

บทที่ 1

บทนำ

มนุษย์เริ่มรู้จักการเชื่อมครั้งแรกในต้นศตวรรษที่ 19 และได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน ซึ่งได้นำการเชื่อมมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมายทั้งทางด้านการซ่อมบำรุงการตัดต่อชิ้นงานและอื่นๆ อีกมากมาย การเชื่อมเป็นที่นิยมกันมากอย่างแพร่หลาย คือ การเชื่อมแก๊ส การเชื่อมไฟฟ้า เป็นต้น ในการเชื่อมสิ่งเหล่านี้ล้วนแต่ใช้ตัวประสานในการเชื่อม ส่วนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานก็เป็นการเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง ด้วยหลักการทฤษฎีของแรงเสียดทาน คือ เมื่อวางวัตถุที่มีน้ำหนักวางบนพื้นราบแล้วเมื่อมีแรงมาผลักวัตถุให้เคลื่อนที่ จะเกิดแรงเสียดทานในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงผลัก จากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานทำให้วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการหลอมติดกัน จากทฤษฎีดังกล่าว จึงได้นำหลักการมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุทองแดงทองเหลืองและอลูมิเนียมด้วยแรงเสียดทานและมีการควบคุม ขนาดของแรงในสภาวะต่างๆ

1.1 แนวคิดหรือที่มาของโครงการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ทันสมัยมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การเชื่อมก็เป็นอีกส่วนหนึ่งของงานอุตสาหกรรมที่เป็นที่แพร่หลาย คือ การเชื่อมด้วยแก๊สและการเชื่อมไฟฟ้าแต่การเชื่อมก็ไม่ได้มีเพียงสองอย่างนี้เท่านั้นยังมีการเชื่อมแบบอื่นๆอีกมากมายโดยในลักษณะต่างๆไปการเชื่อมชิ้นงานต่างๆ จะต้องมีลวดเชื่อมหรือตัวประสานในการเชื่อมและยังต้องใช้ลวดเชื่อมหรือตัวประสานให้เหมาะสมกับประเภทของวัสดุที่นำมาเชื่อมด้วย แนนอนเทคโนโลยีการเชื่อมเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญเป็นที่นิยมนอย่างมากในแวดวงอุตสาหกรรมในประเทศไทย และประเทศที่กำลังพัฒนา

การเชื่อมโลหะ (Metal Welding) คือ ขบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุให้รวมตัวเข้าด้วยกันปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรงบางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อนเพื่อให้เกิดรอยเชื่อมในการเชื่อมนั้นจะมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรอย่างหนึ่งในการหลอมละลายของเนื้อวัสดุเข้าด้วยกันและต้องใช้ลวดเชื่อมเป็นตัวแปรในการเชื่อมต่อกัน ซึ่งเกิดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ขึ้นมา กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) นั้นจะสามารถลดต้นทุนส่วนนี้ได้ ทั้งนี้ในปัจจุบันการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมไทยมากขึ้นเรื่อยๆ

ดังนั้นนักวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการทดลองเชื่อมโลหะโดยแรงเสียดทาน (Friction Welding) กับวัสดุทองแดงมาตรฐาน JIS H3300 เกรด C1220T-H ทองเหลืองเกรด C3064 และ อลูมิเนียมเกรด C6031 เพราะกำลังเป็นที่นิยมในท้องตลาด โดยใช้แรงดัน ชนิดของวัสดุ และระยะเวลาในการกดแช่เป็นตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยการให้แรงขนาดต่างๆกันในการเชื่อมวัสดุแต่ละชนิด แทนการให้ความร้อน และระยะเวลาในการกดแช่จะต้องสัมพันธ์กับแรงด้วย ซึ่งจะทำให้การทดลองในสภาวะอุณหภูมิปกติ โดยใช้วัสดุทรงตันในการทดลอง ผลการทดลองจะนำวัสดุที่ผ่านการเชื่อมไปตรวจสอบรอยเชื่อม และตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุในด้านความต้านทานแรงดึง แล้วจะนำผลการทดลองไปศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาขนาดของแรงและระยะเวลาในการกดแช่ที่เหมาะสมที่จะทำให้วัสดุยึดติดกันโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding)

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของ ทองแดง ทองเหลืองและ อลูมิเนียม ในด้านการต้านทานแรงดึงและการทดสอบความแข็งแรงของผิวแนวเชื่อม

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาในการเชื่อมติดกันของทองแดง ทองเหลืองและ อลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 วัสดุทองแดงมาตรฐาน JIS H3300 เกรด C1220T-H มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ค่า พิกัดความเผื่อ ± 0.03 mm. ขนาดความยาว 40 mm.

1.3.2 วัสดุทองเหลือง เกรด C3064ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 10mm. ค่า พิกัดความเผื่อ ± 0.03 mm. ขนาดความยาว 40 mm.

1.3.3 วัสดุอลูมิเนียม เกรด C6031 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10mm. ค่า พิกัดความเผื่อ ± 0.03 mm. ขนาดความยาว 40 mm.

1.3.4 จะทำการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง และ อลูมิเนียมกับทองแดง ในแรงดันต่างๆ

1.3.5 ใช้แรงดันและระยะเวลาในการกดแช่เป็นตัวแปรในการเชื่อมติดกัน

1.3.6 ตรวจสอบผิวแนวเชื่อมระดับมาโคร ระหว่างทองแดง ทองเหลือง และอะลูมิเนียม

1.3.7 ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

1.3.8 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในการยึดติดกันของวัสดุด้วยแรงเสียดทาน

1.3.9 ทดสอบความแข็งแรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจหลักการเชื่อมวัสดุด้วยแรงเสียดทานเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1.4.2 สามารถหาขนาดของแรงและระยะเวลาในการกดแซ่ที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของวัสดุต่างชนิดได้

1.4.3 สามารถทราบได้ถึงคุณสมบัติเชิงกลในด้านการต้านทานแรงดึง

1.4.4 สามารถวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะในการเชื่อมติดกันของวัสดุด้วยแรงเสียดทานได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะและอโลหะโดยคุณสมบัติทางกลไม่เปลี่ยนแปลงการเชื่อมด้วยวิธีอื่นไม่สามารถเชื่อมได้เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวจึงทำให้การเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้จากข้อที่เห็นได้ชัด คือ อุณหภูมิที่หลอมละลายในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมโลหะต่างๆ สามารถทำการเชื่อมได้สะดวกยิ่งขึ้น การเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากแบบ (Mass product) และสามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องทำน้ำอุ่นและงานประเภทเครื่องทำความเย็นได้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เชษฐา สุเพ็งคำ และคณะ [1] เครื่องเชื่อมแรงเสียดทานหลักการทำงานของเครื่องจะอาศัยแรงเสียดทานของชิ้นงานเป็นแรงโดยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีการสัมผัสกับผิวใดๆ ที่มีความฝืดและมีแนวโน้มจะขยับเคลื่อนที่ ดังเช่น การนำวัตถุที่มีน้ำหนักเบาวางบนพื้นราบแล้วมีแรงมากระทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แรงเสียดทานก็จะเกิดในทิศทางตรงข้ามกับแรงที่กระทำแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ทฤษฎี หลักการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแรงเสียดทานนำชิ้นงานงานไปใส่ไว้ในหัวจับทั้งสองข้างเมื่อทำการเดินเครื่องมอเตอร์ก็จะหมุนหัวจับให้ชิ้นงานหมุน ส่วนอีกชิ้นก็จะถูกเลื่อนเข้ามากดโดยชุดไฮดรอลิกและเมื่อชิ้นงานทั้งสองชิ้นสัมผัสกันก็จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานทั้งสองชิ้นแล้วก็จะร้อนขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดหลอมเหลวชิ้นงานทั้งสองชิ้นก็จะหลอมติดเข้าด้วยกัน ดังนั้นแนวเชื่อมที่ดีจะต้องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ปริมาณความร้อน ค่าการนำความร้อนของวัสดุ และคุณสมบัติทางกลที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของวัสดุงาน นั้นหมายถึง การควบคุมความเร็ว และแรงกดอัดในขณะที่เชื่อมซึ่งเป็นผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกันไป

ชลิตต์ มธุรสมนตรี และ คณะ [2] กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน คือกระบวนการเชื่อมชิ้นงานใช้ติดกันโดยอาศัยหลักการของแรงเสียดทาน ซึ่งสามารถเชื่อมชิ้นงานให้ติดกันได้ทั่วหน้าสัมผัส และรอยเชื่อมมีความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด หลักการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น ตัวเครื่องจะมีหัวจับชิ้นงานอยู่ 2 ข้างตรงข้ามกัน หัวจับด้านหนึ่งต่อเข้ากับมอเตอร์ และหัวจับด้านหนึ่งต่อเข้ากับกระบอกไฮดรอลิกส์ จะเริ่มต้นด้วยการนำชิ้นงานที่

ต้องการจะเชื่อมไปยึดให้แน่นด้วยหัวจับ ทั้ง 2 ข้าง เลื่อนให้ชิ้นงานเกิดการสัมผัสกันเล็กน้อย แล้วเริ่มเดินมอเตอร์ แล้วเริ่มให้ระบบไฮดรอลิกส์อัดชิ้นงานเข้าด้วยกัน จะเกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนจนเวลาที่เหมาะสมจึงหยุดเดินมอเตอร์ พร้อมทั้งอัดชิ้นงานเข้าด้วยกัน จะได้ชิ้นงานที่ติดกัน

มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร และคณะ [3] การเคลื่อนไหวยของแรงเสียดทานในการเชื่อมโลหะหรือกระบวนการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทาน(Friction Stir Welding)เป็นการเชื่อมโลหะที่เป็นสถานการณ์สามารถเชื่อมวัสดุได้หลากหลายชนิด ปัจจุบันเป็นขบวนการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุดของ วิธีการเชื่อมโลหะแบบใหม่ มั่นอุกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อให้สามารถเชื่อมโลหะได้ในวิธีการที่ง่าย ซึ่งในจำนวนของวัสดุที่มีก่อนหน้านี้เกิดปัญหาในการเชื่อมที่ยากลำบากมาก โดยที่ในระหว่างการเชื่อมไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยแตกร้าว หรือ การเปลี่ยนรูปของโลหะ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะเป็นขบวนการเชื่อมอีกแบบหนึ่ง ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมนั้น จะเกิดจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานกลจากการเสียดสีของชิ้นงาน เป็นพลังงานความร้อนโดยไม่มีพลังงานไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้างานสัมผัสของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับที่ส่วนอีกชิ้นจะหมุน และจะเพิ่มแรงดันชิ้นงานอยู่นิ่งกับที่ให้สัมผัสกับชิ้นที่หมุนอย่างสม่ำเสมอ จนเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถทำการเชื่อมได้ จึงหยุดหมุนและเสร็จสิ้นกระบวนการเชื่อมอย่างสมบูรณ์

Sahin, A.Z. และคณะ [4] ได้ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยทำการทดลองเชื่อมวัสดุแท่งทองแดงกลับเหล็กที่สภาวะความเร็ว และเวลาการเชื่อมแตกต่างกัน ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ความแข็ง ซึ่งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิด Heat-affected Zone สูง

Muemin Sahin [5] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานกับวัสดุเครื่องมือ คือ High-Speed Steel (HSS—S 6-5-2) กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (AISI 1040) เพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมวัสดุนี้ โดยเปรียบเทียบจากการทดสอบแรงดึง ความล้า การทดสอบแรงกระแทก และความแข็ง ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการเพิ่มความแข็งแรง และความล้า คือ เวลาในการเชื่อม และความดัน

Seli, H. และคณะ [6] ได้ศึกษาสภาวะการนำความร้อนในการเชื่อมความเสียดทานของวัสดุแท่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ กับวัสดุอลูมิเนียม การเปรียบเทียบอุณหภูมินั้นได้ทำการทดสอบความแข็งแรงเชื่อม และการทดสอบแรงดึง ผลการทดลองสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี

Yilba, B.S. และคณะ [7] ทำการศึกษาการเชื่อมความเสียดทานของเหล็กกับอลูมิเนียม และอลูมิเนียมกับทองแดง โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของความเร็วรอบ ระยะเวลาการกด และแรงการกด จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความเค้นจุดคราก ความแข็งแรงสูงสุด และ

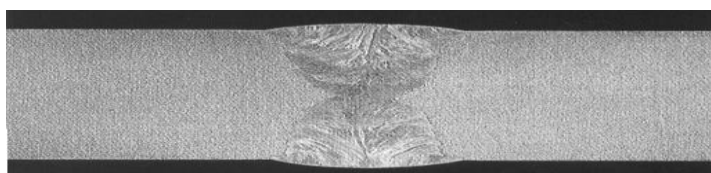
ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้อง Electron และ Optical microscopy การศึกษาพบว่าตัวแปรที่สำคัญในการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือความเร็วรอบในการหมุน ไม่จะเป็นการเชื่อมของเหล็กกับ อลูมิเนียม หรืออลูมิเนียมกับทองแดงก็ตาม จะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

2.2 กระบวนการเชื่อม

การเชื่อมโลหะ (welding) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะให้ติดกันโดยการให้ความร้อนหรือแรงกด หรือทั้งความร้อนและแรงกดร่วมกันแก่บริเวณเชื่อมจนกระทั่งโลหะนั้นติดกันเป็นชิ้นเดียวกันการเชื่อมโลหะเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากต่อการพัฒนาผลผลิตขั้นสุดท้าย ช่วยในการลดต้นทุน และช่วยในการดัดแปลงแต่งเติม ทั้งการประกอบรูปร่างของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน สาเหตุที่การเชื่อมโลหะควรมีการพัฒนาเนื่องจากการเชื่อมโลหะมีมากมายหลายวิธี และง่ายต่อการเชื่อม สามารถเชื่อมโลหะที่มีขนาดเล็กและใหญ่ได้ โดยเฉพาะโลหะขนาดเล็ก ๆ ประกอบเป็นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ความเสียหายจากการเชื่อมจะเกิดเฉพาะจุด คือบริเวณที่มีการเชื่อมเท่านั้น ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นอาจได้จากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานคลื่นเสียง หรือพลังงานแสงขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกันไป หากจะแบ่งประเภทของการเชื่อมโลหะนั้นอาจแบ่งได้ดังนี้ [1]

2.2.1 กระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding Processes)

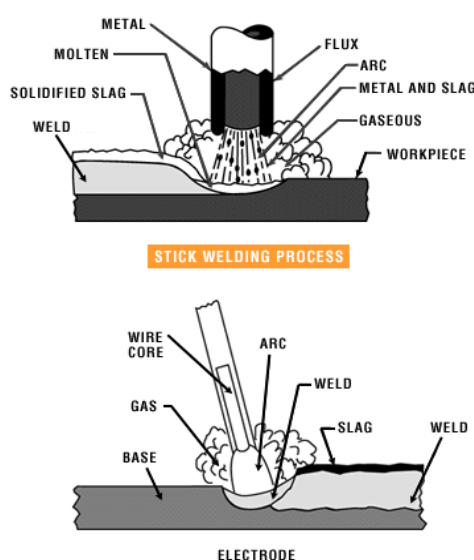
เป็นกระบวนการต่อโลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้วิธีการให้ความร้อนกับโลหะชิ้นงานจนหลอมละลายประสานเป็นเนื้อเดียวกันและติดกัน ขณะที่หลอมละลายอาจเติมตัวประสานลงไปหรือใช้เนื้อโลหะเป็นตัวประสานกันเองก็ได้ ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานจนหลอมละลายนั้นต้องมีความเหมาะสมกับชิ้นงานชนิดนั้นๆ ไม่น้อยและไม่มากเกินไป ปกติจะแปรผันตรงตามความหนาของชิ้นงาน คือชิ้นงานที่มีความหนามากจะให้ความร้อนมากเพื่อหลอมละลายชิ้นงานให้ติดกันและมีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งาน ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาหลายๆ จำเป็นต้องบากหน้าชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม เพื่อให้บริเวณรอยต่อหลอมละลายโดยทั่วถึงตลอด ในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายมีด้วยกันหลายวิธี ในการเลือกใช้งานต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของรอยต่อ และความเหมาะสม ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบหลอมละลาย [2]

1.) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

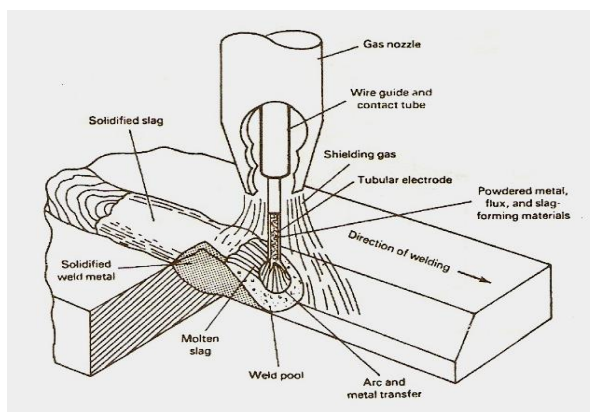
เป็นการต่อโลหะให้ติดกันโดยใช้ความร้อนจากการอาร์คระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ความร้อนที่ได้ประมาณ $5,000^{\circ}\text{C}$ เพื่อหลอมละลายโลหะให้ติดกัน โดยแกนลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นโลหะเติมลงไป ในแนวเชื่อมส่วนฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมจะหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อม ไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่หลอมละลาย เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวลงฟลักซ์ที่หลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อมจะกลายเป็นของแข็งและเปราะ เรียกว่า สแล็ค (Slag) นอกจากนี้ฟลักซ์ยังทำหน้าที่ในการเติมโลหะผสมลงในแนวเชื่อม ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [2]

2.) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดแกนฟลักซ์ (Flux-Cored Arc Welding : FCAW)

