังงานภายในของวัสดุที่เกิดผลึกใหม่ อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ คือ อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ลดลงเมื่อปริมาณการขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้น ขึ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณมากกว่าจะมีความเสถียรน้อยกว่าและการก่อตัวเกิดผลึกใหม่จะง่ายขึ้น ค่าการขึ้นรูปเย็นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่หรือเกรนใหม่ก่อตัวขึ้นนั้นมีค่าประมาณ 30-40% ถ้าต่ำกว่านี้เกรนใหม่จะไม่เกิดขึ้น ส่วนเกรนขนาดเล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นจะทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ลดลง เนื่องจากมี

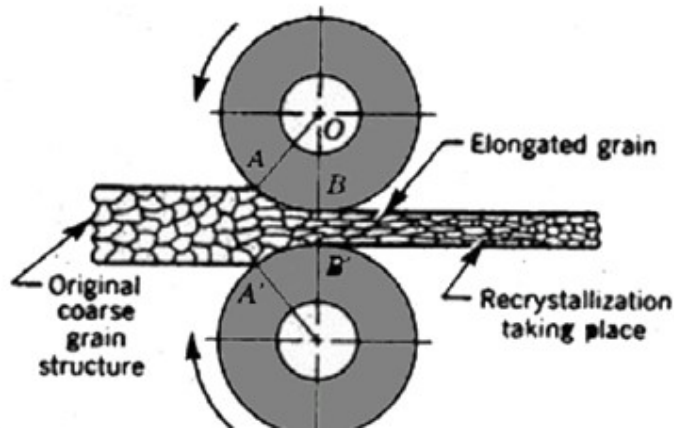
ตำแหน่งการก่อตัวของผลึกใหม่ตามจุดตัดขอบเกรนมากกว่า โลหะบริสุทธิ์มีอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่าโลหะผสม การเพิ่มเวลาการอบอ่อนทำให้อุณหภูมิมีการเกิดผลึกใหม่ลดลง เนื่องจากมีเวลามากกว่าทำให้ผลึกใหม่มีเวลาเพียงพอในการก่อตัว โลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะมีอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่สูงด้วยเนื่องจากผลึกใหม่จะเกิดขึ้นได้ด้วยการแพร่ของอะตอม และอะตอมจะเกิดการแพร่ได้ต่อเมื่ออุณหภูมิมีค่าประมาณ 0.4 เท่าของจุดหลอมเหลวของวัสดุ ตัวอย่างอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่นี้ยังใช้จำแนกรูปแบบการขึ้นรูปร้อนและเย็นของโลหะด้วย หากโลหะถูกเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะเรียกว่า การขึ้นรูปเย็น ส่วนโลหะที่ถูกเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะเรียกว่า การขึ้นรูปร้อน[24] จากการทดลองเปรียบเทียบความแข็งแรงภายในเกรนเทียบกับความแข็งแรงบริเวณขอบเกรน ณ อุณหภูมิต่ำ ๆ ขอบเกรนจะมีความแข็งแรงมากกว่าภายในเกรน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแรงของขอบเกรนจะลดลง และเกรนที่มีขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากกว่าเกรนขนาดใหญ่กว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความแข็งแรงและความแข็งแรงดีกว่า ดังนั้นการควบคุมขนาดของเกรน จึงมีความสำคัญต่อการใช้งานและการทำ heat-treatment ของโลหะและโลหะผสมมาก[25]

2.7.4 การอบปกติ(Normalizing) เป็นการทำความเย็นได้เร็วกว่า การอบอ่อน โดยวิธีการทางเทคนิค โลหะถูกให้ความร้อนเหนือ เมื่อทำการอบจนระยะเวลาหนึ่งแล้ว ก็หยุดจ่ายความร้อนให้ชิ้นงาน แล้วนำออกมาจากเตา ปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ในอากาศนิ่ง จนชิ้นงานเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง ในการทำการอบอ่อน และการอบปกติ จะทำให้ชิ้นงานมีความเหนียว และความยืดหยุ่นมากขึ้น ความเปราะในวัสดุมีน้อย แต่ก็ทำให้ลดความแข็ง และความแข็งแรงลงไป นอกจากนี้ การอบอ่อน และการอบปกติ ยังทำให้ความเค้นภายในเนื้อวัสดุ มีการลดลงเช่นกัน ส่งผลให้แนวโน้มการบิดตัว และการแตกร้าวมีน้อยลง[26]

2.7.5 ขนาดของผลึก หรือเกรนที่เกิดขึ้น จะเป็นปฏิภาคสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดการแข็งตัว จะพบว่าอัตราการเย็นตัวมีอัตราสูงจะปรากฏนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีอัตราต่ำ เพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะให้มาจับรวมตัวกับนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียดในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่[27]

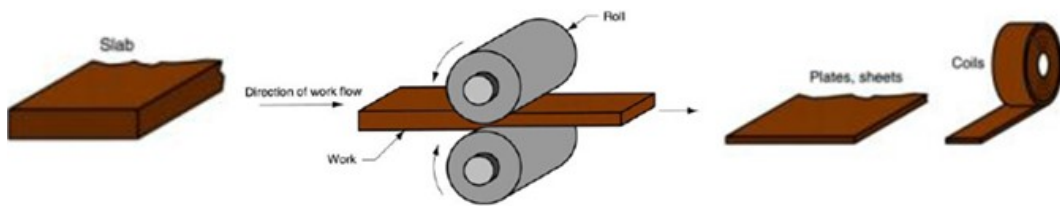
## 2.8 กรรมวิธีการรีดขึ้นรูปโลหะแบบก้อน

การรีด (Rolling) การรีดร้อน เป็นการรีดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการจัดเรียงผลึกใหม่ แล้วนำไปผ่านลูกรีดเพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง การรีดก่อนที่จะได้ชิ้นงานสำเร็จต้องมีการทำให้ได้ขนาดชิ้นงานที่เหมาะสม กับการนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไป เราเรียกว่าโลหะกึ่งสำเร็จรูป ผลที่เกิดขึ้นต่อเหล็กในขณะทำการรีด เกรนของเหล็กจะเปลี่ยนรูปร่าง โดยเกรนของโลหะปกติจะมีเม็ดโต และมันจะถูกบีบตัวจนลีบ ในขณะที่ผ่านการกดของลูกกลิ้ง และมันจะเปลี่ยนเม็ดเกรนใหม่ทันที หลังจากผ่านการรีดไปแล้ว เพราะว่ามันยังร้อนอยู่ ดังรูปที่



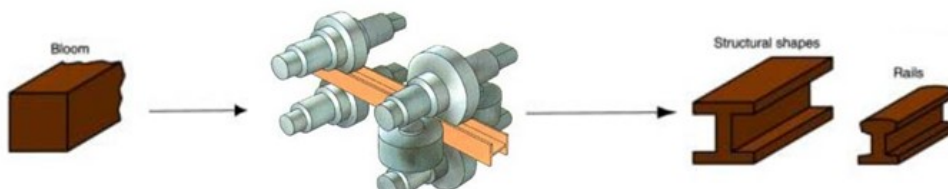
รูปที่ 2.19 ผลการรีดขึ้นรูปร้อนทำให้เกรนเปลี่ยนแปลง[28]

1. การรีดเป็นแผ่น (Flat rolling) เป็นการนำเอาสแลบไปอบที่เตา และให้ความร้อนอย่างช้า ๆ จนถึง อุณหภูมิการรีด แล้วนำไปรีดบนลูกรีด จนได้ขนาดความหนาและความกว้างที่ต้องการ มีอยู่ 2 ลักษณะคือ การรีดเป็นโลหะแผ่น (Flat plate) ความหนามากกว่า 6 mm. และการรีดเป็นแผ่นบาง (Sheet metal) โดยทั่วไปความหนาน้อยกว่า 6mm.



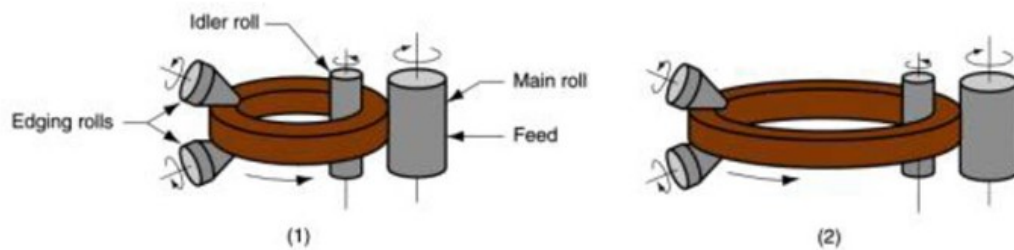
รูปที่ 2.20 การรีดเป็นแผ่น[28]

2. การรีดขึ้นรูป (Shape rolling) เป็นการนำเอาโลหะกิ่งสำเร็จรูปไปอบในเตา ให้ความร้อนอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิการรีด แล้วนำไปรีดขึ้นรูปตามต้องการ เช่น I-beam , U-beam



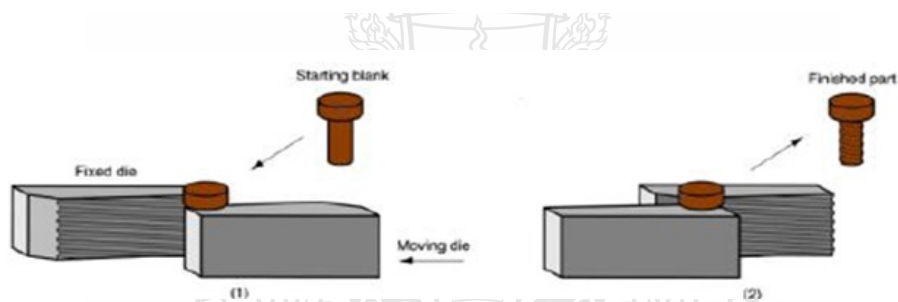
รูปที่ 2.21 การรีดขึ้นรูป (Shape rolling)[28]

3. การการรีดวงแหวนหรือห่วง (Ring rolling) เป็นการลดขนาดความหนา และเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ชิ้นงานเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากการยืดตัว



รูปที่ 2.22 การการรีดวงแหวนหรือห่วง (Ring rolling)[28]

4. การรีดเกลียว(Threading) เป็นการทำให้เกลียวภายนอกแม่พิมพ์(Die) มี 2 แบบ คือ แบบแผ่น ดังรูปที่ 2.23 และแบบกลม



รูปที่ 2.23 การรีดเกลียว (Threading)[28]

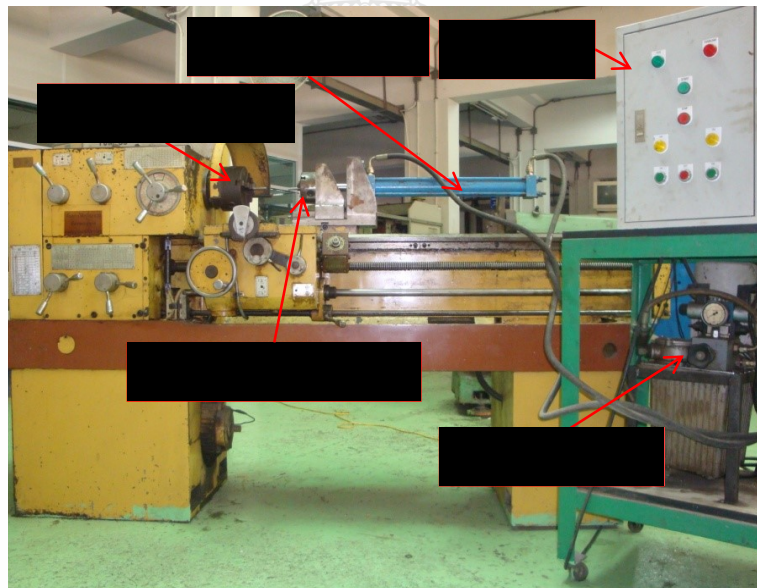
## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 การเตรียมเครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกลึงที่หาได้ในโรงงานอุตสาหกรรม ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องกลึงแนวอนโดยประยุกต์เอาหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะมีการนำเอาชุดไฮดรอลิกมาติดตั้งแทนด้วยยันศูนย์ท้ายแทน จะใช้สำหรับออกแรงดันให้ชิ้นงานเกิดการเสียดทาน โดยชิ้นงานที่หนึ่งอยู่ที่หัวจับเครื่องกลึง และชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งอยู่ที่ชุดไฮดรอลิกท้ายแทนยันศูนย์ และการเชื่อมทิกจากโรงงานอุตสาหกรรม

#### 3.1.1 เครื่องกลึงแนวอน

เครื่องกลึงแนวอนจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เครื่องกลึงที่ใช้ต้องมีเบรกที่สามารถหยุดหัวจับเครื่องได้โดยใช้ระยะเวลาในการหยุดน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 เครื่องกลึงแนวอน

#### 3.1.2 ชุดไฮดรอลิก

ชุดไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนแทนยันศูนย์ท้ายแทนทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่เกิดแรงเสียดทาน เป็นผลทำให้ชิ้นงานติดกัน โดยแรงดันที่ใช้ในการกดแช่ชิ้นงาน 20 บาร์ และแรงดันที่ใช้ในการอัดคือ 25 บาร์ , 30 บาร์ และ 35 บาร์ตามลำดับ





รูปที่ 3.2 ชุดไฮดรอลิก

### 3.1.3 เครื่องเชื่อมทิก

การอาร์คของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำการเชื่อม เพื่อหลอมละลายชิ้นงานให้ติดกัน ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบ่อหลอมละลายเพื่อให้ลวดเชื่อมกับชิ้นงานเดิมประสานเข้าด้วยกัน การเชื่อมด้วยวิธีนี้จะสามารถควบคุมการเติมลวดเชื่อมได้ เพราะสามารถมองเห็นบ่อหลอม



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมทิกของทางโรงงาน

### 3.1.4 นาฬิกาจับเวลา

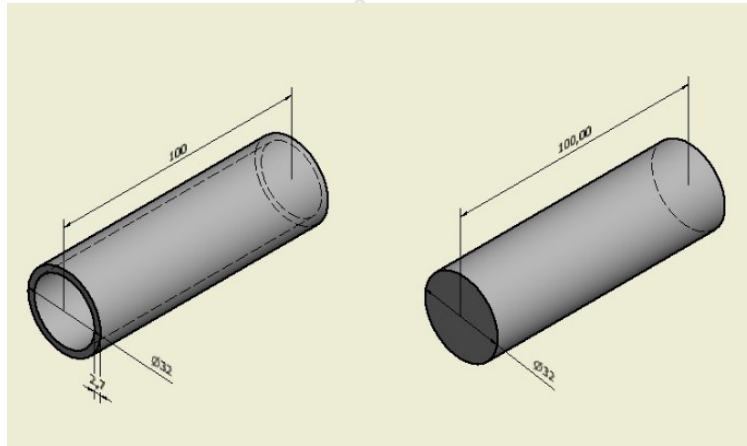
นาฬิกาจับเวลานำมาใช้เพื่อทำการจับเวลาในการเชื่อมชิ้นงาน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเชื่อมแต่ละครั้งจะแตกต่างกันโดยเวลาที่ใช้ในการกัดแซ่ชิ้นงาน 10 วินาที และเวลาที่ใช้ในการกัดอัดชิ้นงาน 5 , 7 และ 9 วินาทีตามลำดับ

### 3.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

#### 3.2.1 การสร้างชิ้นงานทดสอบ

1) นำท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตัดให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 32 มิลลิเมตร และ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 26 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3.4

2) นำเพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตัดให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 32 มิลลิเมตร ตัดให้มีความยาว 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด 32 × 100 มิลลิเมตร

#### 3.2.2 การหาตัวแปรที่เหมาะสม

นำชิ้นงานที่จัดเตรียมไว้มาทดสอบ เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3