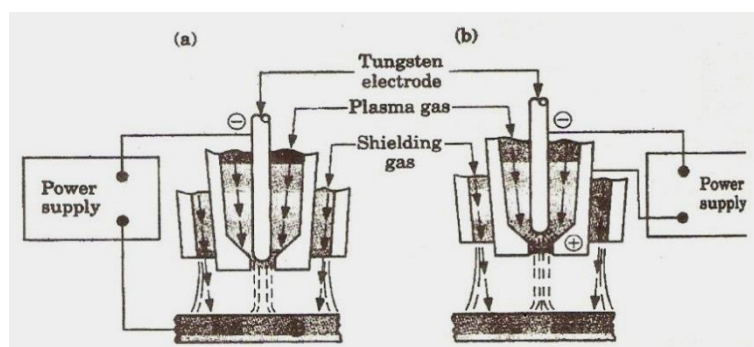
เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีลวดเชื่อมเป็นขดม้วน แต่ในแกนลวดจะมีฟลักซ์ เป็นของแข็งบรรจุอยู่ ทำหน้าที่ทำให้เกิดแก๊สปกคลุมการเชื่อม แต่ในบางกรณี อาจใช้แก๊สเฉื่อยช่วยทำการ Shield ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะนี้เรียกว่า Self-Shielded Flux-Core Arc Welding และ Gas-Shielded Flux-Core Arc Welding เหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาต่างๆ และต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมสูง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดแกนฟลักซ์ [2]

3.) กระบวนการเชื่อมพลาสมา (Plasma Arc Welding: PAW)

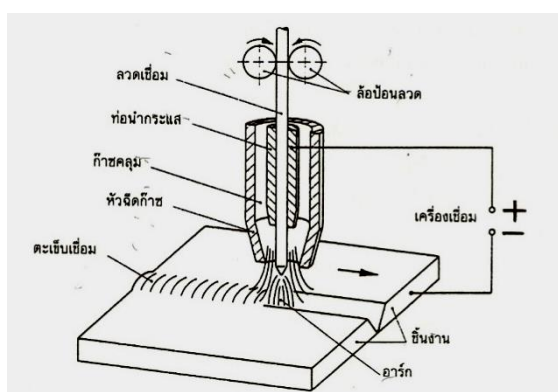
เป็นกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้าแบบหนึ่ง ที่มีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมอาร์คทังสเทน แก๊สคลูมหรือการเชื่อม TIG แต่กระบวนการนี้จะสร้างพลาสมา ที่ให้ความร้อนสูงมากประมาณ $33,000^{\circ}\text{C}$ ใช้กระแสไฟ 100 Amp หรือมากกว่าขึ้นอยู่กับลักษณะงาน หัวเชื่อมจะมีแท่งอิเล็กโทรด ทำจากทังสเทนอยู่ตรงกลาง โดยรอบจะมีแก๊สเฉื่อยที่มีความเร็วสูงวิ่งผ่านกระแสไฟฟ้าจาก อิเล็กโทรดจะทำปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยเกิดสภาวะพลาสมา ที่ให้ความร้อนสูงสามารถหลอมละลาย โลหะได้ แก๊สเฉื่อยที่ใช้เช่น แก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม หรือแก๊สผสม การเชื่อมด้วยพลาสมาเป็นการ เชื่อมที่มีความนุ่มนวล การอาร์คไม่รุนแรง สามารถเชื่อมชิ้นงานบางมากๆ ได้ดี ความร้อนรวมเป็น จุด การกระจายตัวต่ำ ความเร็วในการเชื่อม 120 – 1000 มม./นาที ใช้เชื่อมงานที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มม. ถ้าเป็นการเชื่อมจำพวกอลูมิเนียมอัลลอย และไททาเนียม สามารถเชื่อมได้หนาถึง 20 มม. ถ้า งานมีส่วนผสมของบรอนซ์ แมกนีเซียม และตะกั่ว จะเชื่อมได้ยากยิ่งขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมพลาสมา [2]

4.) การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม

การเชื่อมโลหะก๊าซคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลือยขนาดเล็กจากม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนผ่านหัวเชื่อม (Torch or welding gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวด และท่อนำกระแส (contact tip) ลวดเชื่อมจะสัมผัสกับผิวท่อนำกระแสทำให้กระแสเชื่อมไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะชิ้นงานจะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากอาร์คจะหลอมผิวโลหะชิ้นงาน และปลายลวดเมื่อเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันก๊าซจากท่อบรรจุจะไหลเข้าที่จ่ายสู่หัวฉีดพุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอบเปลวอาร์ค เพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือก๊าซอื่น ในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์คและโลหะที่กำลังหลอมเหลว ก๊าซคลุมที่เลือกใช้ได้แก่ ก๊าซเฉื่อย แอคทีฟก๊าซ อันรีแอคทีฟก๊าซ และก๊าซผสม ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม [3]

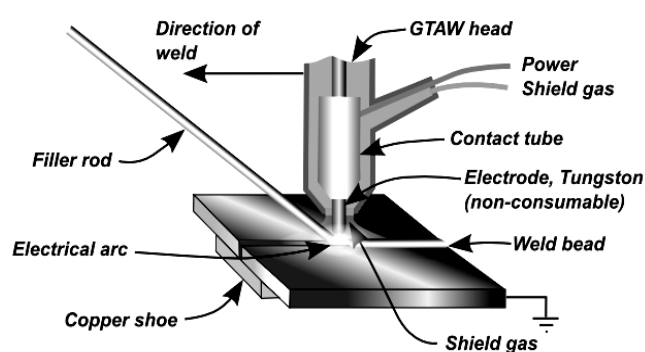
กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมสามารถเชื่อมงานได้อย่างกว้างขวางทั้งการเชื่อมโลหะและอโลหะตั้งแต่งานที่หนามากๆ จนถึงโลหะแผ่นบาง งานหนาส่วนมากจะเป็นการเชื่อมอโลหะลักษณะเปลวอาร์คและบ่อหลอมเหลวของกระบวนการนี้จะสุกใส เมื่อมองผ่านกระจกงานเชื่อมตะเข็บเชื่อมอาจมีสเกลปกคลุมเพียงบางๆ หรือไม่มีเลย การใช้อุปกรณ์การเชื่อมทำได้ไม่ยาก เพียงแต่ต่อสายเดินเข้ากับงานเชื่อม ปรับแต่งกระแส อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมให้ตรงตามข้อกำหนดที่ระบุไว้บนตัวเครื่องหรือหนังสือคู่มือก็สามารถปฏิบัติงานเชื่อมได้ หยดโลหะจากปลายลวดเชื่อมที่ถ่ายโอนผ่านอาร์คจะเกิดประกายโลหะ (spatter) กระเด็นเปื้อนบ้างเล็กน้อย

ลักษณะการถ่ายโอนโลหะของลวดเชื่อมจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อม ชนิดของก๊าซคลุมและระดับกระแสการเชื่อม กระบวนการนี้จะแตกต่างจากการเชื่อมทิก (TIG) เพราะสามารถปฏิบัติการเชื่อมได้โดยใช้มือเพียงข้างเดียวก็ควบคุมการเคลื่อนที่หัวเชื่อมและมุมหัวเชื่อมได้ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ช่างเชื่อมที่มีฝีมือดีมากอย่างกรณีเชื่อมทิก องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมคือ อัตราการเติมเนื้อโลหะ (deposition rate) ของลวดเชื่อมลงสู่บ่อหลอมเหลวได้มากกว่า จึงเคลื่อนที่หัวเชื่อมได้เร็ว ทำให้ปริมาณความร้อนจากการอาร์กเข้าสู่งานได้น้อยบริเวณกระทบร้อน (heat effected zone) แผ่กระจายเพียงแคบๆ งานจึงบิดตัวไม่มากทำให้สามารถเชื่อมงานบางได้ผลดี [3]

5.) การเชื่อมแบบทิก (Tungsten Inert Gas Welding : TIG)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) หรือ Tungsten Inert Arc Welding

(TIG) หรือ Heliarc เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่าการเชื่อมแบบ TIG กระบวนการนี้ใช้ก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อม เพื่อป้องกันมิให้อากาศเข้าไปรวมตัวกับแนวเชื่อม ความร้อนที่ใช้ในแนวเชื่อมได้จากการ Arc ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างทั้งสแตน (Tungsten electrode) กับชิ้นงานดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6



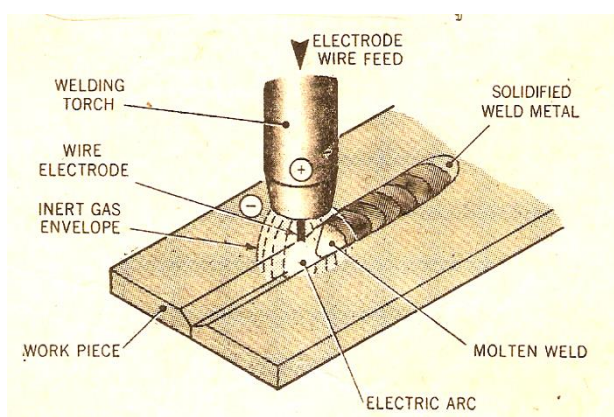
รูปที่ 2.6 กระบวนการเชื่อมแบบ TIG [8]

ในกระบวนการเชื่อมใดๆก็ตาม แนวเชื่อมที่ดีที่สุดจะต้องมีคุณสมบัติทางเคมี, ทางกล และทางโลหะวิทยาเหมือนกับคุณสมบัติชิ้นงานทุกประการ ดังนั้นการใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมแนวเชื่อม จึงเป็นวิธีการที่ดีที่ป้องกันมิให้อากาศซึ่งมีทั้ง Oxygen, Nitrogen ตลอดจนก๊าซเฉื่อยอื่นๆเข้าไปรวมตัวกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย อันเป็นสาเหตุที่จะทำให้งานเชื่อมเกิดรูพรุนหรือสูญเสีย

ความแข็งแรง แก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้คือ อาร์กอน (Argon) เพราะสามารถใช้กับโลหะได้แทบทุกชนิด และเหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราการไหล (Flow rates) ของอาร์กอนต่ำกว่าแก๊สเฉื่อยอื่นๆ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการเชื่อมถูกกว่า

6.) การเชื่อมแบบมิก (Metal Inert Gas Welding: MIG)

Gas Metal Arc Welding (GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมซึ่งรู้จักกันทั่วไปอีกชื่อหนึ่งคือ Metal Inert Gas Arc Welding หรือเรียกสั้นๆว่า MIG นอกจากนี้ยังมีชื่อเรียกทางการค้า (Trade name) อีกหลายชื่อ อาทิเช่น Micro - Wire, sigma, CO_2 welding, Aircomatic ฯลฯ เป็นต้น การเชื่อมแบบ MIG เป็นกระบวนการเชื่อมที่แก๊สที่ใช้แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมปกคลุมบริเวณแนวเชื่อม เพื่อป้องกันมิให้อากาศไปรวมตัวกับแนวเชื่อม ความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อม ได้มาจากการ Arc ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมที่มีการหลอมละลาย (Consumable electrode) กับชิ้นงานดังแสดงได้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการเชื่อมแบบ MIG [8]

Consumable electrode ทำหน้าที่ให้เกิดการ Arc และในขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่เป็น Filler metal โดยหลอมละลายในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสม แล้วรวมตัวกับเนื้อโลหะของชิ้นงานที่หลอมละลาย แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมจะปกคลุมบริเวณการหลอมละลาย

ป้องกันมิให้ CO_2, N_2 เข้าไปทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม ซึ่งอาจทำให้เกิดรูพรุนหรือทำให้แนวเชื่อมสูญเสียความแข็งแรงได้ [8]

2.2.2 การเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Solid – State Welding)

กระบวนการเชื่อมแบบนี้มี 2 ชนิดคือ ใช้แรงกดชิ้นงานให้ติดกันเอง และให้ความร้อนแล้วใช้แรงกดให้ติดกันซึ่งต้องใช้เวลาและแรงกดที่เหมาะสมด้วย โดยไม่ต้องเติมโลหะเชื่อมแต่ผิวชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต้องสะอาด และอะตอมต้องประสานติดกันได้

การเชื่อมแบบไม่ให้ความร้อน คือ การนำเอาวัสดุ 2 ตัวที่ผ่านการทำความสะอาดที่ผิวงาน ปราศจากออกไซด์และสิ่งสกปรกต่างๆ มาทำการกดอัดด้วยแรงและเวลาที่เหมาะสม ผลที่ได้จะทำให้เกิดความร้อนและเกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะ (Plastic deformation) ที่ผิวหน้าของชิ้นงานยึดติดกันและมีความแข็งแรง ในการประยุกต์ใช้งาน ด้วยการให้ความร้อนจากภายนอกแก่ชิ้นงานก่อน แล้วนำมากดอัดให้ยึดเกาะกัน ในลักษณะที่ผิวหน้าสัมผัสจะเคลื่อนตัวเรียกว่า (Faying surfaces) เกิดการแผ่กระจายประสานติดกัน หยุดการเกิดออกไซด์ฟิล์ม ทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้น [2]

1) การเชื่อมด้วยการตี (Forge Welding: FW)

เป็นกระบวนการดั้งเดิม กระทำโดยการเผาโลหะ 2 ชิ้น ให้ร้อนแล้วตีให้ติดกันด้วยค้อน แต่ต้องใช้ช่างที่มีฝีมือและความชำนาญมาก จากหลักการดั้งเดิมได้นำมาสู่เทคโนโลยีสมัยใหม่จนเกิดกระบวนการใหม่ๆ อีกมากมาย ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.8 และ 2.9

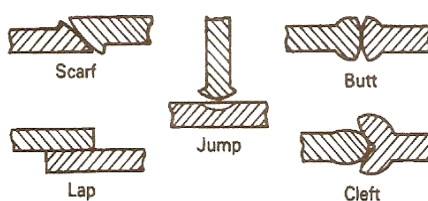


Fig. 1 Typical joint configurations used for manual forge welding applications. Source: Ref 1

รูปที่ 2.8 กระบวนการเชื่อมด้วยการตี [2]

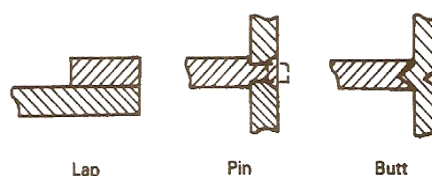
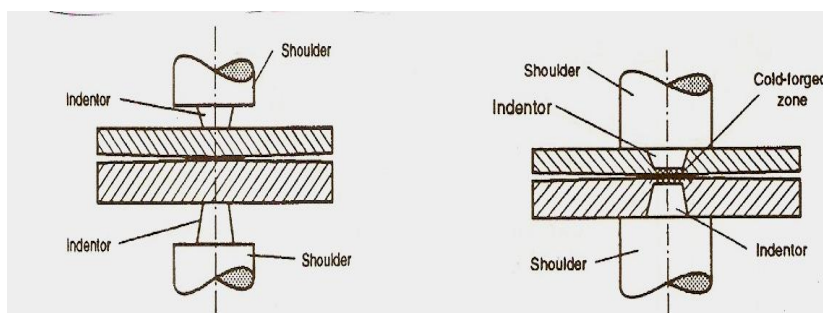


Fig. 2 Recommended joint configurations used in automatic forge welding applications. Source: Ref 1

รูปที่ 2.9 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยการตี [2]

2) การเชื่อมในสภาวะเย็น (Cold Welding: CW)

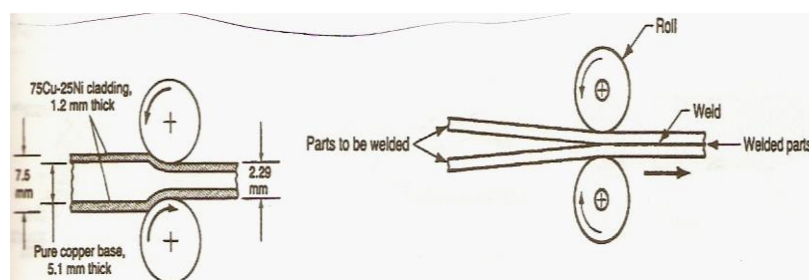
ใช้แรงกดที่สูงมากเพื่ออัดโลหะสองชิ้น ที่มีผิวสะอาดให้ติดกันที่อุณหภูมิห้อง โลหะที่สามารถใช้การเชื่อมแบบ CW คือ อลูมิเนียม และทองแดง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการเชื่อมในสภาวะเย็น [2]

3) การเชื่อมด้วยลูกกลิ้ง (Roll Welding: ROW)

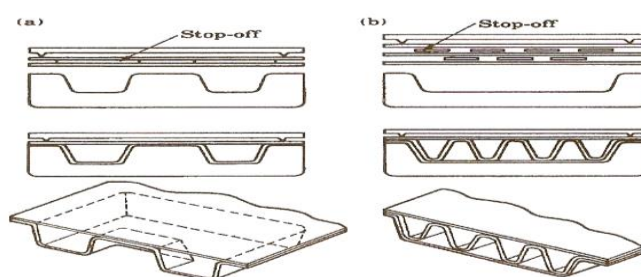
เป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ที่ใช้แรงกดดันเพื่อให้โลหะประสานติดกัน โดยการรีดที่ต้องอาศัยความร้อนจากภายนอก หรือไม่ใช้ความร้อนก็ได้ ถ้าไม่ใช้ความร้อนเรียกว่า Cold ROW แต่ถ้าใช้ความร้อนเรียกว่า Hot ROW กระบวนการนี้สามารถใช้กับวัสดุงานที่เป็นเหล็ก และ สแตนเลส ที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ ทำให้ปลายของเครื่องมือวัดอุณหภูมิและการทำหริยญกษาปณ์ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระบวนการเชื่อมด้วย Roll Welding [2]

4) การเชื่อมดิฟฟิวชัน (Diffusion Welding : DFW)

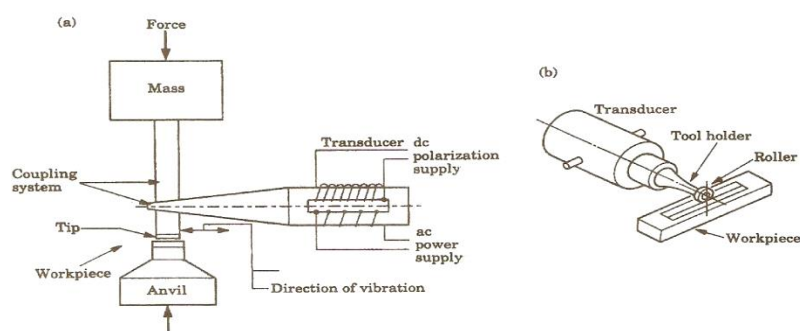
กรรมวิธีประกอบด้วยแรงกดอัด และความร้อน ในขณะเดียวกันต้องควบคุมบรรยากาศ และเวลาให้พอเหมาะด้วยอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย บริเวณผิวหน้าจะเปลี่ยนรูป อยู่ในภาวะพลาสติก (Plastic Deformation) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น การทำงานต้องใช้การเดิมโลหะต่างชนิดกับชิ้นงานโดยจะต้องให้แทรกอยู่ระหว่างกลางเวลาที่ให้อยู่ในช่วงวินาทีถึงชั่วโมง แล้วแต่กระบวนการแพร่สิ้นสุดเมื่อใด กระบวนการนี้ใช้กับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน และอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการเชื่อมดิฟฟิวชัน [2]

5) การเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic Welding : USW)

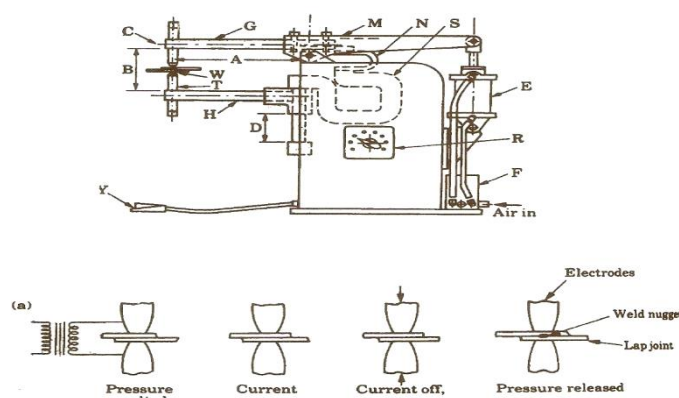
วิธีนี้ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ การยัดชิ้นงานให้ติดกันด้วยแรงเพียงเล็กน้อย และปล่อยคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูงประมาณ 15 -75 kHz แอมป์ริจูด 0.0018 - 0.13 มม. จนชิ้นงานได้รับความเค้นเฉือน (Shear Stresses) จนเกิดความร้อนแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน ใช้เวลาในการเชื่อมน้อย การเชื่อมชิ้นงานจะต่อกันในลักษณะต่อเกย (Lap joints) วัสดุงานส่วนมากจะเป็นวัสดุอ่อน เช่น อลูมิเนียม และทองแดง ซึ่งหนาไม่เกิน 3 มม. ส่วนมากจะทำชิ้นส่วนเล็กๆ ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการเชื่อมอัลตราโซนิก [2]

6) การเชื่อมจุด (Resistance Spot Welding : RSW)

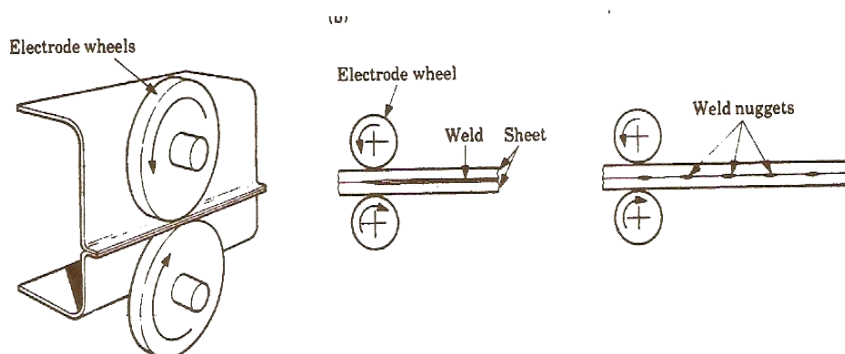
เป็นการเชื่อมที่มีความสำคัญมากที่สุดของกลุ่มนี้ เพราะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์และอุตสาหกรรมการทำเฟอร์นิเจอร์ ชิ้นงานเชื่อมจะต่อกันแบบต่อเกย มีความหนาไม่เกิน 3 มม. รูปร่าง และขนาดของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับรูปร่างปลายของอิเล็กโทรด ซึ่งส่วนมากจะกลมเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5-10 มม. รอยเชื่อมจะเกิดเป็นช่วงๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบการเชื่อมและความแข็งแรงที่ต้องการ การต่อชิ้นงานเป็นการต่อในลักษณะต่อเกย แท่งอิเล็กโทรดกดชิ้นงานด้วยระบบนิวแมติกส์ การเชื่อมเกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าถูกปล่อยออกมา ชิ้นงานเกิดความต้านทานกระแสเกิดความร้อนขึ้น ขณะเดียวกันชิ้นงานยังคงถูกกดอยู่ด้วยแรงเท่าเดิม จนติดกันแล้วชุดปล่อยกระแสไฟ อิเล็กโทรดส่วนมากจะทำมาจากวัสดุ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มทองแดง และโลหะผสมกับกลุ่มที่เป็นโลหะที่ทนต่อการสึกหรอ มีทองแดงผสมกับทั้งสแตนเลส ในระหว่างการเชื่อม ที่ปลายของอิเล็กโทรดทั้งสองจะเกิดความร้อนสูง ดังนั้น จึงต้องมีช่องไว้ภายในเพื่อเป็นทางเดินของน้ำหล่อเย็น ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการเชื่อมจุด [2]

7) การเชื่อมตะเข็บ (Resistance Seam Welding : RSEW)

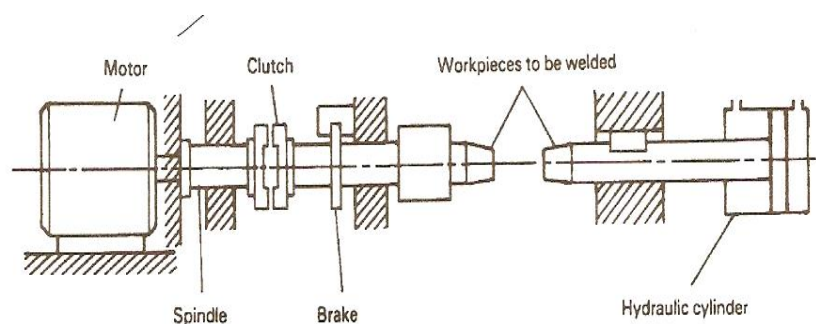
การเชื่อมแบบนี้หลักการเหมือนกับการเชื่อม RSW แต่อิเล็กโทรดแทนที่จะเป็นแท่งจะถูกออกแบบให้มีรูปร่างเป็นล้อหมุนแทน รอยเชื่อมแบบนี้อากาศไม่สามารถผ่านได้ จึงนิยมใช้เชื่อมถึงน้ำมัน ท่อพักไอเสียของรถยนต์ และกระป๋องบรรจุอาหาร การเชื่อม RSEW มีรอยเชื่อมหรือตะเข็บในหลายๆรูปแบบ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นจังหวะ หรือปล่อยกระแสอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กระบวนการเชื่อมตะเข็บ [2]

8) การเชื่อมฟริกชัน (Friction Welding : FRW)

กระบวนการเชื่อมแบบนี้กระทำโดยนำชิ้นงาน 2 ชิ้นมาเสียดสีกัน (ชิ้นหนึ่งหมุนและอีกชิ้นหนึ่งอยู่กับที่) ความฝืดระหว่างผิวของชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนเพียงพอที่จะทำให้บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองอ่อนตัว จากนั้นใช้แรงกดให้ชิ้นงานทั้งสองติดกัน ซึ่งจะใช้กับงานที่เป็นรูปทรงกระบอก และเพลลา รอยต่อที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติดีหรือไม่ขึ้น ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ปริมาณความร้อน ค่าการนำความร้อนของวัสดุ และคุณสมบัติทางกลที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของวัสดุงาน นั้นหมายถึง การควบคุมความเร็ว และแรงกดอัดในขณะที่เชื่อม ซึ่งเป็นผลให้รอยเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกันไป ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กระบวนการเชื่อมฟริกชัน [2]

2.3 การเชื่อมแบบเสียดทาน (Friction Welding)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานจะสามารถเชื่อมโลหะได้หลายชนิด ทั้งโลหะที่เหมือนกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงแต่มีบางพวกที่เชื่อมเสร็จแล้วรอยเชื่อมที่ได้จะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะชิ้นงาน ดังนั้นโลหะพวกนี้จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้วเพื่อให้ได้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงาน และโลหะกลุ่มนี้ส่วนมากจะได้แก่ กลุ่มโลหะผสมและแอสแตนเลสที่ชุบแข็งได้ กลุ่มเหล็กคาร์บอนและโลหะผสม จะง่ายต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน[1]

ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้โดยง่าย และมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่สูง และพวกเหล็กผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่การเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีในการเชื่อมและเทคนิคในการเชื่อม เพื่อให้การเชื่อมนั้นง่ายขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะกลอมละลายติดกัน ส่วนกลุ่มเหล็กประเภทเครื่องมือจะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กพวกคาร์บอน และเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่านรีมเมอร์ และกลุ่มเครื่องมือตัดชนิดอื่นๆ เหล็กไร้สนิมจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงทั้งยังมีขอบเขตการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงทั้งยังมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งต้องมีการให้ความร้อนก่อน การเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อให้รอยเชื่อมดีขึ้น เหล็กหล่อจะออกแบบได้หลายชนิดเช่น พวกเหล็กหล่อสีเทาหรือเหล็กหล่อเหนียวจะไม่สามารถใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้เพราะกลุ่มคาร์บอนอิสระจะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นหน้าสัมผัสชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนที่จำกัด โลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะผสมส่วนมากจะทำการเชื่อมต่อแบบแรงเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่ม