ตารางที่ 3.1 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ที่ความดันกดแซ่ชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 3 วินาที

ความเร็วรอบ (รอบ / นาที)	การเชื่อมติดกัน	เวลาที่ชิ้นงานเกิดความร้อน(วินาที)	ลักษณะรอยเชื่อม
1,250	✓	27	น้อย
1,800	✓	20	ปานกลาง
2,500	✓	10	มาก

จากตารางที่ 3.1 พบว่าที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ชี้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานน้อยที่สุด คือ 10 วินาที เพราะเวลาในการแช่ชิ้นงานนั้นมีเวลาในการควบคุมไม่นานเกินไป ความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที ชี้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานค่อนข้างมากคือ 20 วินาที และความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ชี้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานมากเกินไป คือ 27 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการหลอมละลายนานเกินไปจึงไม่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เพราะทำให้เสียเวลาในการกดแช่ชิ้นงานที่มากเกินไป

**ตารางที่ 3.2** เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ 10 วินาที ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที

เวลาในการกดอัด ( วินาที )	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม
3	√	น้อย
5	√	ปานกลาง
7	√	ปานกลาง
9	√	ปานกลาง
11	√	มากเกินไป

จากตารางที่ 3.2 เวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานคือ 5 วินาที 7 วินาที และ 9 วินาที ซึ่งเชื่อมชิ้นงานติดกัน เนื้อของวัสดุเกิดปานกลางทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ

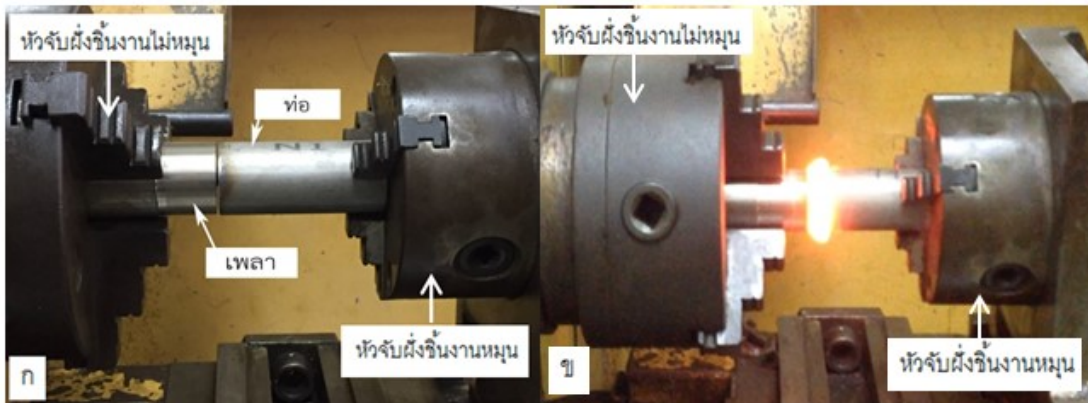
**ตารางที่ 3.3** ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 10 วินาที และเวลากดอัด 5, 7, และ 9 วินาที ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที

ความดันกดอัดชิ้นงาน ( บาร์ )	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม
20	√	น้อย
25	√	ปานกลาง
30	√	ปานกลาง
35	√	ปานกลาง
40	√	มากเกินไป

จากตารางที่ 3.3 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทาน ความดันที่การกดแซ่ คือ 20 บาร์ ซึ่งมีค่าความดันที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความร้อน และมีค่าความดันที่น้อยที่สุด จึงเลือกค่าความดันที่ใช้ในการกดอัดที่เหมาะสมในการเชื่อมอัดชิ้นงาน คือ 25 บาร์ 30 บาร์ และ 35 บาร์ ตามลำดับ เพราะเนื้อของวัสดุเกิดปานกลางทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ ที่ความดัน 40 บาร์ จะมีลักษณะครีบใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุมากเกินไป

### 3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินงานการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

1) นำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แบบเพลาดันมาจับยึดที่หัวจับเครื่องกลึง และนำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แบบท่ออีกหนึ่งชิ้นมาจับยึดที่หัวจับของชุดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง

- 2) กำหนดความดัน เวลา ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งความดันที่ใช้ในการกดแซ่คือ 20 บาร์ และความดันที่ใช้ในการกดอัด 25 บาร์, 30 บาร์, และ 35 บาร์ ตามลำดับ
- 3) ตั้งความเร็วรอบของเครื่องกลึง 2,500 รอบ/นาที จากนั้นเปิดเครื่องกลึงทำการเชื่อมชิ้นงาน
- 4) ใช้ความดัน 20 บาร์เพื่อให้กระบอกไฮดรอลิก เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่จับยึดที่หัวจับของเครื่องกลึง โดยใช้เวลาในการกดแซ่ชิ้นงานคือ 10 วินาที (เป็นเวลาที่เกิดความร้อนเมื่อเกิดการเสียดทาน) แล้วเพิ่มความดันในการกดอัดชิ้นงาน 25 บาร์, 30 บาร์, และ 35 บาร์ ตามลำดับ
- 5) เมื่อครบเวลาที่กำหนด หยุดเครื่องกลึงแบบทันที
- 6) ถอดชิ้นงานทดลองออกจากเครื่องกลึง
- 7) ตรวจสอบการเชื่อมด้วยสายตาว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันหลังจากได้ทำการก่อนการทำทดสอบ หาค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3.4 ค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตัวแปรที่เหมาะสม	ความเร็วรอบ	เวลา		ความดัน		จำนวนชิ้นงาน
		เวลาในการกดแช่	เวลาในการกดอัด	ความดันในการกดแช่	ความดันในการกดอัด	
1	2,500	10	5	20	25	10
2	2,500	10	7	20	25	10
3	2,500	10	9	20	25	10
4	2,500	10	5	20	30	10
5	2,500	10	7	20	30	10
6	2,500	10	9	20	30	10
7	2,500	10	5	20	35	10
8	2,500	10	7	20	35	10
9	2,500	10	9	20	35	10

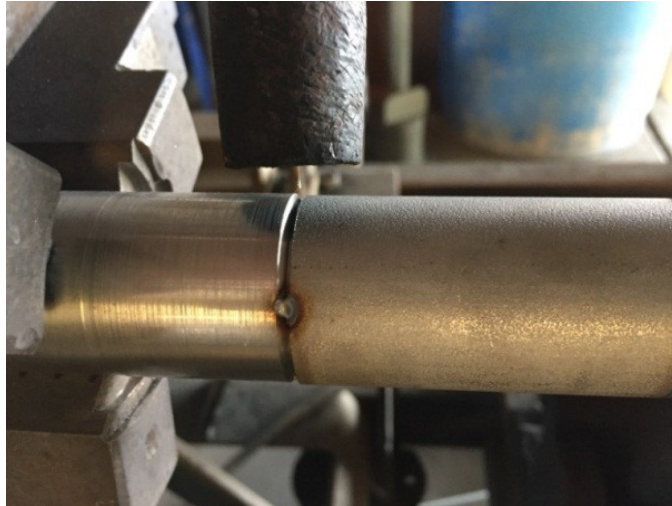
### 3.3 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบการเชื่อมทิก

3.3.1 ขนาดของชิ้นงานการเชื่อมทิก ขนาดเดียวกับการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และเตรียมเครื่องเชื่อมทิก โดยการเปิดเครื่องเชื่อม เซ็คกระแสที่ใช้เชื่อม แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม โดยรายละเอียดจะถูกกำหนดโดยทางโรงงานเชื่อม



รูปที่ 3.6 ค่าตัวแปรในการเชื่อมทิก

3.3.2 นำชิ้นงานที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการจับยึดชิ้นงาน ซึ่งการเชื่อมทิกเป็นกระบวนการเชื่อมที่อาศัยการอาร์คระหว่างขั้วทั้งสองเตน และวัสดุที่นำมาเชื่อม



รูปที่ 3.7 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง

3.3.3 ดำเนินการเชื่อม โดยเครื่องเชื่อมจะทำการหมุนพรีอโต้ไปก่อน เมื่อถึงค่าเวลาที่ตั้งไว้ เครื่องจะทำการเชื่อมอัตโนมัติตามที่ได้คำนวณไว้ โดยเมื่อเชื่อมเสร็จจะได้ชิ้นงานตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะรอยเชื่อมทิก

### 3.4 วิธีการวัดผล

#### 3.4.1 ทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

1) นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการเชื่อมทิกมากลึงล่างครึ่งออก  
ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึง และเพื่อทดสอบแรงดึง

2) นำชิ้นงานที่จัดเตรียมเรียบร้อยแล้ว ไปทดสอบแรงดึงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเค้นกับความเครียดจากเครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง

### 3.4.2 ทดสอบความแข็ง (Vickers Hardness Test)

1) นำชิ้นงานผ่าด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องไมโครคัตเตอร์

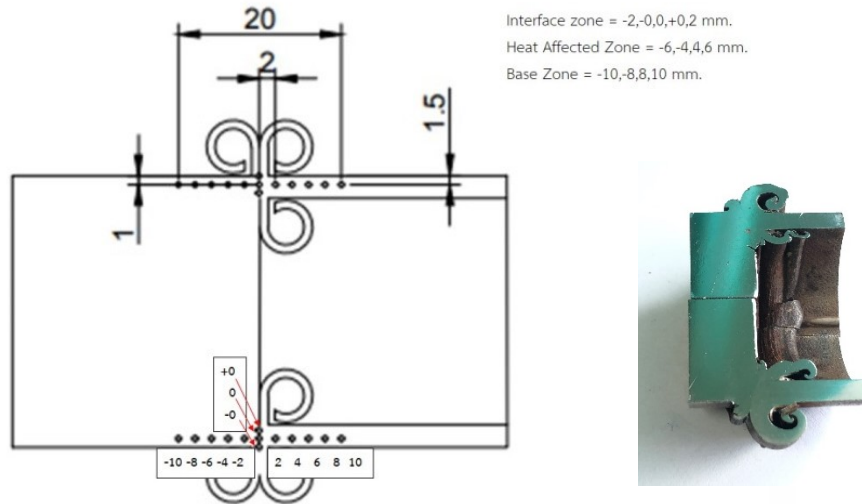
2) นำมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องตรวจสอบความแข็ง Microhardness Vickers ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องตรวจสอบความแข็ง Microhardness Vickers



3) ลักษณะการกวดัดความแข็งในแนวนอน (Horizontal) ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวนอน (Horizontal)

### 3.4.3 ทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1) นำชิ้นงานที่ผ่าด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์แล้ว ขัดกระดาษทรายโดยจะใช้กระดาษทรายน้ำ ตีบนเครื่องขัดแบบจานหมุน เริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 400 600 800 1000 และ 1500 ต้องขัดทิศทางเดียวกันตลอดผิวชิ้นงานแล้วหมุนไปมุม 90 องศา โดยให้มีน้ำไหลผ่านชิ้นงานตลอดเวลา



รูปที่ 3.14 เครื่องขัดกระดาษทราย

2) เมื่อขัดกระดาษทรายน้ำเสร็จแล้ว นำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาดซึ่งมีผงขัด ได้แก่ ผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ เพื่อให้ชิ้นงาน ชิ้นงานจะมีความเงาใสคล้ายกระจก และละเอียดมากยิ่งขึ้น

3) จากนั้นนำชิ้นงานมาส่องโครงสร้าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope) ดังรูปที่ 3.15 เพื่อแสดงรายละเอียดเฟสของเกรนตามตำแหน่งที่กำหนด



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope)

#### 3.4.4 การตรวจสอบทางเคมี

โดยจะตรวจสอบเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) จะตรวจสอบจากชิ้นงานที่ดีที่สุดจากการทดลอง โดยจะตรวจสอบ ชิ้นละ 5 ตำแหน่ง คือ Base Zone, Heat Effected Zone, Interface Zone ของชิ้นงานเพลลาตัน และ ท่อ



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากการดำเนินการศึกษาการทดลองกระบวนการการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมแรงเสียดทานที่ส่งผลต่อแรงดึงและความแข็งแรงระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และเพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และได้กำหนดความดัน และ เวลาในการเชื่อมชิ้นงาน ในส่วนของบทนี้เป็นการนำเสนอและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และเพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยการเชื่อมเสียดทานและเชื่อมทิก จะได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ขนาดครีบกาวเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

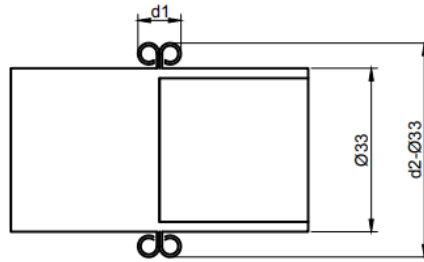
##### 4.1.1 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

โดยเรียงจากความดันน้อยไปหามาก และเวลาน้อยไปหามาก ตามลำดับ ขนาดครีบกาวของชิ้นงานจะมีลักษณะดังรูปต่อไปนี้ ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ จากตารางที่ 3.5



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่เปรียบเทียบงานรอยเชื่อม

4.1.2 การวัดขนาดครีบของชิ้นงานที่ทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก



รูปที่ 4.2 การวัดครีบของชิ้นงาน

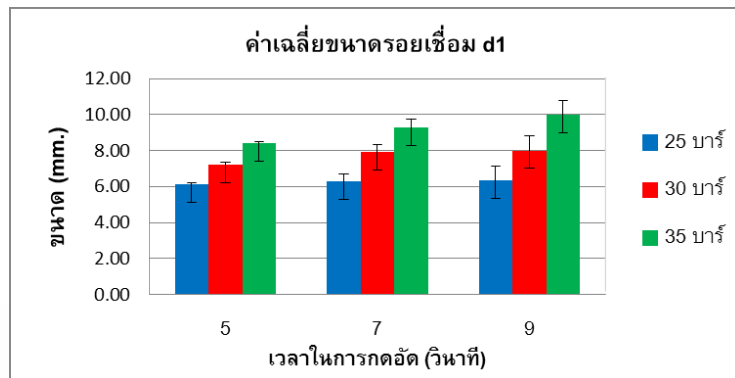
ตารางที่ 4.1 ค่าการวัดขนาดครีบของแต่ละตัวแปรจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน d1 และ d2

ตัวแปรที่/ ขนาด ครีบ	d1 (mm.)			ค่าเฉลี่ย d1	d2 (mm.)			ค่าเฉลี่ย d2
	1	2	3		1	2	3	
T1	6.15	6.20	6.00	6.12	6.80	6.90	7.30	7.00
T2	6.30	6.10	6.50	6.30	7.70	7.60	7.90	7.73
T3	6.60	6.30	6.10	6.33	8.15	8.10	8.00	8.08
T4	7.40	7.20	7.10	7.23	8.30	8.50	8.10	8.30
T5	8.00	7.8	8.00	7.93	8.70	8.60	8.80	8.70
T6	8.30	7.90	7.80	8.00	9.70	9.80	9.80	9.77
T7	8.40	8.50	8.30	8.40	9.80	10.10	10.20	10.03
T8	9.00	9.30	9.60	9.30	10.60	10.80	10.70	10.70
T9	11.00	9.60	9.40	10.00	12.00	11.60	11.80	11.80

ตารางที่ 4.2 ค่าการวัดขนาดครีบจากการเชื่อมทิก d1 และ d2

ขนาดครีบ/ชั้นที่	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
d1	7.6	6.8	7.7	7.37
d2	6.2	6.4	6.3	6.30