ทองแดงผสม จะทำให้สามารถเชื่อมต่อแบบแรงเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่มทองแดงผสม จะทำให้สามารถเชื่อมได้เช่นเดียวกับอลูมิเนียมและทองแดงบริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่จะต่อกลุ่มอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ติดกับเหล็กจะมีปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมจะแตกต่างกันมากก็ตามที่สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้แต่รอยเชื่อมที่ได้ อาจเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม ส่วนกลุ่มไททาเนียม ไททาเนียมผสม เซอร์โคเนียมผสมและแมงกานีสผสม จะทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ด้วยตัวเอง กลุ่มโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ และกลุ่มโลหะทนความร้อน ทั้งสเตน-โมลิบดีนัม โคลัมเบียและแทนทาเนียม จะง่ายมากในการเชื่อมด้วยตัวเอง (โลหะชิ้นงานและตัวที่จะนำมาต่อจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานสามารถเชื่อมได้แบบทั้งโลหะและอโลหะโดยที่คุณสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง การเชื่อมด้วยวิธีอื่นไม่สามารถเชื่อมได้ เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวจึงทำให้การเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จากข้อที่เห็นได้ชัดคือ อุณหภูมิที่หลอมละลายในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมโลหะต่างๆ สามารถทำการเชื่อมได้สะดวกยิ่งขึ้น และการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากแบบ Mass Product หรือ นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือตัดโลหะด้วยเครื่องจักรอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบรถยนต์และรถแทรกเตอร์รวมถึงเครื่องทำน้ำอุ่นเป็นต้น และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 Continuous drive friction welding หลักการทำงานของกระบวนการนี้ คือ โลหะชิ้นงานจะถูกจับด้วยหัวจับด้วยหัวจับของเครื่องแล้วถูกทำให้หมุน ส่วนอีกชิ้นหนึ่งจะถูกจับอยู่ที่ขั้วศูนย์ท้ายเครื่อง (Tail stock) หรือ จิ๊กที่ออกแบบมาสำหรับการจับยึดให้แน่น และจะเลื่อนเข้าหาชิ้นงานด้วยระบบไฮดรอลิกให้สัมผัสกับชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยแรงกดดันของเพลลาที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานจนถึงอุณหภูมิของการเชื่อม การหมุนก็จะหยุดลงอย่างทันใด แรงกดดันที่ขั้วศูนย์ท้ายเครื่องจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมวิธีนี้ คือ ความเร็วรอบที่หัวจับ แรงดันที่ขั้วศูนย์และระยะเวลาของแรงกด สำหรับรูปลักษณะของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับ

- 1) พื้นที่ภาคตัดของชิ้นงานที่จะเชื่อม
- 2) จุดหลอมละลายและการกระจายความร้อนของโลหะชิ้นงาน
- 3) โครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไปซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนขณะเชื่อม โดยเฉพาะโลหะต่างชนิดเมื่อถูกนำมาเชื่อม

ตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมในกระบวนการ คือ ความเร็วรอบ แรงกดเริ่มต้น (ความร้อน) ระยะเวลาของการกดเพื่อให้เกิดความร้อนและรอยย่นหรือแรงกดขึ้นรูป ระยะเวลาของการหมุน ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานร้อน

ความเร็วรอบหรือความเร็วรอบจะมีผลต่อกระบวนการเชื่อมน้อยที่สุด และจะเปลี่ยนแปลงได้มากถ้าเวลาของการให้ความร้อนและแรงกดปรับให้ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม เวลาของการให้ความร้อนจะต้องถูกจำกัดเพื่อป้องกันความร้อนเกิดขึ้นมากเกินไป ความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กคาร์บอนต่ำ ปานกลาง และ สูง คือ 250 ถึง 750 sfm (Surface feet per minute)

แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กคาร์บอนและเหล็กผสมต่ำ จะใช้แรงกด 6 ถึง 12 ksc แรงกดที่ใช้ในการเชื่อมสำหรับเหล็กเหล่านี้จะใช้ 12 ถึง 25 ksc โดยทั่วไปแรงกดที่ใช้สำหรับการเชื่อมจะสูงกว่าแรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนแต่บางครั้งก็ใช้เกือบเท่ากัน สำหรับเหล็กคาร์บอน ปานกลางและสูง จะให้แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อน 6 ถึง 15 ksc การอุ่นชิ้นงานบางครั้งจะใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

แกนหมุนควรจะหยุดอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการบิดหรือแกว่งสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1/2 นิ้ว เวลาที่ใช้ในการหยุดควรจะใช้เวลาไม่เกิน 1.5 วินาที และชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางควรจะหยุดภายใน 1/2 หรือ 2 วินาที

2.3.2 Inertia drive friction welding ความร้อนทั้งหมดที่ต้องการในการเชื่อมจะใช้พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนล้อช่วยแรงในการเชื่อมแบบ (Inertia drive friction welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเชื่อมแบบ (Continuous drive friction welding) โดยหลักการทำงานชิ้นงานหนึ่งจะถูกจับยึดอยู่กับที่หรือที่จิกจับงาน และชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งถูกจับอยู่ที่หัวจับที่ยึดอยู่กับ (Spindle) ที่กำลังหมุนมอเตอร์ขับเคลื่อนจะเร่งอัตราการหมุนของล้อช่วยงานและ (Flywheel) จะส่งต่อกำลังไปยัง (Spindle) จนถึงระดับพลังงานที่เพียงพอและแล้วพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนการหมุนจะถูกตัดออก และพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน (Flywheel) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวหน้าของรอยเชื่อมด้วยแรงกดดันที่แกนเพลลา ซึ่งจะเป็นผลให้ชิ้นงานเชื่อมติดเข้าด้วยกันโดยสมบูรณ์

ผิวของชิ้นงานที่จะเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งก่อนเชื่อม เช่น ผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วยใบหินเจียร เลื่อยตัด แก๊สตัด เพราะว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานจะทำให้ส่วนที่ไม่เรียบเกิดการหลอมละลายรวมตัวกับเนื้อโลหะที่เชื่อม โดยจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพรอย

เชื่อมต่อดลง สำหรับโลหะที่เคลือบด้วยโครเมียม โลหะที่ชุบแข็งด้วยไฮโดรคาร์บูไรต์ โลหะที่มีออกไซด์สูง จะไม่สามารถขจัดออกได้ในขณะที่เชื่อมที่เป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าปกติ แล้วถ้าหากมีสารไนไตรเคลือบอยู่หน้าจะไม่สามารถทำการเชื่อมได้เลย

การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน จะสามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ทั้งโลหะที่เหมือนกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรง แต่มีบางพวกที่เชื่อมเสร็จแล้ว รอยเชื่อมที่ได้จะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะชิ้นงาน ดังนั้น โลหะพวกนี้จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้ว เพื่อจะทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงาน และโลหะพวกนี้ส่วนมากได้แก่พวก(alloys Steel) และ (Hardenable-Stainless Steel)

เหล็กพวกคาร์บอนและ (alloys steel) จะง่ายต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้โดยง่าย และมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กพวกที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่สูง และพวกเหล็กผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่ในการเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีการควบคุมกระบวนการเชื่อมและใช้เทคนิคในการเชื่อม เพื่อทำให้การเชื่อมนั้นง่ายขึ้นเหมือนกับการเชื่อมโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และแรงที่ใช้กดในแนวนอนจะต้องเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะชิ้นนั้นหลอมละลายติดกัน (High speed tool steel) จะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กพวกคาร์บอนและเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่าน ริมเมอร์ และพวก (Cutting tool) ชนิดอื่นๆ

เหล็กไร้สนิม จะใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และคุณสมบัติของรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงพร้อมทั้งยังมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งจะต้องมีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อจะทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมดีขึ้น

เหล็กหล่อ (Cast iron) แบ่งออกได้หลายชนิด เช่น Gray Ductile or Malleable จะไม่สามารถใช้กรรมวิธีในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้เพราะพวก (Free graphite) จะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ซึ่งจะทำให้ได้รับความร้อนที่จำกัด

อลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสม ส่วนมากจะสามารถทำการเชื่อมต่อบนแบบแรงเสียดทานได้ เช่น พวกอะลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมจะสามารถเชื่อมได้เช่นเดียวกับพวกอะลูมิเนียมและทองแดง ชนิดบริสุทธิ์แต่ในกรณีที่ต้องการต่อพวกอะลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ติดกับเหล็ก มีปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันจะแตกต่างกันมากก็ตามก็สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้ แต่รอยเชื่อมที่ได้อาจจะเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม

ส่วนพวกไททาเนียม ทิตาเนียมผสม เซอร์โคเนียมผสมและแมงกานีสผสมจะสามารถทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ด้วยตัวของมันเองพวก (Nickel-base) และ (Cobalt-base) และพวก