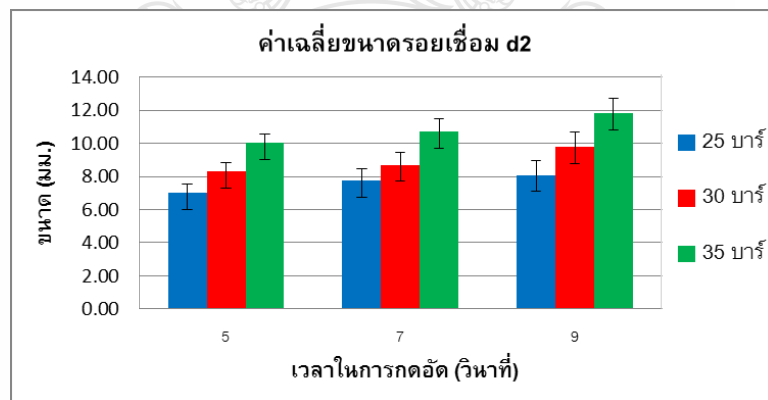
จากความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ยขนาดของครีบชิ้นงาน d1 เมื่อเพิ่มความดันและเวลาสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยขนาดรอยเชื่อม d1

จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเวลาและความดันเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยเชื่อมจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะส่งผลให้โลหะ เกิดการหลอมละลายมากขึ้นและเมื่อได้รับแรงดันในการกวดอัดเพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุที่เกิดการหลอมละลาย เกิดการอัดที่ง่ายกว่าวัสดุที่หลอมละลายต่ำกว่า ทำให้ขนาดของครีบโลหะที่ถูกแรงอัดมีขนาดเพิ่มขึ้นโดย แปรผันไปตามเวลาในการกวดอัดและวินาทีในการเชื่อมแรงเสียดทาน

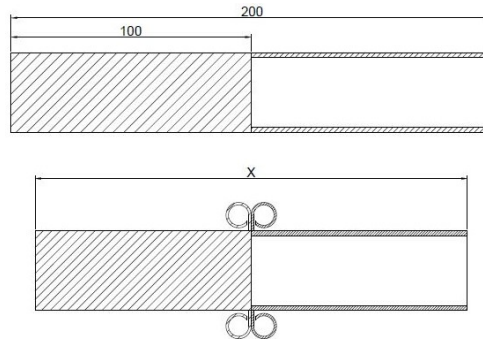
จากความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ยขนาดของครีบชิ้นงาน d2 เมื่อเพิ่มความดันและเวลาสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยขนาดรอยเชื่อม d2

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเวลาและความดันเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยเชื่อมจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะส่งผลให้โลหะ เกิดการหลอมละลายมากขึ้นและเมื่อได้รับแรงดันในการกวดอัดเพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุที่เกิดการหลอมละลาย เกิดการอัดที่ง่ายกว่าวัสดุที่หลอมละลายต่ำกว่า ทำให้ขนาดของครีบโลหะที่ถูกแรงอัดมีขนาดเพิ่มขึ้นโดย แปรผันไปตามเวลาในการกวดอัดและวินาทีในการเชื่อมแรงเสียดทาน

4.1.3 การวัดระยะยวบตัวของชิ้นงานหลังการทดสอบเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยจะวัดขนาดตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การวัดระยะยวบของชิ้นงานหลังเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดระยะยวบของชิ้นงานหลังเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตัวแปร(ความดันกดอัด และเวลากดอัด)	ระยะยวบของชิ้นงาน (มม.)			ค่าเฉลี่ย ระยะยวบของชิ้นงาน (มม.)
	1	2	3	
25 บาร์ 5 วินาที	9.64	9.74	9.42	9.60
25 บาร์ 7 วินาที	9.89	9.58	9.68	9.72
25 บาร์ 9 วินาที	10.36	9.89	10.21	10.15
30 บาร์ 5 วินาที	11.62	11.30	11.15	11.36
30 บาร์ 7 วินาที	12.56	12.25	12.56	12.46
30 บาร์ 9 วินาที	13.04	12.80	12.95	12.93
35 บาร์ 5 วินาที	13.24	13.35	13.50	13.36
35 บาร์ 7 วินาที	14.15	14.62	14.45	14.41
35 บาร์ 9 วินาที	16.25	16.65	16.85	16.58

จากตาราง 4.3 พบว่าเมื่อเวลาและความดันเพิ่มขึ้น ระยะการยวบตัวของโลหะจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้น และ เมื่อนำเปรียบเทียบกับขนาดของครีบลโลหะ จะเห็นได้ว่าจะมีค่าความสัมพันธ์เป็นไปตามกัน เนื่องจาก เมื่อขนาดของครีบลมากขึ้นจะส่งผลต่อความยาวของวัสดุ ซึ่งเมื่อความยาวของวัสดุลดน้อยลง เกิดจากการเพิ่มเวลาและแรงดันในการเชื่อมมากขึ้นจะส่งผลให้โลหะได้รับแรงเสียดทานมากขึ้นทำให้โลหะได้รับความร้อนสูงจนถึงเกิดการหลอมละลายสูงจนทำให้ความร้อนได้ถูกถ่ายเทไปบริเวณรอบข้างมากขึ้น และเมื่อได้รับแรงดันในการกดอัดเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ขนาดความยาวโลหะลดน้อยลง และถูกดันออกมากลายเป็นในส่วนของครีบลโลหะ ที่ถูกดันออกด้านข้างทั้งภายในท่อ และภายนอกท่อโลหะ

## 4.2 ผลการทดสอบแรงดึง

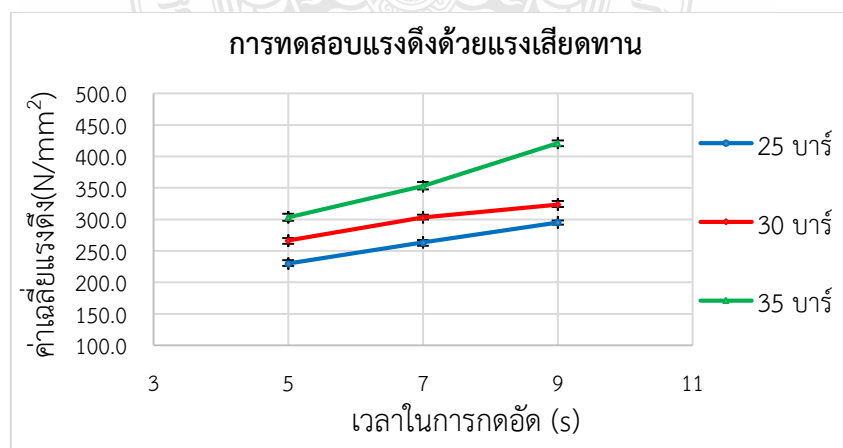
### 4.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

การทดสอบสอบแรงดึงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปทำการกลึงให้ได้ขนาด 32 มม. จากนั้นนำไปทดสอบแรงดึงซึ่งชิ้นงานจะถูกดึงยึดออกเสมอ จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ความเร็วในการยึดตัวจะต้องต่ำ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด แรงดึงและความยาวที่ยึดออกของชิ้นทดสอบนำมาวิเคราะห์ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยแรงเสียดทาน

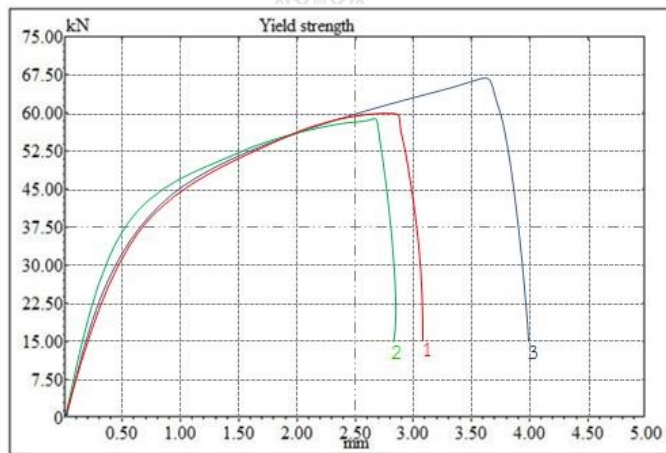
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )
25	5	229.9
	7	263.5
	9	295.3
30	5	266.4
	7	303.1
	9	323.7
35	5	303.3
	7	352.8
	9	421.0

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาสามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้

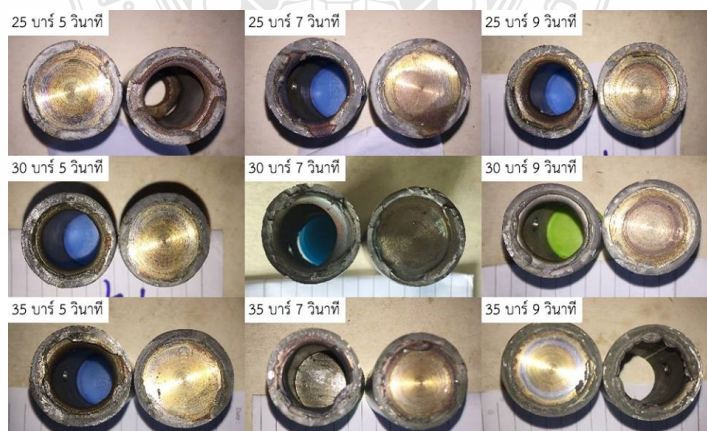


รูปที่ 4.6 การทดสอบแรงดึงด้วยแรงเสียดทาน

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ความดันและเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความดัน 35 บาร์ และเวลา 9 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุด และความดันและเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความดัน 25 บาร์ และเวลา 5 วินาที ให้ค่าแรงดึงที่ต่ำที่สุด เนื่องจาก เมื่อเพิ่มเวลาในการเสียดทาน จะทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายมากขึ้น ความร้อนจะสูงขึ้น จะเกิดการการแพร่ของอะตอมที่สามารถแพร่ได้ไกลขึ้น[22] และ เมื่อความร้อนสูงขนาดของเม็ดเกรนจะมีขนาดที่ขยายตัวขึ้น[23] และ เพิ่มแรงดันในการกดอัดที่มากขึ้น จะทำให้ขนาดของเม็ดเกรนถูกบีบอัดเข้าหากัน โดยแรงกดอัดที่สูงกว่าทำให้ขนาดช่องว่างในเม็ดเกรนลดน้อยลงกว่าแรงอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อขนาดและช่องว่างของเม็ดเกรน ที่เล็กลงหรือละเอียดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงดึงและความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น [23] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ช่วงชัย ชูปวา, และชวลิต ถิ่นวงศ์ พิทักษ์ [6] และสามารถดูลักษณะของการหลอมละลายของท่อและเพลาดัน หลังจากทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะกราฟทดสอบแรงดึง



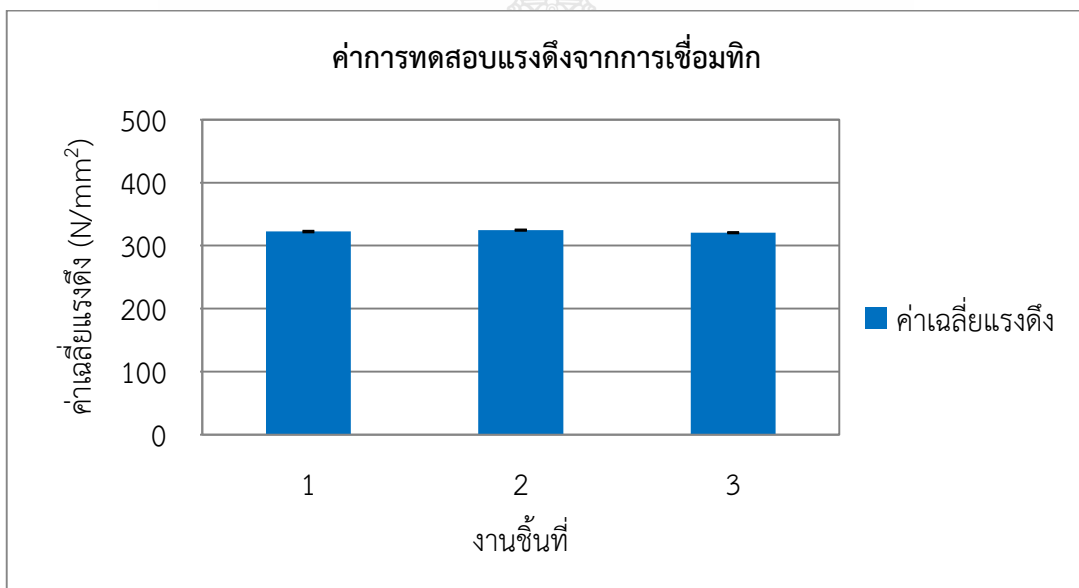
รูปที่ 4.8 ลักษณะของแนวเชื่อมหลังทดสอบแรงดึง



จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าลักษณะรอยขาดของโลหะ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง โดยสังเกตจากรูปที่ 4.7 ลักษณะจุด tensile strength break เป็นจุดที่ break point และ yield point อยู่ที่จุดเดียวกัน โดยลักษณะการแตกหักจะคล้ายกับ Brittle Fracture และ พบว่าที่ความดัน 25 บาร์ เวลาที่ 5 วินาที แนวเชื่อมของชิ้นงานมีช่องว่างระหว่างเนื้อโลหะซึ่งเกิดจากการหลอมละลายไม่หมดทำให้รับแรงดึงได้น้อยสุด และ ที่ความดัน 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที จะมีการหลอมละลายเต็มพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงเสียดทาน จึงสามารถรับแรงดึงได้มากที่สุด เนื่องจาก เวลาและแรงอัดที่มากกว่า ทำให้แรงเสียดทานมากขึ้นและโลหะที่หลอมละลายมากขึ้น จึงหลอมละลายเข้าหากัน และเมื่อได้รับแรงกดมากขึ้น จึงทำให้เนื้อของโลหะมีการหลอมละลายเข้าหากันมากขึ้นในขณะที่ยึด

#### 4.2.2 การทดสอบแรงดึงจากการเชื่อมทิก

การทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการทดลองวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4.9 โดยมีค่าเฉลี่ยแรงดึง 320.54 N/mm<sup>2</sup>, 322.16 N/mm<sup>2</sup> และ 324.21 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ค่าการทดสอบแรงดึงจากการเชื่อมทิก

#### 4.3 ผลการทดสอบความแข็ง

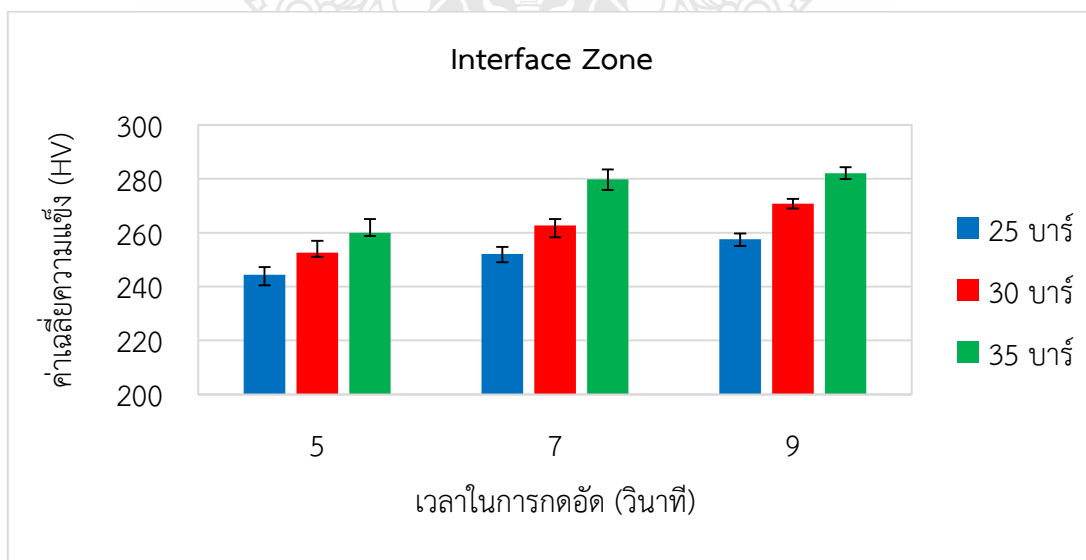
การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Microhardness (ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์) ซึ่งจะทดสอบในแนว (Horizontal) เป็นจำนวน 2 แนวตรงข้ามกัน โดยกำหนดให้จุดกึ่งกลางของชิ้นงานอยู่ตำแหน่งที่ 0 มิลลิเมตร ค่าที่อ่านได้บริเวณรอยเชื่อมจะแสดงในรูปแบบของตารางดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HV)
25	5	248.21
	7	254.67
	9	260.03
30	5	260.99
	7	266.78
	9	271.56
35	5	268.19
	7	279.28
	9	289.22