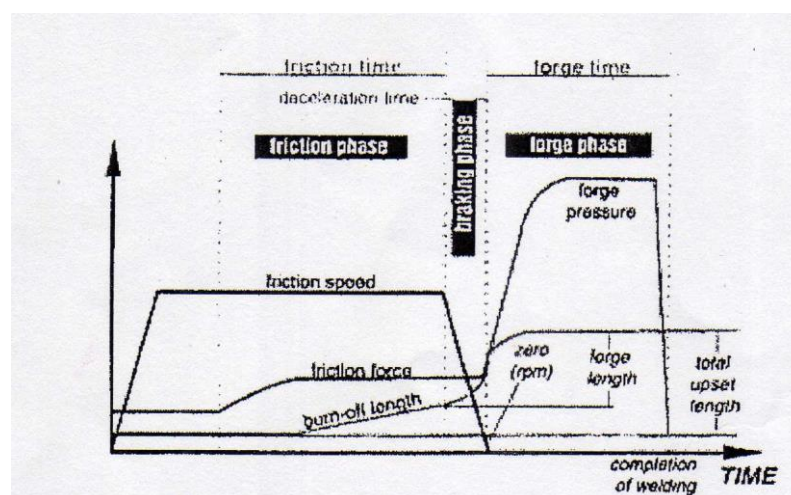
(Heat-resisting alloys) โลหะทนความร้อน (Tungsten-molybdenum Columbium) และ (Titanium) จะง่ายมาก ในการเชื่อมด้วยตัวของมันเอง (โลหะชิ้นงานและตัวที่นำมาต่อจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน) และมีข้อจำกัดของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน [9]

- 1) กระบวนการจะต้องมีรูปแบบควบคุมให้อยู่ในแนวราบและ Angular butt -weld ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน
- 2) เครื่องจักรจะต้องออกแบบให้มีการเชื่อมของชิ้นงานเป็นรูปวงกลม หรือเกือบกลม
- 3) ชิ้นงานจะต้องทนแรงบิด และแรงดันในแนวแกนระหว่างเกิดความร้อนและแรงอัด
- 4) ชิ้นงานจะต้องเป็นรูปกลมหรือค่อนข้างกลม ณ จุดสัมผัส ขนาดและรูปร่างจะถูกควบคุมโดยการหมุน
- 5) ตัวจับชิ้นงานจะต้องแข็งแรงและทนต่อ Shock and torque loads

2.4 การแบ่งวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานตามหลักการส่งถ่ายพลังงาน

2.4.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับเคลื่อนหรือต่อเนื่อง

(Continuous or Direct Drive Friction Welding)



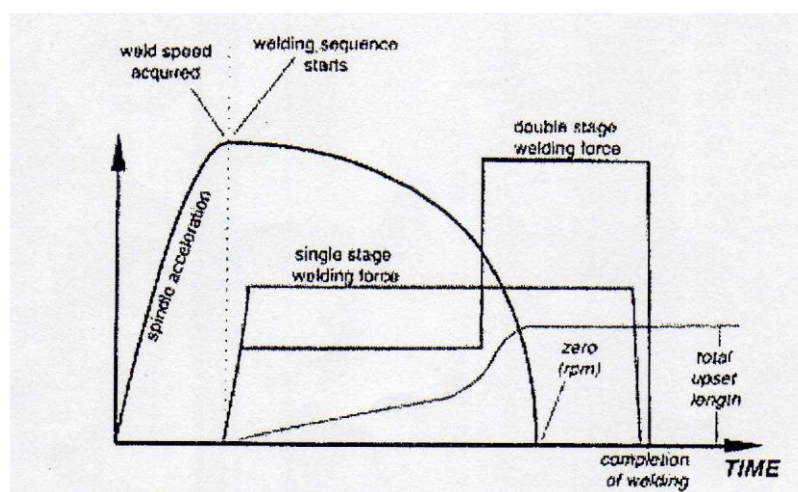
รูปที่ 2.18 แสดงขั้นตอนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบขับเคลื่อนหรือต่อเนื่อง [3]

จากรูปที่ 2.18 อธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มต้นจากการนำผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมมาสัมผัสกันแล้วเริ่มหมุนชิ้นงานพร้อมทั้ง ออกแรงกดคงที่
- 2) เมื่อความเร็วในการหมุน (Friction Speed) คงที่แล้วจึงเพิ่มแรงกดเสียดทาน (Friction Force) พร้อมทั้งเริ่มต้นจับเวลา (Friction Time)
- 3) ชิ้นงานทั้งสองชิ้นจะหมุนเสียดสีกันภายใต้การจ่ายพลังงานในการหมุนอย่างต่อเนื่องจนครบเวลา (Friction Time) ที่กำหนดไว้ จึงหยุดหมุน (Braking) ชิ้นงานแล้วทำการเพิ่มแรงกดอยู่ (Forge Force or Upset Force) พร้อมทั้งเริ่มจับเวลาที่ใช้ในการกดอยู่ (Forge Time)
- 4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดในการกดอยู่ (Forge Time) จึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันแล้วออกจากเครื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อม

2.4.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย

(Inertia-drive Friction Welding)



รูปที่ 2.19 แสดงขั้นตอนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย [3]

จากรูปที่ 2.19 อธิบายขั้นตอนดังนี้

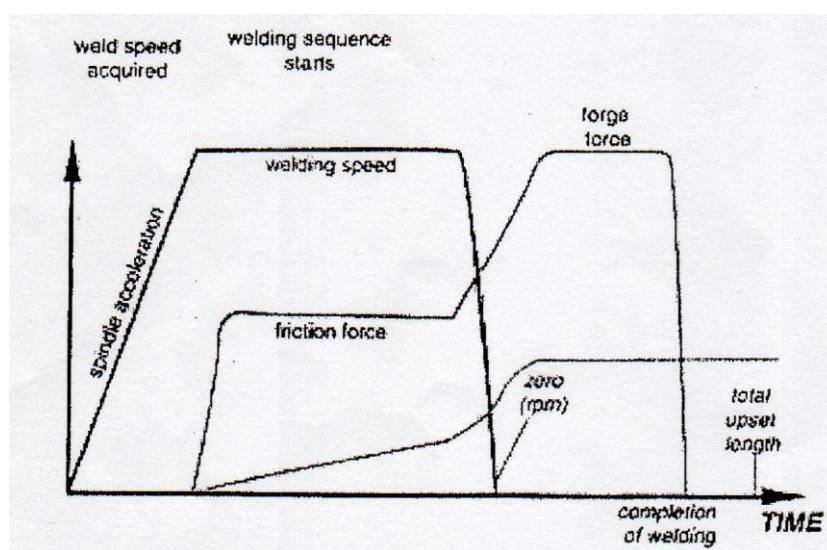
- 1) เริ่มต้นจากการหมุนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมโดยอาศัยล้อตุ้มกำล (Flywheels) เป็นตัวเร่งให้ความเร็วในการหมุนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ยังคงไม่ให้ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองชิ้นสัมผัสกัน
- 2) เมื่อความเร็วในการหมุน (Friction Speed) สูงถึงความเร็วที่ต้องการ

(Weld Speed Acquired) แล้วจึงหยุดแหล่งจ่ายพลังงานในการหมุนแล้วปล่อยให้ล้อตุนกำลังซึ่งสะสมพลังงานไว้เป็นตัวหมุนชิ้นงานโดยจะหมุนด้วยแรงเฉื่อย

- 3) ออกแรงกดให้ผิวหน้าของชิ้นงานหมุนเสียดสีกัน โดยการออกแรงกดนี้อาจดแบบขั้นเดียว (Single Stage) หรือแบบสองขั้น (Double Stage) ก็ได้ โดยการออกแรงกดแบบขั้นเดียว (Single Stage) จะใช้แรงกดเพียงค่าเดียวกดชิ้นงานทั้งสองจนหยุดหมุนไปเอง ส่วนการออกแรงกดแบบสองขั้นก็คล้ายกับแบบแรกแต่จะมีการออกแรงกดเพิ่มขึ้นอีกในช่วงที่ชิ้นงานใกล้จะหยุดหมุน
- 4) ออกแรงกดค้างไว้หลังจากชิ้นงานหยุดหมุนสักระยะหนึ่ง จึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันแล้วออกจากเครื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อม

2.4.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม

(Hybrid Friction Welding)



รูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม [3]

จากรูปที่ 2.20 อธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

- 1) เริ่มต้นจากการหมุนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมโดยยังไม่ให้ผิวหน้างานทั้งสองชิ้นสัมผัสกัน
- 2) เมื่อความเร็วในการหมุนสูงถึงความเร็วที่ต้องการ (Weld Speed Acquired) แล้วจึงออกแรงกดให้ผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสและหมุนเสียดสีกันด้วยความเร็ว (Friction Speed) และแรงกดเสียดทาน (Friction Force) จนชิ้นงานหยุดหมุน

- 3) ชิ้นงานทั้งสองชิ้นจะหมุนเสียดสีภายใต้การจ่ายพลังงานในการหมุนอย่างต่อเนื่องจนครบเวลา (Friction Time) ที่กำหนดไว้ จึงเพิ่มแรงกดอยู่ (Forge Force Upset Force) จนชิ้นงานหยุดหมุน
- 4) ออกแรงกดค้างไว้หลังจากที่ชิ้นงานหยุดหมุนสักระยะหนึ่งจึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันแล้วออกจากเครื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อม