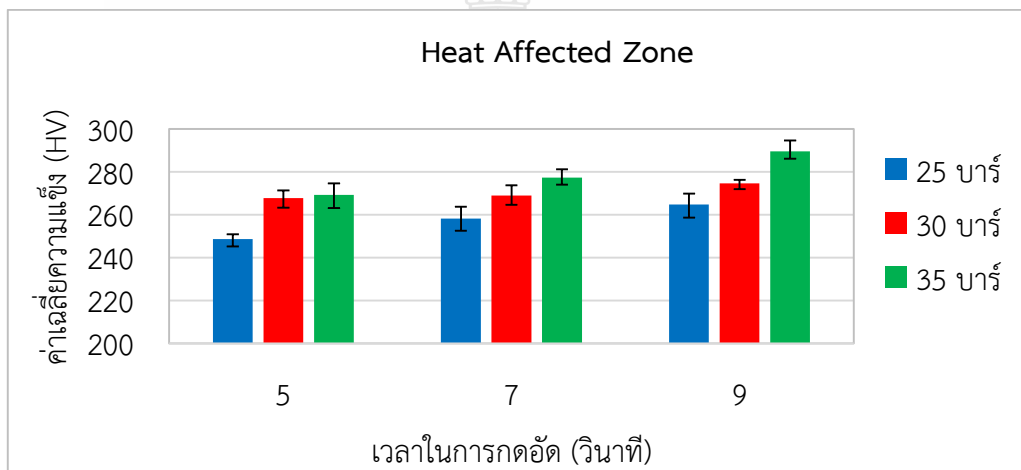
#### 4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งจะนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ช่วงที่จะทดสอบความแข็งที่มีอิทธิพลมาจากความร้อนที่ไม่เท่ากันอาจจะส่งผลให้ค่าความแข็งไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.10 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Interface zone

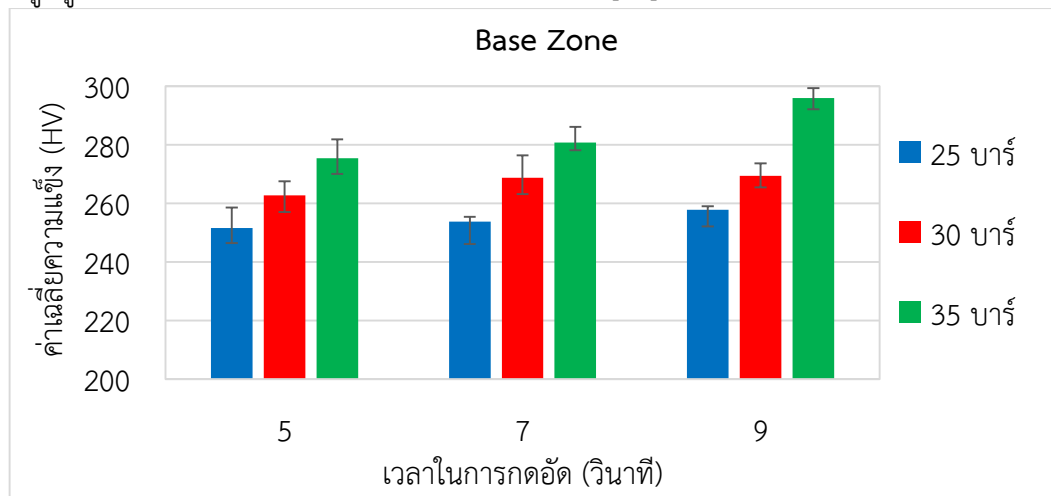
จากรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบช่วงจุด Interface Zone จากค่าเฉลี่ยที่ได้ในระยะ 3 จุด คือ ระยะ-2 ,0, 2 ที่ความดัน 25 บาร์ ในเวลา 5 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงน้อยที่สุดเท่ากับ 244.3 HV และที่ความดัน 35 บาร์ ในเวลา 9 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงมากที่สุดเท่ากับ 282.1 HV พบว่าที่เวลาคงที่ แล้วเพิ่มความดัน ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น หรือ ที่ความดันคงที่ แล้วเพิ่มเวลา ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มเวลา หรือ เพิ่มความดันจะทำให้โลหะเกิดความร้อนที่สูงขึ้น เมื่อความร้อนสูงขึ้นทำให้โอกาสที่โลหะจะเกิดการหลอมละลายและทำให้โอกาสในการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น[24] และขนาดของเม็ดเกรนจะมีขนาดที่ขยายตัวขึ้น[23] และ เมื่อเพิ่มแรงดันในการกดอัดที่มากขึ้น จะทำให้ขนาดของเม็ดเกรนถูกบีบอัดเข้าหากัน โดยแรงกดอัดที่สูงกว่าทำให้ขนาดช่องว่างในเม็ดเกรนลดน้อยลงกว่าแรงอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อขนาดและช่องว่างของเม็ดเกรนที่เล็กลงหรือละเอียดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น[23] ซึ่งลักษณะจะสอดคล้องกับการรีดขึ้นรูปร้อน โดยโลหะที่ถูกอัดในขณะที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ช่องว่างของเม็ดเกรนมีขนาดลดน้อยลง[24]



รูปที่ 4.11 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งแรงช่วง Heat Affected Zone

จากรูปที่ 4.11 เปรียบเทียบช่วงจุด Heat Affected Zone จากค่าเฉลี่ยที่ได้ในระยะ 4 จุด คือ ระยะ-6, -4, 4, และ 6 ที่ความดัน 25 บาร์ ในเวลา 5 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงน้อยที่สุดเท่ากับ 248.7 HV และที่ความดัน 35 บาร์ ในเวลา 9 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงมากที่สุดเท่ากับ 289.5 HV พบว่าที่เวลาคงที่ แล้วเพิ่มความดัน ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น หรือ ที่ความดันคงที่ แล้วเพิ่มเวลา ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มเวลา หรือ เพิ่มความดันจะทำให้โลหะเกิดความร้อนที่สูงขึ้น เมื่อความร้อนสูงขึ้นทำให้โอกาสที่โลหะจะเกิดการหลอมละลายและทำให้โอกาสในการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น[24] และ ขนาดของเม็ดเกรนจะมีขนาดที่ขยายตัวขึ้น[23] และ เมื่อเพิ่มแรงดันในการกดอัดที่มากขึ้น จะทำให้ขนาดของเม็ดเกรนถูกบีบอัดเข้าหากัน โดยแรงกดอัดที่สูงกว่าทำให้ขนาดช่องว่างในเม็ดเกรนลดน้อยลงกว่าแรงอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อขนาดและช่องว่างของเม็ดเกรนที่เล็กลงหรือละเอียดมากขึ้น จะส่งผล

ให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น[23] ซึ่งลักษณะจะสอดคล้องกับการรีดขึ้นรูปร้อน โดยโลหะที่ถูกอัดในขณะที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ช่องว่างของเม็ดเกรนมีขนาดลดน้อยลง[24]



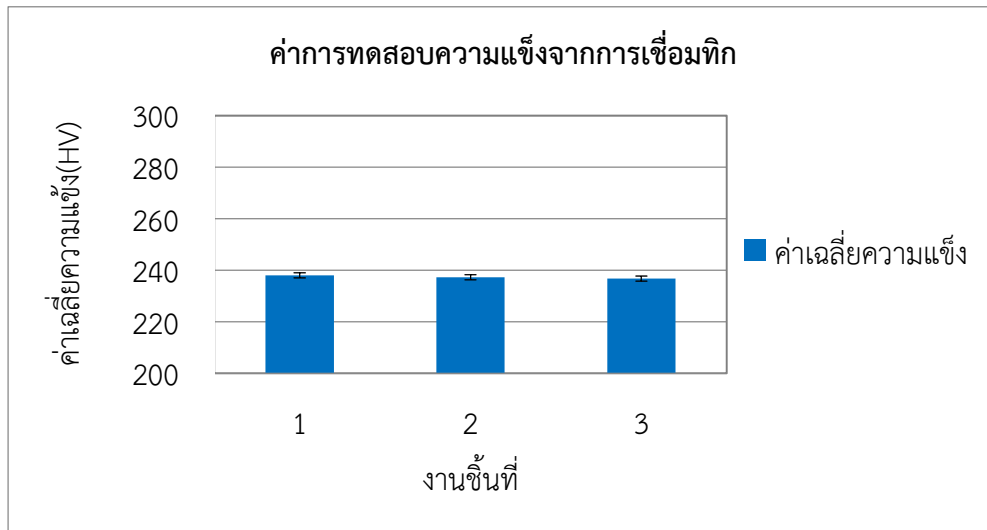
รูปที่ 4.12 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งแรงช่วง Base zone

จากรูปที่ 4.12 เปรียบเทียบช่วงจุด Base Zone จากค่าเฉลี่ยที่ได้ในระยะ 4 จุด คือ ระยะ -10, -8, 8, และ 10 ที่ความดัน 25 บาร์ ในเวลา 5 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงน้อยที่สุดเท่ากับ 251.6 HV และที่ความดัน 35 บาร์ ในเวลา 9 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงมากที่สุดเท่ากับ 296.1 HV พบว่าที่เวลาคงที่ แล้วเพิ่มความดัน ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น หรือ ที่ความดันคงที่ แล้วเพิ่มเวลา ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มเวลา หรือ เพิ่มความดันจะทำให้โลหะเกิดความร้อนที่สูงขึ้น เมื่อความร้อนสูงขึ้นทำให้โอกาสที่โลหะจะเกิดการหลอมละลายและทำให้โอกาสในการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น[24] และขนาดของเม็ดเกรนจะมีขนาดที่ขยายตัวขึ้น[23] และ เมื่อเพิ่มแรงดันในการกวดอัดที่มากขึ้น จะทำให้ขนาดของเม็ดเกรนถูกบีบอัดเข้าหากัน โดยแรงกวดอัดที่สูงกว่าทำให้ขนาดช่องว่างในเม็ดเกรนลดน้อยลงกว่าแรงอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อขนาดและช่องว่างของเม็ดเกรนที่เล็กลงหรือละเอียดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น[23] ซึ่งลักษณะจะสอดคล้องกับการรีดขึ้นรูปร้อน โดยโลหะที่ถูกอัดในขณะที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ช่องว่างของเม็ดเกรนมีขนาดลดน้อยลง[24]

ดังนั้น บริเวณทั้ง 3 จุด พบว่าที่ Interface Zone จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงน้อยกว่า จุด Heat Affected Zone และ Base Zone และที่จุด Base Zone มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจาก บริเวณ Interface Zone และ Heat Affected Zone ได้รับความร้อนในการเชื่อมสูงกว่าบริเวณ Base Zone และเมื่อได้รับความร้อนทำให้โอกาสที่โลหะจะเกิดการหลอมละลายและทำให้โอกาสในการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น[24] และเมื่อชิ้นงานเชื่อมเสร็จ ชิ้นงานจะถูกเย็นตัวด้วยอากาศ ลักษณะจะคล้ายกับการอบปกติ (Normalizing) จะทำให้ทำให้ชิ้นงานมีความความยืดหยุ่นมากขึ้น ความเปราะในวัสดุมีน้อย และทำให้ลดค่าความแข็งแรง และทำให้ความเค้นภายในเนื้อวัสดุ มีการลดลง[25] ซึ่งสอดคล้องกับ สุริยา ประสมทอง, และคณะ [3] ได้กล่าวไว้ว่า ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำกว่าโลหะฐานซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทาน

#### 4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งจากการเชื่อมทิก

การทดสอบความแข็งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการทดลองวิเคราะห์ที่ได้ตั้งรูปที่ 4.13 โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็ง 238.05 HV, 237.27 HV และ 236.85 HV ตามลำดับ

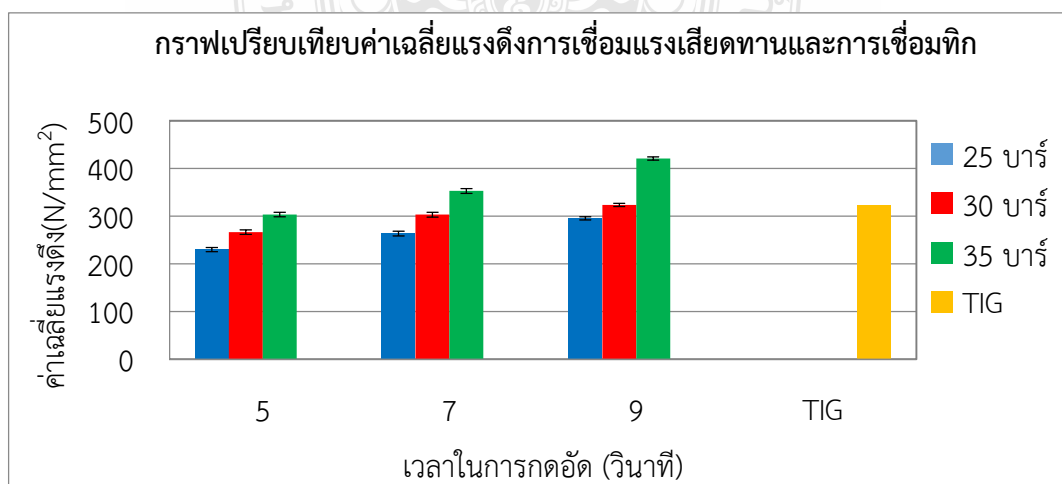


รูปที่ 4.13 ค่าการทดสอบความแข็งจากการเชื่อมทิก

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก

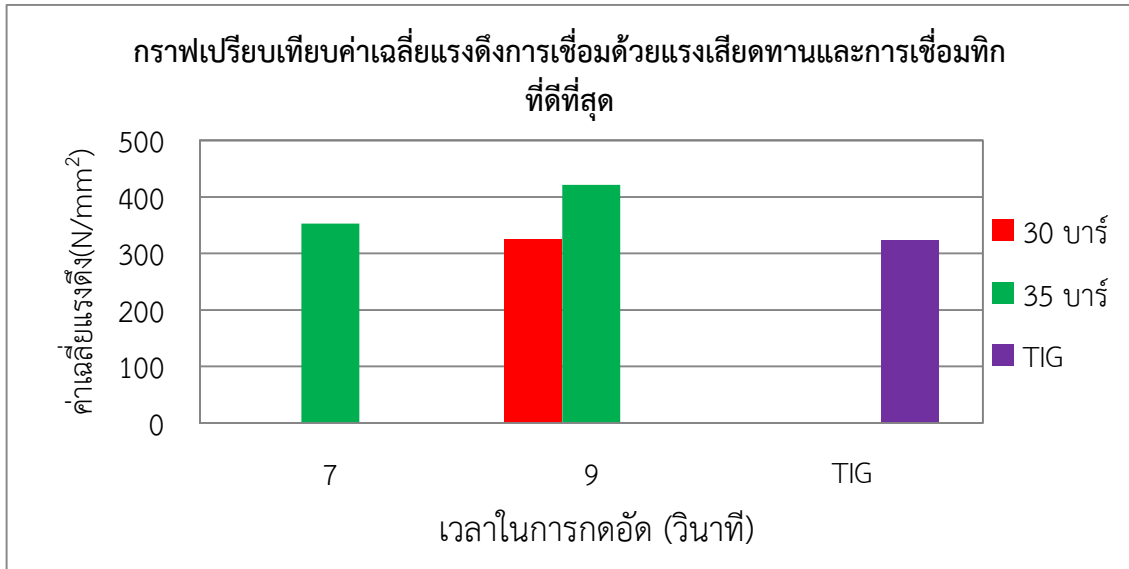
##### 4.4.1 ผลการเปรียบเทียบทดสอบแรงดึง

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ระหว่างความดัน 25,30 ,35 บาร์ และเวลา 5,7,9 วินาที เปรียบเทียบกับขบวนการเชื่อมทิกที่ใช้เครื่องเชื่อมอัตโนมัติของโรงงานผลิตกระบอกสูบน้ำของปั้มน้ำ สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก

จากรูปที่ 4.14 จากกราฟพบว่า ที่ตัวแปร 25 บาร์ เวลา 5 วินาที จะมีค่าเฉลี่ยแรงดึงน้อยที่สุด และ ที่ตัวแปร 35 บาร์ เวลา 9 วินาที และเมื่อนำค่าเฉลี่ยแรงดึงของการเชื่อมแรงเสียดทานมาเปรียบเทียบกับ การเชื่อมทิก พบว่า มี 3 ตัวแปร ที่มีค่าเฉลี่ยแรงดึงมากกว่า การเชื่อมทิก ดังรูปที่ 4.15



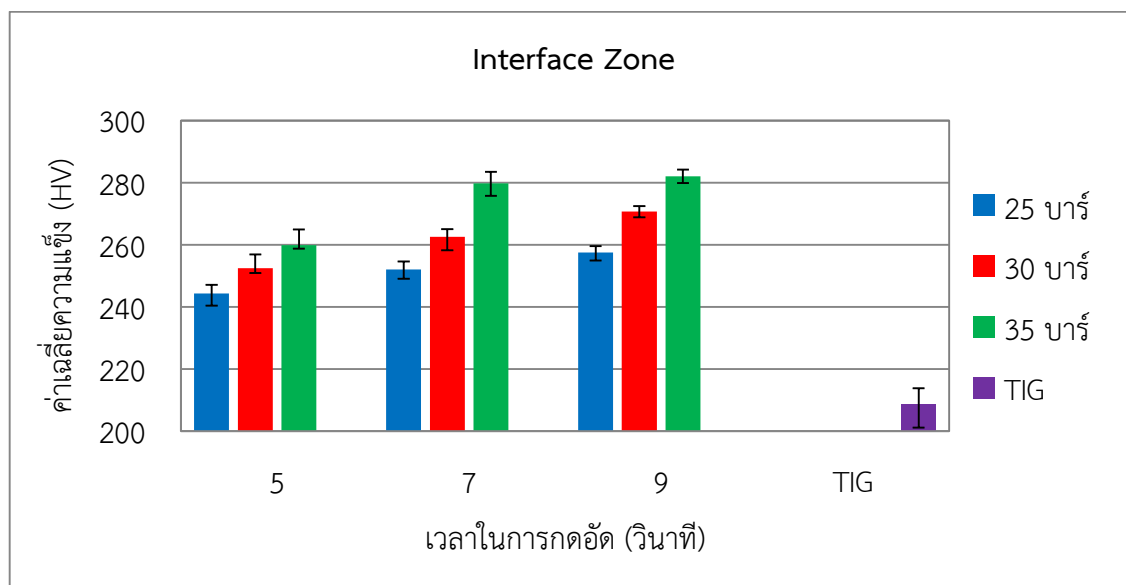
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิกที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีค่ามากกว่ากระบวนการเชื่อมทิก ที่ความดัน 35 บาร์ เวลา 7 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ 352.8 N/mm<sup>2</sup> , ความดัน 30 บาร์ เวลา 9 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ 324.25 N/mm<sup>2</sup> และความดัน 35 บาร์ เวลา 9 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ 421.0 N/mm<sup>2</sup> และ ค่าแรงเฉลี่ยแรงดึงของการเชื่อมทิก ค่าแรงดึงเท่ากับ 322.5 N/mm<sup>2</sup> (จากรูปที่ 4.9) เนื่องจาก เวลาและความดันที่มีค่าแรงดึงน้อยกว่าการเชื่อมทิก อาจเกิดจากสาเหตุ ที่อุณหภูมิในการหลอมละลาย และ แรงดันในการอัดน้อยเกินไปจึงทำให้โลหะทั้ง 2 ชั้น หลอมละลายเข้าหากันน้อยเกินไป หรือ เมื่อโลหะได้รับความร้อน ขนาดของเม็ดเกรนจะเปลี่ยนขนาดโดยขยายตัวขึ้น[23] แต่เมื่อได้รับแรงอัดที่น้อยจึงทำให้ขนาดของเม็ดเกรนถูกบีบอัดน้อยกว่าการที่ได้รับแรงกดอัดมาก จึงทำให้เกิดช่องว่างขนาดเกรนที่เหลืออยู่ จึงส่งผลกระทบค่าแรงดึงที่น้อยกว่าการเชื่อมทิก ในตัวแปรนั้น

ดังนั้น เมื่อนำผลการทดสอบแรงดึงมาวิเคราะห์ พบว่า การเชื่อมแรงเสียดทานที่ใช้เวลาที่ดีที่สุดควรเลือก ความดันที่ 30 บาร์ เวลา 7 วินาที ถ้าเลือกค่าแรงดึงที่สูงที่สุดควรเลือกที่ ความดัน 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที แต่ชิ้นงานก็จะมีครีบที่หนาและใหญ่ซึ่งจะส่งผลให้สิ้นเปลืองวัสดุมากขึ้น จากตารางที่ 4.3 ระยะยุบของชิ้นงานที่ความดัน 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีระยะยุบ 16.58 มม. ถ้าระยะยุบน้อยที่สุดและมีค่าแรงดึงใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก ควรเลือกตัวแปรที่ความดันในการกดอัด 30 บาร์ เวลา 9 วินาที โดยมีระยะยุบของชิ้นงาน 12.93 มม.

#### 4.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็ง

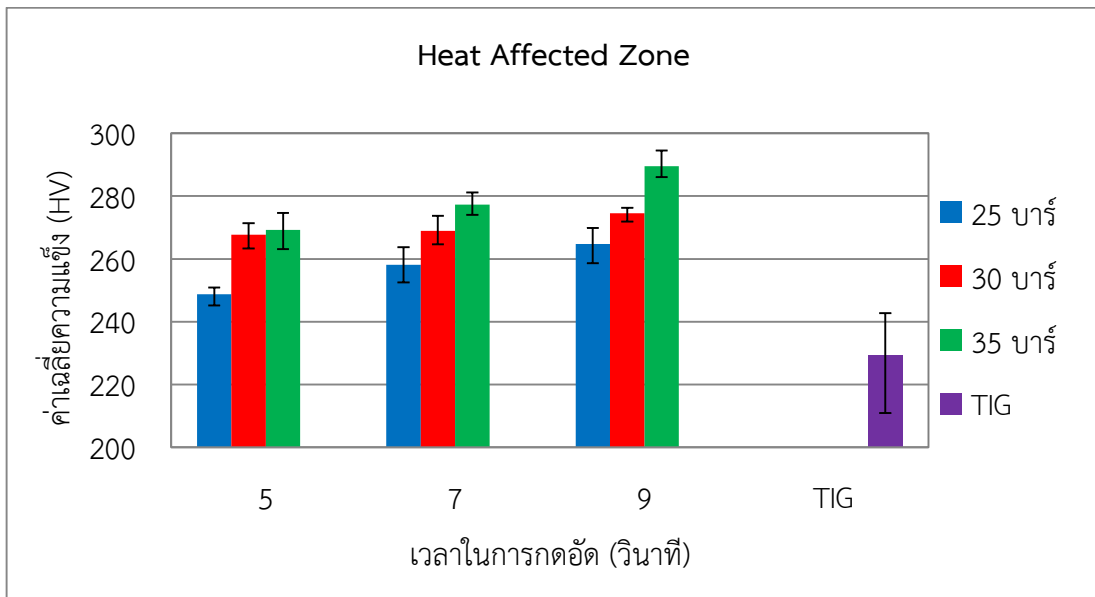
1) เปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Interface Zone ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการเชื่อมทิกโดยกำหนดระยะที่ -2,0,2 ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Interface Zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก

จากรูป 4.16 ค่าความแข็งบริเวณ Interface Zone ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่า กระบวนการเชื่อมทิก เพราะว่า กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะเป็นลักษณะการเชื่อมโดยใช้โลหะด้านหัวจับหมุน อีกด้านจะทำการอัด ให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นจนโลหะหลอมละลาย และ เมื่อวัสดุหลอมละลายจะใช้แรงอัดในการอัดให้วัสดุติดกัน[8] จึงทำให้ขนาดของเม็ดเกรนที่ถูกอัดนั้นมีขนาดเล็กลงและยังลดช่องว่างขนาดของเม็ดเกรน[24] ซึ่งจะทำให้วัสดุมีค่าความแข็งมากกว่าเชื่อมทิก เพราะการเชื่อมทิกใช้การนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสอง ส่องผ่านไปแนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานและใช้การเติมลวดเชื่อมเข้าไปเพื่อยึดโลหะทั้งสองให้ติดกัน[10] ซึ่งจะไม่มีการทำให้ขนาดของเกรนนั้นถูกบีบอัดเหมือนกับการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

2) เปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Heat Effect Zone ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการเชื่อมทิกโดยกำหนดระยะที่ -6,-4-2,0,2,4,6 ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

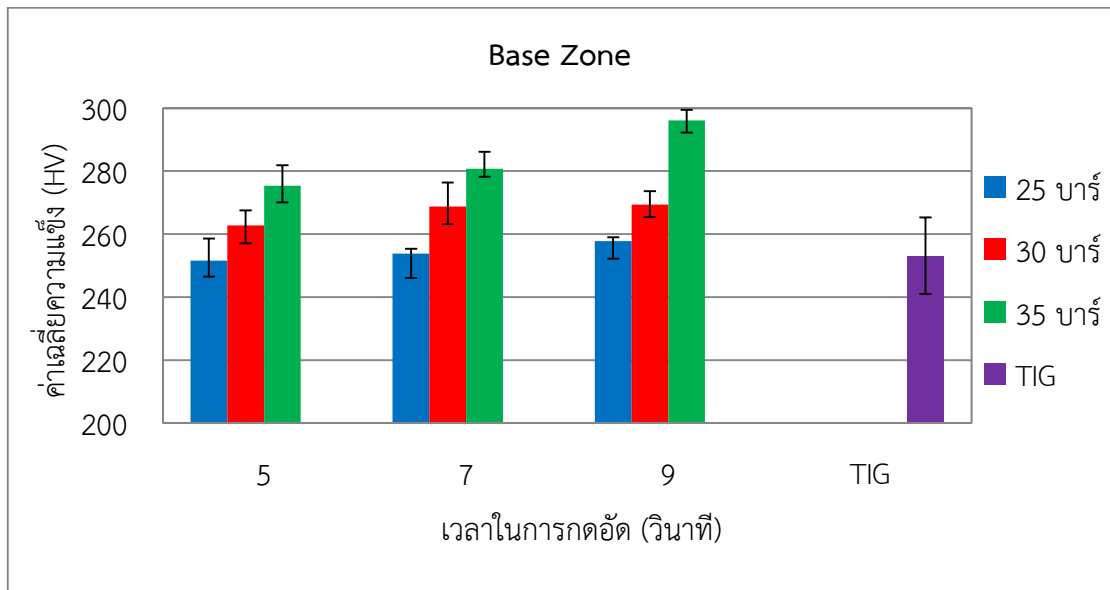


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Heat Affected Zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก

จากรูป 4.17 ค่าความแข็งบริเวณ Heat Affected Zone ซึ่งบริเวณนี้ยังได้รับการกระทบร้อนและแรงอัดที่มากอยู่ แต่น้อยกว่าบริเวณ Interface Zone จากกราฟรูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่า กระบวนการเชื่อมทิก เพราะว่า กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะเป็นลักษณะการเชื่อมโดยใช้โลหะด้านหัวจับหมุน อีกด้านจะทำการอัด ให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นจนโลหะหลอมละลาย และ เมื่อวัสดุหลอมละลายจะใช้แรงอัดในการอัดให้วัสดุติดกัน[8] จึงทำให้ขนาดของเม็ดเกรนที่ถูกดอัดนั้น มีขนาดเล็กลงและยังลดช่องว่างขนาดของเม็ดเกรน[24] ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งมากกว่าเชื่อมทิก เพราะการเชื่อมทิกใช้การนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสแตน ส่งผ่านไปทีแนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานและใช้การเติมลวดเชื่อมเข้าไปเพื่อยึดโลหะทั้งสองให้ติดกัน[10]

3) เปรียบเทียบความแข็งบริเวณ Best Zone ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการเชื่อมทิกโดยกำหนดระยะที่ -10,-8,-6,6,8,10 ของเหล็กกล้าโรสนิม AISI 304

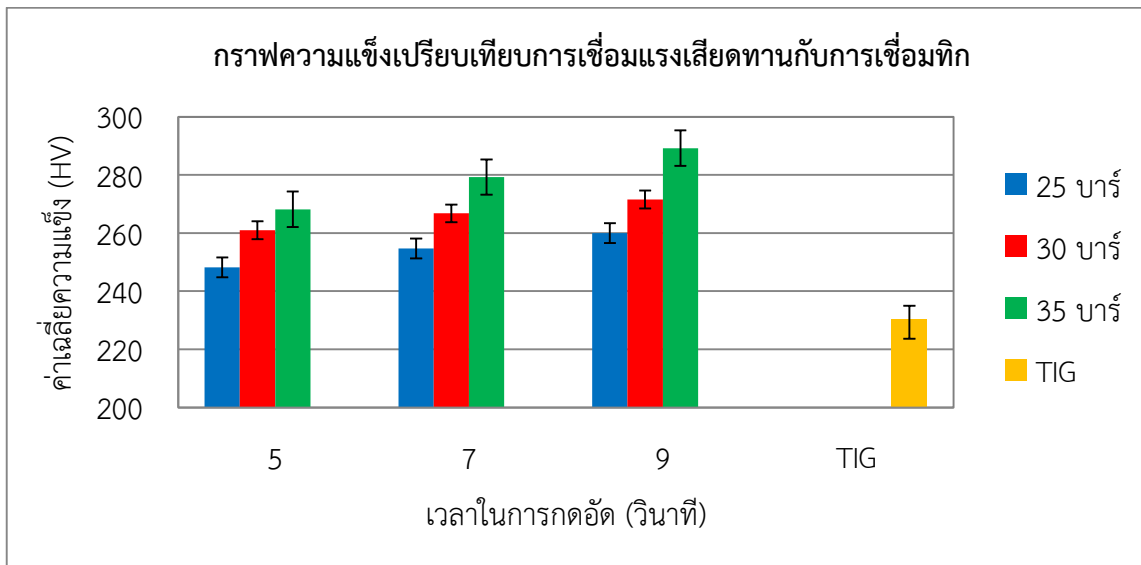




รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งช่วง Best Zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการเชื่อมทิก

จากรูป 4.18 ค่าความแข็งบริเวณ Base Zone พบว่า ค่าความแข็งของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะมีมากกว่าการเชื่อมทิกไม่มาก เนื่องจาก บริเวณ Base Zone จะได้รับการกระทบร้อนและแรงอัดที่น้อยกว่า Interface Zone และ Heat Effect Zone โดยจากกราฟรูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่า กระบวนการเชื่อมทิก เพราะว่า กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะเป็นลักษณะการเชื่อมโดยใช้โลหะด้านหัวจับหมุน อีกด้านจะทำการอัด ให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นจนโลหะหลอมละลาย และ เมื่อวัสดุหลอมละลายจะใช้แรงอัดในการอัดให้วัสดุติดกัน[8] จึงทำให้ขนาดของเม็ดเกรนที่ถูกอัดนั้น มีขนาดเล็กและยังลดช่องว่างขนาดของเม็ดเกรน[24] ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งมากกว่าเชื่อมทิก เพราะการเชื่อมทิกใช้การนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสแตน ส่งผ่านไปที่แนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานและใช้การเติมลวดเชื่อมเข้าไปเพื่อยึดโลหะทั้งสองให้ติดกัน[10]

4) เปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการเชื่อมทิก ของเหล็กกล้าโรสนิม AISI 304



**รูปที่ 4.19** กราฟเปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยทุกจุดของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก

จากรูป 4.19 พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยทุกจุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่ากระบวนการเชื่อมทิกทุกจุด โดยค่าที่สูงที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน 35 บาร์ 9 วินาที ค่าความแข็งเท่ากับ 289.22 HV และค่าที่ต่ำที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน 25 บาร์ 5 วินาที ค่าความแข็ง 248.21 HV และ ค่าความแข็งของกระบวนการเชื่อมทิกเท่ากับ 229.1 HV เนื่องจาก กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะเป็นลักษณะการเชื่อมโดยใช้โลหะด้านหัวจับหมุน อีกด้านจะทำการอัด ให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นจนโลหะหลอมละลาย และ เมื่อวัสดุหลอมละลายจะใช้แรงอัดในการอัดให้วัสดุติดกัน[8] จึงทำให้ขนาดของเม็ดเกรนที่ถูกอัดนั้น มีขนาดเล็กลงและยังลดช่องว่างขนาดของเม็ดเกรน[24] ซึ่งจะทำให้วัสดุมีค่าความแข็งมากกว่าเชื่อมทิก เพราะการเชื่อมทิกใช้การนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสอง ส่องผ่านไปทีแนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานและใช้การเติมลวดเชื่อมเข้าไปเพื่อยึดโลหะทั้งสองให้ติดกัน[10]

ดังนั้น ค่าความแข็งเฉลี่ยทุกจุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่ากระบวนการเชื่อมทิกทุกจุด โดยบริเวณ Interface Zone จะมีค่าความแข็งแรง น้อยกว่า บริเวณ Heat Effect Zone และ บริเวณ Heat Effect Zone จะมีค่าความแข็งแรง น้อยกว่า บริเวณ Base Zone เพราะว่า บริเวณนี้จะได้รับความร้อนน้อยที่สุด จึงทำให้บริเวณ Base Zone เกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกน้อยที่สุด[24] ซึ่งต่างจาก บริเวณที่ Interface Zone ที่ได้รับผลกระทบความร้อนมากที่สุด และ ร่องลงมาคือ Heat Effect Zone แต่เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จ โลหะจะถูกเย็นตัวด้วยอากาศ เปรียบเสมือนกับการเย็นตัวอย่างช้า แบบ (Normalizing) จะทำให้ทำให้ชิ้นงาน มีความประและค่าความแข็งน้อยลง [25] ซึ่งสอดคล้องกับ สุริยา ประสมทอง, และคณะ [3] ได้กล่าวไว้ว่า ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานมีความแข็งของรอยเชื่อมต่ำกว่าโลหะฐานซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทาน

## 4.5 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

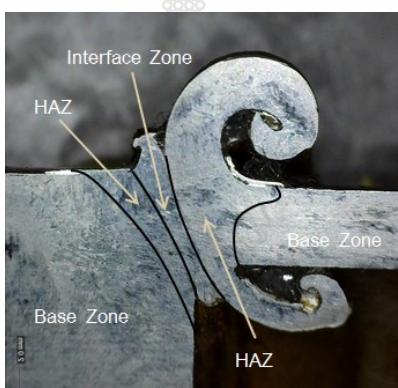
4.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค จากผลการทดสอบพบว่า ทุกตัวแปรของค่าความแข็งของการเชื่อมแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าการเชื่อมทิก ส่วนค่าแรงดึงของการเชื่อมแรงเสียดทานที่มีค่ามากกว่าการเชื่อมทิก มี 3 ตัวแปรคือ

ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $252.8 \text{ N/mm}^2$

ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $322.7 \text{ N/mm}^2$

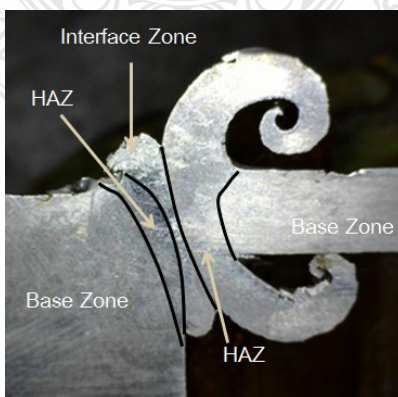
ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $421 \text{ N/mm}^2$

ดังนั้น จะทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคทั้ง 3 ตัวแปร ที่มีค่าความแข็งและค่าแรงดึงมีค่ามากกว่าการเชื่อมทิก ดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค รูปที่ 4.20 ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $252.8 \text{ N/mm}^2$  โดยมีระยะการยุบตัวของความยาววัสดุที่ 14.41 มม. ซึ่งจากรูปจะพบว่า เนื้อวัสดุบริเวณ Interface Zone จะมีลักษณะเป็นครีบขึ้นเล็กน้อย เกิดจากการกดอัดของวัสดุที่อุณหภูมิสูง



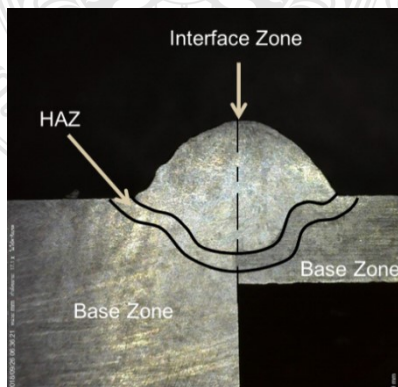
รูปที่ 4.21 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค รูปที่ 4.21 ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $322.7 \text{ N/mm}^2$  โดยมีระยะการยุบตัวของความยาววัสดุที่ 12.93 มม. โดยระยะการยุบตัวจะน้อยกว่าที่ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 4.21 จะพบว่า เนื้อวัสดุบริเวณ Interface Zone จะมีลักษณะเป็นครีบขึ้นเล็กน้อยเกิดจากการกดอัดของวัสดุที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.22 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงเสียดทาน ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค รูปที่ 4.22 ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $421 \text{ N/mm}^2$  โดยมีระยะการยุบตัวของความยาววัสดุที่ 16.58 มม. โดยระยะการยุบตัวมากที่สุดของทุกตัวแปร และเนื้อวัสดุบริเวณ Interface Zone จะมีลักษณะเป็นครีบที่ใหญ่มากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานได้รับแรงเสียดทานมากที่สุดจากการกดอัดและเวลาในการกดอัดที่สุด จึงทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงสุด และเมื่อได้รับแรงดันจึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดครีบมากกว่า ทุกตัวแปรที่ได้ทำการทดลอง



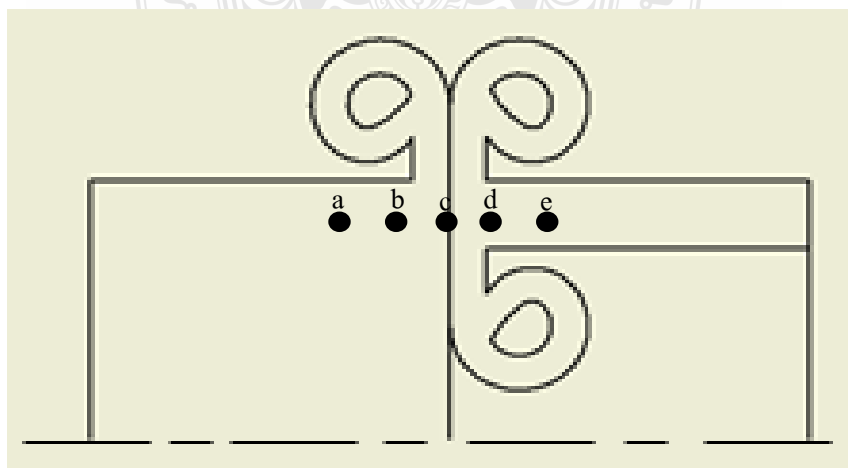
รูปที่ 4.23 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานการเชื่อมแรงทิก

จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค พบว่า เวลาและแรงดันในการอัดส่งผลต่อขนาด ความกว้างของรอยเชื่อม และขนาดความกว้างของบริเวณ Interface Zone จะแปรผันตามเมื่อเวลา และแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้น เพราะว่า เมื่อเพิ่มเวลาและแรงดันมากขึ้น ทำให้โลหะเกิดการหลอมละลาย มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มเวลาในมากขึ้น ทำให้โลหะเกิดแรงเสียดทานมากขึ้น จนเกิดความร้อนที่สูงขึ้น จนถึงจุดหลอมละลาย และแพร่กระจายความร้อนออกไปมากขึ้นในบริเวณด้านข้าง[9] และเมื่อได้รับ แรงกดอัดในขณะที่โลหะร้อนอยู่ ซึ่งเมื่อแรงกดอัดก็จะทำให้เนื้อโลหะเข้ามาประสานกัน และ เมื่อโลหะ ถูกดันเข้ามาประสานกัน จะทำให้เกิดการไหลของเนื้อโลหะออกทางด้านข้าง โดยแรงกดอัดที่สูงกว่า ก็ จะส่งผลให้เกิดเนื้อโลหะไหลออกสู่ด้านข้างมากกว่าแรงกดอัดที่น้อยกว่า และ เมื่อสังเกตจากโครงสร้าง มหภาคบริเวณ Interface Zone ที่โลหะทั้ง 2 ได้มาสัมผัสกัน ขนาดความหนาของพื้นที่ Interface Zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที จะมีขนาดที่น้อยกว่า ของ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที และ ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที เนื่องจาก บริเวณนั้นจะมีผลจากแรงกดอัดโดยตรง เพราะว่า เมื่อรับแรงกดอัดที่มาก เนื้อโลหะ และเม็ดเกรนก็จะถูกอัดให้แบนและเล็กลง และ ยังลดขนาดช่องว่างของขนาดเม็ดเกรน[24] จึงทำให้ ขนาดความหนาของพื้นที่ Interface Zone ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีขนาดน้อยที่สุด

4.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความแข็งและค่าแรงดึง ที่มีค่ามากที่สุด ในทั้งหมด 9 ตัวแปร คือ ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ 421 N/mm<sup>2</sup>

โดยจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และ นำมาเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมแรงเสียดทานและ การเชื่อมทิก

1) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ที่ความดัน 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที จากการ เชื่อมแรงเสียดทาน โดยจะตรวจสอบโครงสร้างทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ a. Base Zone of Shaft, b. HAZ of shaft, c. Interface Zone, d. HAZ of Pipe, e. Base Zone of Pipe ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 บริเวณ 5 ตำแหน่งที่ทดสอบโครงสร้างจุลภาค ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

จากรูปที่ 4.24 จะมีบริเวณทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ที่จะนำมาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 4.25



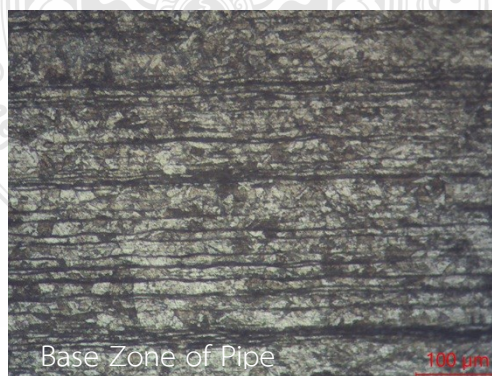
(a)

(b)



(c)

(d)

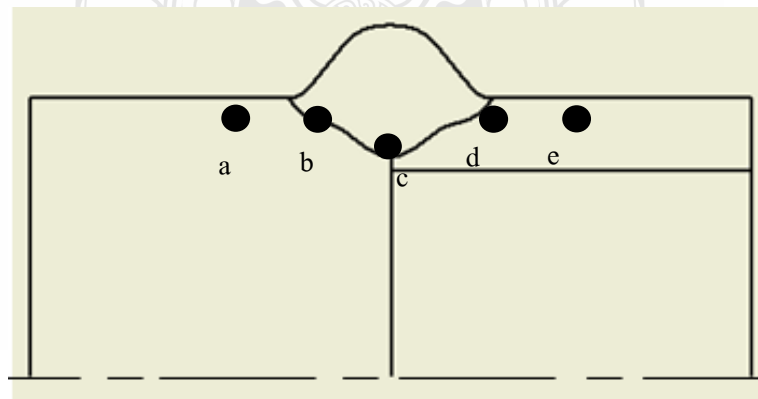


(e)

รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ความดัน 35 บาร์ 9 วินาที

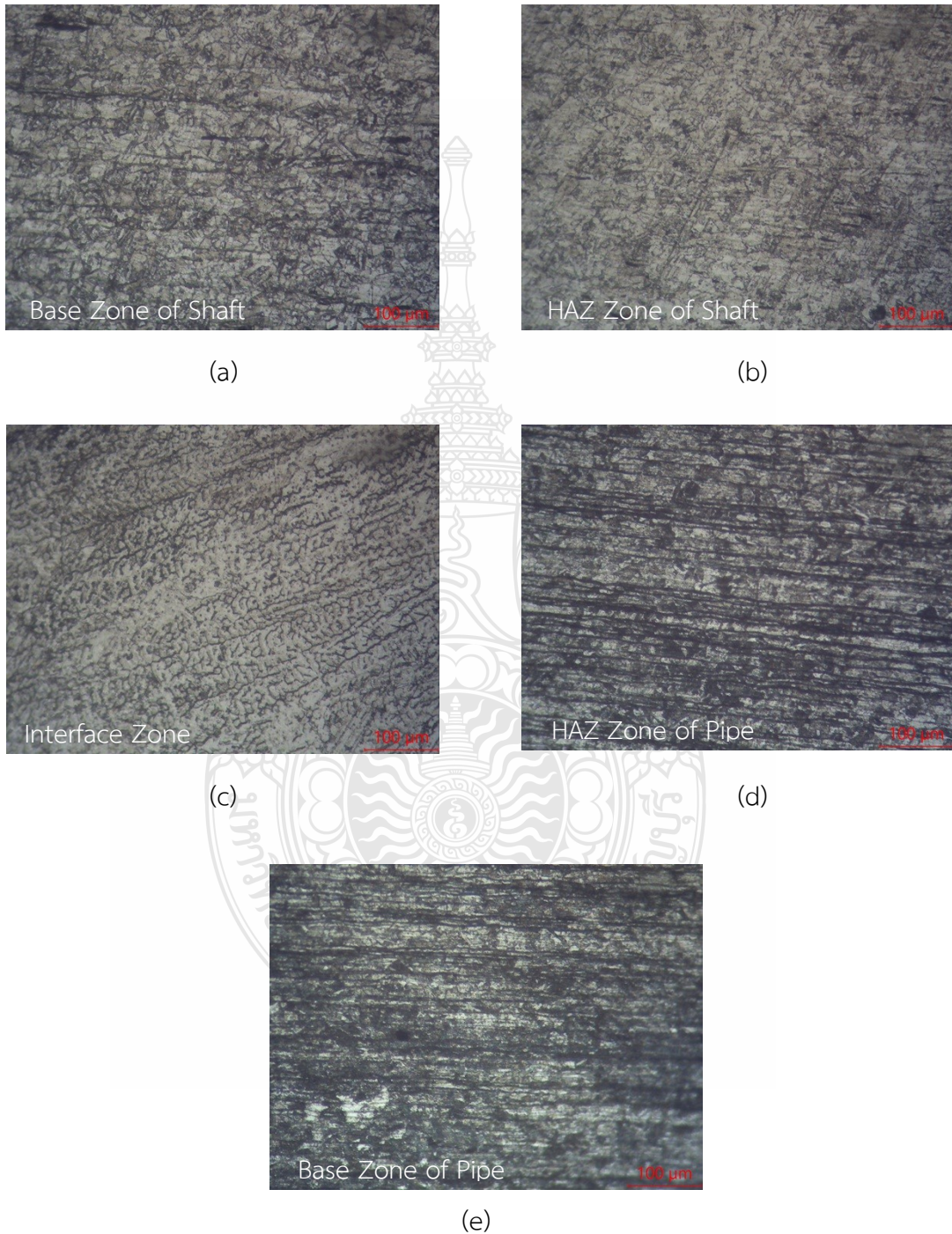
จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ที่ความดัน 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที จากการเชื่อมแรงเสียดทาน จากรูป (a) คือ บริเวณที่เป็น Base Zone ของฝั่งทางด้านเพลาดัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างกับบริเวณรูป (b) คือ บริเวณ Heat Effect Zone จะพบว่ารูป (a) ขนาดของเม็ดเกรนมีขนาดเล็กกว่าและขอบของเกรน (Grain Boundary) จัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ และ ช่องว่าง (Vacancy) ของเกรน หรือ อะตอมมีช่องว่างน้อยกว่า [26] รูป (b) เนื่องจากรูป (b) ได้รับผลกระทบ ร้อนมากกว่า บริเวณรูป (a) เมื่อได้รับผลกระทบร้อน อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นโอกาสการเกิดช่องว่างของ อะตอมก็จะมีมากขึ้น[26] และเมื่อถูกเย็นตัวด้วยอากาศ เปรียบเสมือนกับการเย็นตัวอย่างช้า แบบ (Normalizing) จะทำให้ช่องว่างของเกรนหรือ อะตอมมีช่องว่างมากขึ้น [25] และบริเวณรอยต่อระหว่าง ขอบเกรน จะเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของขอบเกรนขึ้น[26] และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูป (c) คือ บริเวณ Interface Zone จากรูปจะแตกต่าง เนื่องจาก เป็นบริเวณที่ ได้รับความร้อนสูง และได้รับแรงดันจากโลหะทั้ง 2 ชั้น มาดันชนกัน จึงทำให้โลหะที่หลอมละลาย ทำให้ อะตอมในโลหะของเหลววิ่งเข้าหากันและขยายตัวเป็นเดนไดรฟ์ [26] และ เมื่อได้รับแรงดัน ทำให้ ลักษณะของขอบเกรนมีลักษณะ เฝียงแบบทแยงมุม และพบว่าขนาดเม็ดเกรนจะมีขนาดใหญ่มากที่สุด ในทุกบริเวณเกิดจาก การเย็นตัวอย่างช้าแบบปกติ [25] โดยปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อย การ ขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากจึงทำให้โลหะมีเกรนขนาดใหญ่[27] จากรูป (d) และ (e) พบว่าลักษณะ ของขอบเกรนและเม็ดเกรนจะมีลักษณะ เส้นแนวนอน เนื่องจากจะเป็นโลหะในส่วนของฝั่งท่อ ซึ่งการ ขึ้นรูปของท่อจะใช้การขึ้นรูปแบบรีดขึ้นรูป จึงทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงหลังจาก การรีดขึ้นรูป ลักษณะของเกรนเป็นแนวนอนและเม็ดเกรนมีลักษณะแบน[28]

2) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การเชื่อมทิก โดยจะตรวจสอบโครงสร้างทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ a. Base Zone of Shaft, b. HAZ of shaft, c. Interface Zone, d. HAZ of Pipe e. Base Zone of Pipe ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 บริเวณ 5 ตำแหน่งที่ทดสอบโครงสร้างจุลภาคและ ของการเชื่อมทิก

จากรูปที่ 4.26 จะมีบริเวณทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ที่จะนำมาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 4.27

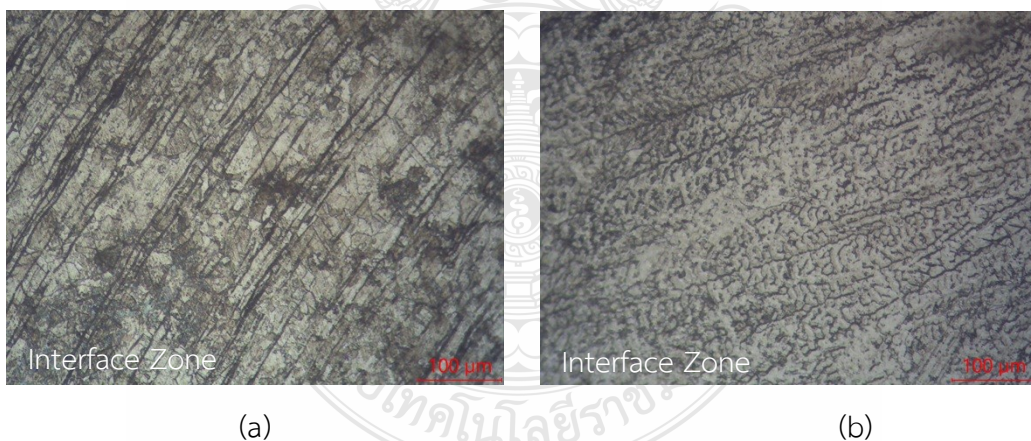


รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานการเชื่อมด้วยทิก



จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคการเชื่อมทิก จากรูป (a) คือ บริเวณที่เป็น Base Zone ของฝั่งทางด้านเพลตตัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างกับบริเวณรูป (b) คือ บริเวณ Heat Effect Zone จะพบว่ารูป (a) ขนาดของเม็ดเกรนมีขนาดเล็กกว่าและขอบของเกรน (Grain Boundary) จัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ และ ช่องว่าง(Vacancy) ของเกรน หรือ อะตอมมีช่องว่างน้อยกว่า [26] รูป (b) เนื่องจากรูป (b) ได้รับผลกระทบร้อนมากกว่า บริเวณรูป (a) และได้รับการหลอมละลาย และการเติมลวดเชื่อม(Fusion Line) เมื่อได้รับผลกระทบร้อน อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นโอกาสการเกิดช่องว่างของอะตอมก็จะมีมากขึ้น[26] และเมื่อถูกเย็นตัวด้วยอากาศ เปรียบเสมือนกับการเย็นตัวอย่างช้า แบบ (Normalizing) จะทำให้ช่องว่างของเกรนหรือ อะตอมมีช่องว่างมากขึ้น [25] และบริเวณรอยต่อระหว่างขอบเกรน จะเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของขอบเกรนขึ้น [26] และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูป (c) คือ บริเวณ Interface Zone จากรูปจะแตกต่าง เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูง และได้รับและได้รับหลอมละลาย และการเติมลวดเชื่อม(Fusion Line) มีลักษณะเป็นเดนไดร์ที่ละเอียด จากรูป (d) และ (e) พบว่าลักษณะของขอบเกรนและเม็ดเกรนจะมีลักษณะ เส้นแวนอน เนื่องจากจะเป็นโลหะในส่วนของฝั่งท่อ ซึ่งการขึ้นรูปของท่อจะใช้การขึ้นรูปแบบรีดขึ้นรูป จึงทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงหลังจากการรีดขึ้นรูป ลักษณะของเกรนเป็นเส้นแวนอนและเม็ดเกรนมีลักษณะแบน[28]

3) การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค Interface zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและงานเชื่อมทิก ดังรูปที่ 4.28 โดย a. Friction Welding, b. TIG Welding



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค Interface zone ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและงานเชื่อมทิก

ดังนั้น เมื่อนำโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และ การเชื่อมทิก มาเปรียบเทียบกับกัน พบว่า บริเวณที่เห็นความแตกต่างการชัดเจนคือ บริเวณของ Interface Zone เพราะ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะมีการอัดตัวสุ เมื่อขึ้นงานเกิดการความร้อนแล้วหลอมละลาย จึงทำให้เม็ดเกรดมีลักษณะเป็นเส้นทแยงที่เกิดจากการอัดระหว่างการเชื่อม ซึ่งการเชื่อมทิก จะเป็น

ลักษณะการเชื่อมแบบเติมลวด จึงทำให้เม็ดเกรด มีลักษณะแบบทิศทางที่แตกต่างกับการเชื่อมทิก และในลักษณะที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้สมบัติทางกล มีค่าที่แตกต่างกันออกไป

#### 4.6 การอภิปรายผล

จากการทดลองการเปรียบเทียบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและการเชื่อมทิก พบว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะใช้เวลาในการเชื่อมที่น้อยกว่า ตัวอย่างเช่น ที่ความดัน 35 บาร์ กดอัด 9 วินาที จะใช้เวลาในการเชื่อมทั้งหมด ประมาณ 30 วินาที โดยจะใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงาน 10 วินาที และ กดอัดชิ้นงาน ที่ 9 วินาที และเวลาในการเตรียมชิ้นงานประมาณ 10 วินาที ซึ่งการเชื่อมทิก จะใช้เวลาในการเชื่อมมากกว่า จะใช้เวลาในการเชื่อมประมาณ 3 นาที เพราะ ชิ้นงานต้องผ่านการกลึงลบคม 45 องศา เพื่อให้หน้าลวดเชื่อมซึมลึก และ ต้องทำการหมุนชิ้นงานก่อน 1 รอบ เพื่อเตรียมพร้อมในการเชื่อม โดยจะใช้เวลาในการเชื่อมประมาณ 35 วินาที สาเหตุที่การเชื่อมทิกใช้เวลามากกว่าการเชื่อมแรงเสียดทานเพราะ ชิ้นงานจะต้องมีการปาดมุมลบคม 45 องศา ทั้ง 2 ชิ้นงาน และพบว่า การเชื่อมแรงเสียดทานจะได้ผิวที่ดีกว่าการเชื่อมทิก โดยเมื่อนำมากลึงล้างครีบวัสดุหลังเชื่อมเสร็จ เพราะว่า ลักษณะการเชื่อมแรงเสียดทานจะหลอมละลายทั้งหน้าผิวสัมผัสที่ได้รับแรงเสียดทาน แต่การเชื่อมทิกจะหลอมละลายแค่บริเวณที่เติมลวดเชื่อมเท่านั้น และ เมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ทางด้านแรงดึง ความแข็ง พบว่า การเชื่อมแรงเสียดทานสามารถมีค่าแรงดึงและค่าความแข็งที่ดีกว่า เนื่องจาก การเชื่อมแรงเสียดทานเป็นลักษณะการทำให้โลหะทั้ง 2 ด้านหลอมละลายและกดอัดเข้าหากัน แบบเต็มหน้าผิวสัมผัส ต่างจากการเชื่อมทิก เป็นลักษณะ นำวัสดุ 2 ชิ้นมาวางชนกันแล้วใช้ลวดเชื่อมเป็นตัวประสานให้ติดกัน

การเชื่อมแรงเสียดทานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆได้เช่น การเชื่อมวาล์ว เนื่องจาก วาล์วรถยนต์จะมีขนาดที่แตกต่างกัน ถ้าเรานำวัสดุทรงกระบอกตัน แล้วนำมาขึ้นรูปให้ได้รูปร่างเป็นวาล์วเป็นวาล์วรถยนต์ จะพบว่า จะสิ้นเปลืองวัสดุสูง จึงได้มีการผลิตวาล์วรถยนต์ในรูปแบบ การใช้เชื่อมแรงเสียดทานเข้ามา โดยจะนำก้านวาล์วและ ตัวหัววาล์ว มาเชื่อมติดกัน และนำไปกลึงล้างรอยครีบออก และยังขึ้นส่วนอื่นๆที่สามารถนำการเชื่อมแรงเสียดทานนี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานหาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยเสียดทานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน 2,500 รอบต่อ นาที เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน โดยกดแช่ชิ้นงาน 10 วินาที เวลาในการกดอัด 5 วินาที 7 วินาที และ 9 วินาที ความดันที่ใช้ในการกดแช่ 20 บาร์ ความดันที่ใช้ในการกดอัด 25 บาร์, 30 บาร์, และ 35 บาร์ ตามลำดับ จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการทำโครงการ

5.1.1 การวัดขนาดของครีบก้นงาน พบว่าเมื่อความดัน และ เวลาในการกดอัดชิ้นงาน เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ ขนาดของรอยเชื่อมแปรผันมากขึ้น เพิ่มเวลาและความดันในการเชื่อมแรงเสียดทาน

5.1.2 การทดสอบแรงดึง พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ความดันและเวลาแตกต่างกัน พบว่า ที่ความดัน 35 บาร์ และเวลา 9 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุด เนื่องจาก การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้นจะมีความดันและเวลาส่งผลต่อการทดสอบแรงดึงโดยที่ความดัน 35 บาร์ และเวลา 9 วินาที จะทนต่อแรงดึงมากที่สุด และ ชิ้นงานที่ให้ค่าแรงดึงน้อยที่สุด คือ ตัวแปร ความดัน 25 บาร์ และเวลา 5 วินาที แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทิก พบว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ค่าทดสอบแรงดึงมากกว่าการเชื่อมทิก มี 3 ตัวแปร คือ ที่ความดัน 35 บาร์ เวลา 7 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ  $352.8 \text{ N/mm}^2$  , ความดัน 30 บาร์ เวลา 9 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ  $324.25 \text{ N/mm}^2$  และความดัน 35 บาร์ เวลา 9 วินาที ค่าแรงดึงเท่ากับ  $421.0 \text{ N/mm}^2$  และ ค่าเฉลี่ยแรงดึงของการเชื่อมทิก มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $322.5 \text{ N/mm}^2$

5.1.3 การทดสอบความแข็ง พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยทุกจุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากกว่ากระบวนการเชื่อมทิกทุกจุด โดยค่าที่สูงสุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน 35 บาร์ 9 วินาที ค่าความแข็งเท่ากับ 289.22 HV และค่าที่ต่ำที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน 25 บาร์ 5 วินาที ค่าความแข็ง 248.21 HV ค่าความแข็งของกระบวนการเชื่อมทิกเท่ากับ 229.1 HV

5.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค พบว่าทุกตัวแปรของค่าความแข็งของการเชื่อมแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าการเชื่อมทิก ส่วนค่าแรงดึงของการเชื่อมแรงเสียดทานที่มีค่ามากกว่าการเชื่อมทิก มี 3 ตัวแปรคือ ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 7 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $252.8 \text{ N/mm}^2$  , ความดันที่ 30 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $322.7 \text{ N/mm}^2$  , ความดันที่ 35 บาร์ เวลาที่ 9 วินาที มีค่าแรงดึงเท่ากับ  $421 \text{ N/mm}^2$  จากผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค พบว่า เวลาและแรงดันในการอัดส่งผลต่อขนาดความกว้างของรอยเชื่อม และขนาดความกว้างของ Interface Zone จะแปรผันตามเมื่อเวลาและแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้น

5.1.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เมื่อนำโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการเชื่อมทิก มาเปรียบเทียบกับ พบว่า บริเวณที่เห็นความแตกต่างชัดเจนคือ บริเวณของ Interface Zone เพราะ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะมีการอัดวัสดุ เมื่อขึ้นงานเกิดการความร้อนแล้ว หลอมละลาย จึงทำให้เม็ดเกรนมีลักษณะเป็นเส้นทแยงที่เกิดจากการอัดระหว่างการเชื่อม ซึ่งการเชื่อมทิก จะเป็นลักษณะการเชื่อมแบบเติมลวด จึงทำให้เม็ดเกรน มีลักษณะแบบทิศทางที่แตกต่างกับการเชื่อมทิก และ ในลักษณะที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้สมบัติทางกล มีค่าที่แตกต่างกันออกไป

## 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ

5.2.1 ขึ้นงานหมุนตามหัวจับขณะเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

5.2.2 ศูนย์ของหัวจับเครื่องลึงกับหัวจับไฮดรอลิก ไม่ได้ตำแหน่งศูนย์กลาง

5.2.3 ขึ้นงานมีขนาดใหญ่ ทำให้ระบบไฮดรอลิกรั่ว เพราะต้องใช้แรงกดอัดมาก

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การเลื่อยขึ้นงานด้วยเครื่องมือโคโรคัตเตอร์ควรค่อยๆ กดใบตัดเพราะจะทำให้ใบตัด สิ้นเปลืองจำนวนมาก และอาจทำให้ใบตัดแตกได้

5.3.2 ก่อนทำการเชื่อมขึ้นงานควรมีการใช้ทดสอบ เช็คความเยื้องศูนย์ขอเครื่องก่อนเพื่อให้ ขึ้นงานที่เชื่อมออกมาได้ความเที่ยงตรง

5.3.3 การเตรียมขึ้นงานทดสอบความแข็งควรตรวจสอบขนาดปากกาของเครื่องทดสอบว่ามี ขนาดเท่าไรแล้วจึงเตรียมขนาดขึ้นงานทดสอบให้มีความเหมาะสม

## บรรณานุกรม

- [1] M.Kimura, K.Suzukib1, M.Kusakaa, K.Kaizua. (2017). **Effect of friction welding condition on joining phenomena, tensile strength, and bend ductility of friction welded joint between pure aluminium and AISI 304 stainless steel.** In The Journal of Manufacturing Processes. Elsevier. V.25. (pp.116-125). USA: S. Kapoor
- [2] E.Bouarroudja, S.Chikhb, S.Abdia D.Miroud. (2017). **Thermal analysis during a rotational friction welding.** In The Applied Thermal Engineering. Elsevier. V.110. (pp.1543-1553). The Applied Thermal Engineering. Hong Kong: T. S. Zhao
- [3] สุรียา ประสมทอง, และคณะ. (2556). **การวิเคราะห์กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง.** (วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [4] สุทัศน์ ชมชิต และคณะ. (2556). **การวิเคราะห์กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง.** (วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [5] สุรสิงห์ อารยางค์กูร, และคณะ. (2551). **การเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน.** (วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี).
- [6] ชวงชัย ชูปวา, และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. (2554). **อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและ ความเร็วในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อม เสียดทาน.** (วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี).
- [7] จักรินทร์ คงสิบ. (2555). **อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วย แรงเสียดทาน.** (วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์)
- [8] Sahin Mumin. (2547). **Simulation of friction welding using a developed computer program.** Department of Mechanical Engineering, Trakya University.
- [10] Shielded Metal Arc Welding. (3 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <http://www.Advantagefabricatedmetals.co.th>
- [11] การเชื่อมทิก, (3 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/การเชื่อมทิก>.
- [12] การเชื่อมโลหะแบบทิก, (3 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <http://www.jasichthailand.com>.
- [13] การเชื่อมโลหะด้วยวิธีTIG, (21 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : [www.meeboard.com/users/weld/imgupload](http://www.meeboard.com/users/weld/imgupload)
- [14] ณรงค์ ต้นชีวะวงศ์. (2539). **ระบบไฮดรอลิก.** กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [15] วงจรไฮดรอลิก, (21 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <http://webdee.8m.com>.
- [16] เหล็กกล้าไร้สนิม, (21 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : [www.thummech.com](http://www.thummech.com)

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] Sammak. Microhardness, (21 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <http://host.psu.ac.th>.
- [18] การทดสอบแรงดึงของโลหะ, (23 พฤศจิกายน 2560) สืบค้นจาก : <https://www.mtec.or.th>.
- [19] มานะ ตันตระกูล. (2546). **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : ทีเอสบี โปรดักส์
- [20] ข้อมูลเกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์, (9 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
<https://sites.google.com/a/longwittaya.ac.th/sing-lek-kab-klxngculthrrsn/>
- [21] Grain Size Effect, (9 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
<http://evilaum.blogspot.com/2006/11/grain-size-effect.html>
- [21] ระบบและโครงสร้างผลึก, (9 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
<https://sites.google.com/site/sutinsorattaworn/bth-thi-7-rabb-aea-khorngrang-phluk>
- [22] บทที่ 5 กลไกความแข็งแรงของโลหะ, (16 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก : [app.eng.ubu.ac.th](http://app.eng.ubu.ac.th)
- [23] ขนาดเกรนกับช่วงเวลาทำความเย็น, (16 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
[https://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic](https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic)
- [24] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์ และนภาพร กลิ่นประชา. (2553). **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : เซนเกจ เลิร์นนิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด.
- [25] การอบชุบทางความร้อนโลหะ, (16 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
[http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Full\\_Annealing.html](http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Full_Annealing.html)
- [26] ขวลิต เชียงกุล. (2547). **โลหะวิทยา**. กรุงเทพฯ : กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [27] จงกล รัตสุข. (2525). **โลหะวิทยาเบื้องต้น และวัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [28] กรรมวิธีการผลิต, (22 ธันวาคม 2560) สืบค้นจาก :  
<https://sites.google.com/site/krrmwithikarphlitt/>

ภาคผนวก ก  
ผลการทำ Pre-Test





รูปที่ ก.1 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แซ่ 20 บาร์ ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 3 วินาที



รูปที่ ก.2 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แซ่ 20 บาร์ ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 3 วินาที





รูปที่ ก.3 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 3 วินาที



รูปที่ ก.4 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่ก  
แซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 5 วินาที



รูปที่ ก.5 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 7 วินาที



รูปที่ ก.6 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 9 วินาที



รูปที่ ก.7 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แช่ 20 บาร์ กดแช่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 11 วินาที



รูปที่ ก.8 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แช่ 20 บาร์ กดแช่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 5 วินาที



รูปที่ ก.9 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กด  
แช่ 20 บาร์ กดแช่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 7 วินาที



รูปที่ ก.10 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่  
กดแช่ 20 บาร์ กดแช่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 20 บาร์และกดอัดเวลา 9 วินาที



รูปที่ ก.11 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กดแซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 40 บาร์และกดอัดเวลา 5 วินาที



รูปที่ ก.12 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กดแซ่ 20 บาร์ กดแซ่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 40 บาร์และกดอัดเวลา 7 วินาที



รูปที่ ก.13 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันที่กดแช่ 20 บาร์ กดแช่ 10 วินาที ความดันที่กดอัด 40 บาร์และกดอัดเวลา 9 วินาที



ภาคผนวก ข  
ชิ้นงานทดสอบ





รูปที่ ข.1 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 25 บาร์ ที่เวลา 5 วินาที



รูปที่ ข.2 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที ความดันที่กดอัด 25 บาร์ ที่เวลา 7 วินาที





รูปที่ ข.3 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที ความดันที่กดอัด 25 บาร์ ที่เวลา 9 วินาที



รูปที่ ข.4 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 30 บาร์ ที่เวลา 5 วินาที



รูปที่ ข.5 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แช่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 30 บาร์ ที่เวลา 7 วินาที



รูปที่ ข.6 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แช่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 30 บาร์ ที่เวลา 9 วินาที



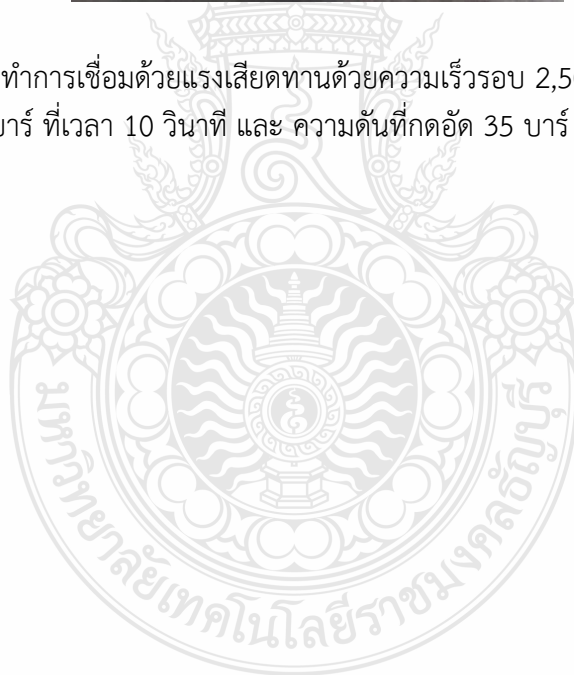
รูปที่ ข.7 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 35 บาร์ ที่เวลา 5 วินาที



รูปที่ ข.8 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แซ่ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 35 บาร์ ที่เวลา 7 วินาที



รูปที่ ข.9 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที ความดันกด  
แฉะ 20 บาร์ ที่เวลา 10 วินาที และ ความดันที่กดอัด 35 บาร์ ที่เวลา 9 วินาที



ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบแรงดึง



ตาราง ค.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ชั้นงาน		แรงดึงสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )			ค่าเฉลี่ยแรงดึง (N/mm <sup>2</sup> )
ความดัน (บาร์)	เวลา(วินาที)	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
25	5	228.26	226.36	235.08	230
	7	265.16	267.23	258.08	263
	9	295.85	298.23	291.81	295
30	5	267.90	261.00	270.17	266
	7	307.51	301.99	299.93	303
	9	321.78	319.87	329.36	324
35	5	309.00	303.21	297.80	303
	7	359.52	350.97	347.83	353
	9	416.10	425.23	421.74	421

ตาราง ค.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ของการเชื่อมทิก

แรงดึงสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )			ค่าเฉลี่ยแรงดึง (N/mm <sup>2</sup> )
ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
320.54	322.16	324.21	322

ภาคผนวก ง  
ผลการทดสอบความแข็ง



ตาราง ง.1 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 25 บาร์ 5 วินาที

ครั้งที่ ระยะ(mm.)		1	2	3
		-10	250.2	258.4
ค่าความแข็ง HV	-8	256.7	243.6	245.9
	-6	247.4	250.6	241.9
	-4	250.9	250.8	248.3
	-2	246.2	239.1	243.5
	-0	243.2	239.1	248.4
	0	241.5	249.1	241.1
	+0	240.5	245.3	244.3
	2	245.3	252.5	248.1
	4	248.9	256.1	244.2
	6	250.5	253.8	249.9
	8	250.2	248.9	251.3
	10	258.2	250.1	252.7

ตาราง ง.2 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 25 บาร์ 7 วินาที

ครั้งที่ ระยะ(mm.)		1	2	3
		-10	253.8	261.1
ค่าความแข็ง HV	-8	255.6	245.9	249.7
	-6	248.1	241.1	246.1
	-4	261.7	265.1	259.2
	-2	250.4	255.8	252.6
	-0	250.7	254.1	245.0
	0	240.5	244.1	248.6
	+0	247.2	250.0	246.2
	2	255.1	249.4	250.1
	4	261.3	251.5	254.4
	6	263.7	260.8	265.8
	8	253.6	250.2	260.8
	10	263.5	258.7	259.9



ตาราง ง.3 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 25 บาร์ 9 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		263.5	255.1	258.1
	-8		258.1	252.9	254.8
	-6		269.1	250.9	261.8
	-4		261.5	258.2	269.1
	-2		252.1	260.6	262.6
	-0		252.6	259.3	249.8
	0		250.4	250.1	256.5
	+0		260.7	255.2	255.1
	2		260.2	254.6	265.2
	4		267.5	260.6	264.1
	6		271.7	270.1	267.3
	8		268.5	270.4	260.1
	10		263.5	258.1	268.1

ตาราง ง.4 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 30 บาร์ 5 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		259.6	270.4	265.3
	-8		267.2	261.5	270.2
	-6		260.6	253.5	255.5
	-4		266.2	252.2	260.3
	-2		266.5	266.4	255.6
	-0		250.1	254.6	248.2
	0		249.0	248.2	251.2
	+0		254.2	245.6	250.4
	2		257.2	254.3	248.8
	4		264.5	255.4	257.4
	6		257.3	249.6	257.5
	8		265.3	260.5	255.6
	10		268.2	268.7	258.5

ตาราง ง.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 30 บาร์ 7 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		274.1	278.5	274.5
	-8		260.2	278.3	275.6
	-6		270.1	265.5	279.2
	-4		277.2	265.4	266.9
	-2		259.7	259.1	268.5
	-0		259.6	267.2	249.9
	0		250.2	250.8	255.5
	+0		260.8	267.6	261.5
	2		268.8	259.5	270.5
	4		270.9	269.5	265.9
	6		277.9	270.3	264.1
	8		261.9	264.5	274.6
	10		271.1	272.5	267.4

ตาราง ง.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 30 บาร์ 9 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		265.1	276.1	270.1
	-8		270.1	265.5	265.5
	-6		276.9	280.5	264.1
	-4		273.1	260.7	280.6
	-2		275.6	271.4	266.8
	-0		265.3	271.2	265.7
	0		263.1	263.4	270.5
	+0		275.6	269.3	268.6
	2		274.3	267.1	269.7
	4		275.0	275.4	273.9
	6		270.6	280.9	275.6
	8		265.3	255.9	279.6
	10		270.6	279.8	269.5

ตาราง ง.7 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 35 บาร์ 5 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		276.3	280.5	278.1
	-8		275.9	275.1	270.5
	-6		269.4	276.5	271.9
	-4		265.9	273.1	268.6
	-2		260.5	265.8	264.8
	-0		255.6	259.2	255.9
	0		255.6	254.3	265.6
	+0		250.3	260.4	270.5
	2		265.0	274.2	258.4
	4		266.2	274.6	260.8
	6		270.5	275.1	272.8
	8		271.6	278.6	270.1
	10		275.4	285.6	280.6

ตาราง ง.8 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 35 บาร์ 7 วินาที

		ครั้งที่	1	2	3
		ระยะ(mm.)			
ค่าความแข็ง HV	-10		280.3	275.8	289.5
	-8		276.3	291.6	261.6
	-6		285.5	278.1	264.9
	-4		287.7	268.9	275.1
	-2		279.1	270.1	272.5
	-0		272.4	280.5	273.4
	0		275.0	274.9	280.1
	+0		271.6	269.3	286.7
	2		279.6	275.0	285.1
	4		280.2	276.5	284.5
	6		275.9	280.5	283.1
	8		280.6	275.5	287.5
	10		286.3	281.6	290.6

ตาราง ง.9 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยแรงเสียดทาน 35 บาร์ 9 วินาที

ครั้งที่ ระยะ(mm.)		1	2	3
		-10	294.1	285.6
	-8	290.5	287.8	300.7
	-6	285.6	290.5	296.5
	-4	286.0	292.2	296.1
	-2	280.6	289.1	282.9
ค่าความแข็ง HV	-0	275.3	283.1	280.6
	0	270.8	275.3	285.6
	+0	272.9	280.6	290.1
	2	280.5	289.4	290.2
	4	282.6	292.3	287.3
	6	285.1	290.6	295.8
	8	291.3	295.4	297.6
	10	295.1	284.6	301.5

ตาราง ง.10 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการเชื่อมทิก

ครั้งที่ ระยะ(mm.)		1	2	3
		-10	267.3	266.7
	-8	256.9	253.2	254.6
	-6	244.1	240.4	238.4
	-4	235.4	230.9	236.5
	-2	211.1	212.4	209.3
ค่าความแข็ง HV	-0	189.2	206.3	201.4
	0	197.8	204.1	201.7
	+0	202.6	198.7	203.5
	2	212.3	214.5	216.8
	4	234.5	237.1	230.4
	6	245.6	243.8	239.3
	8	251.8	254.2	248.1
	10	261.8	258.6	365.4



## ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายธีรพล เกษตรสิน
วัน เดือน ปีเกิด	14 พฤศจิกายน 2535
ที่อยู่	81/43 หมู่ 1 หมู่บ้าน เดอะแพลนท์ ตำบล รังสิต อำเภอ ัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมอุตสาหการ-การผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	พนักงาน บริษัท แม็กเทค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2560
เบอร์โทรศัพท์	084-6782256
อีเมล	tirapon_k@mail.rmutt.ac.th