จากขั้นตอนเชื่อมทั้งสามวิธีจะเห็นได้ว่ามีข้อแตกต่างกันที่ลักษณะการส่งถ่ายพลังงานในการหมุนชิ้นงาน โดยการเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง (Continuous or Direct Drive Friction Welding) นั้นชิ้นงานจะหมุนอย่างต่อเนื่องโดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานในการหมุนที่มีความเร็วคงที่และจะหยุดหมุนด้วยระบบหยุด (Braking System) เมื่อสิ้นสุดเวลาที่กำหนดส่วนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย (Inertia-drive Friction Welding) นั้นจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของล้อตุ้มกำลัง (Flywheels) เป็นตัวสะสมพลังงานในการหมุนช่วงแรก และเมื่อความเร็วมีค่าสูงถึงความเร็วที่ต้องการแล้ว จึงหยุดจ่ายพลังงานในการหมุนแล้วปล่อยให้ล้อตุ้มกำลัง ที่จะนำพลังงานที่สะสมไว้มาเป็นตัวหมุนชิ้นงานด้วยแรงเฉื่อย จนชิ้นงานหยุดหมุนไปเองโดยปราศจากการใช้ระบบหยุด และการเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม (Hybrid Friction Welding) นั้นเป็นการผสมระหว่างแบบต่อเนื่องและแบบอาศัยแรงเฉื่อย โดยจะคล้ายกับการเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง แต่จะไม่มีการใช้ระบบหยุดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อยจะสั้นกว่าการเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง

2.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแบบแรงเสียดทาน

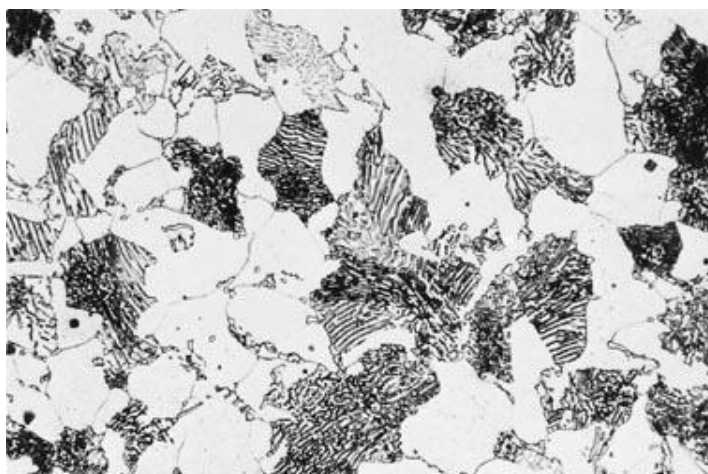
- 2.5.1 ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน (Velocity)
- 2.5.2 ขนาดของแรงกดเสียดทาน (Friction Force)
- 2.5.3 ขนาดของแรงกดอยู่ (Upset Force)
- 2.5.4 เวลาที่ใช้ในการหมุน (Friction Time)
- 2.5.5 ขนาดพื้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน (Surface Area)
- 2.5.6 ชนิดของวัสดุชิ้นงานเชื่อม
- 2.5.7 อุณหภูมิภายนอกขณะทำการเชื่อม

2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหมาย

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหมายซึ่งอยู่ในแผนภูมิสมดุลเหล็กคาร์บอนที่จำเป็นต้องทราบ คือ

2.6.1 เฟอไรต์

เฟอไรต์คือ สารละลายในสภาพของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิธรรมดาจนถึงประมาณ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กได้มากที่สุดที่ 0.025 เปอร์เซ็นต์ บางครั้งเราเรียกเฟอไรต์ว่าเหล็กแอลฟา เฟอไรต์เป็นชื่อที่มีมาจากภาษาละติน เรียกว่า เฟอรัม (Ferrum) ซึ่งแปลว่า เหล็ก โครงสร้างซึ่งประกอบไปด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ BCC (Body Center Cubic) เป็นสารแม่เหล็ก มีคุณสมบัติต่างๆไปคือ อ่อนและเหนียว ดังรูปที่ 2.21

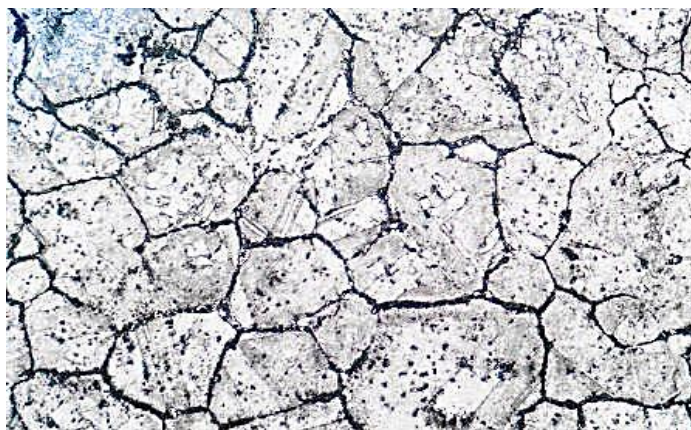


รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างเฟอไรต์ [10]

2.6.2 ซีเมนต์ไทต์ หรือ ไอออนนาคาร์ไบด์ (Cementite)

ซีเมนต์ไทต์ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติแข็ง ทนต่อการเสียดสีได้ดี เป็นตัวช่วยเสริมคุณสมบัติที่สำคัญ เช่นในกรณีที่เหล็กผ่านการอบชุบ คาร์ไบด์จะแทรกตัวในพื้นที่ของโครงสร้างพื้นฐาน ในกรณีที่เป็โลหะผสมจะปนอยู่ในเนื้อเหล็ก เช่น ทั้งสแตนคาร์ไบด์ หรือ โคเมียมคาร์ไบด์ ให้คุณสมบัติทนต่อการเสียดสีได้สูง ซีเมนต์ไทต์ไม่

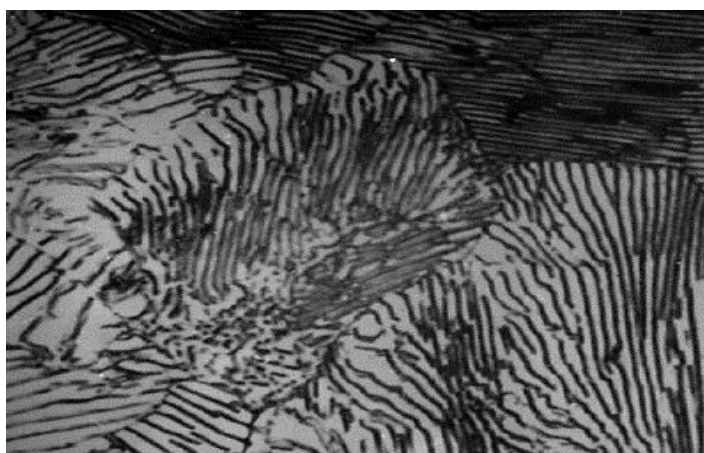
เพียงแต่จะเกิดในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่มากเท่านั้น ในเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำก็อาจเกิดคาร์ไบด์ในพื้นที่ของเฟอไรต์ได้เช่นกัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างซีเมนไทต์ [10]

2.6.3 เพิร์ลไลต์

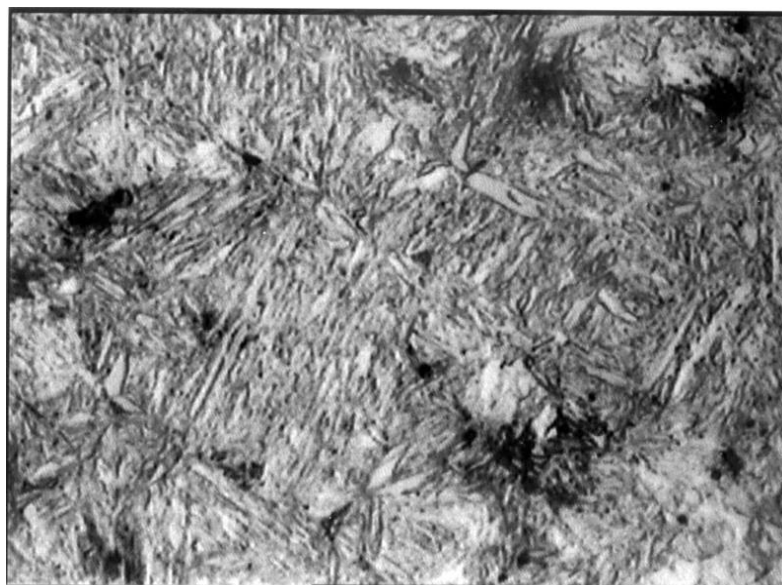
เพิร์ลไลต์ คือ โครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวสลับกันของสองเฟส คือ เฟอไรต์กับซีเมนไทต์ โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่มากถึง 0.80 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนจะเป็นโครงสร้างของเพิร์ลไลต์มากที่สุดทั้งก่อน เพิร์ลไลต์ มาจากคำว่า เพิร์ล (Pearl) ซึ่งแปลว่าไข่มุก เนื่องจากว่าเมื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 400 เท่า จะมองเห็นรูปร่างและความวาวคล้ายไข่มุก ลักษณะที่พบมาก คือ แบบแถบยาวๆบางๆเป็นกลุ่มก้อนสีดำดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างเพิร์ลไลต์ [10]

2.6.4 ออสเทนไนต์ (Austenite)

ออสเทนไนต์ คือ โครงสร้างที่ได้มาจากการนำเหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเท็คตอยด์มาเข้าในเตาอบที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 โครงสร้างภายในก็จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ ผู้ที่ค้นพบคนแรกคือ โรเบิร์ต มาร์ติน (Robert Martin) จากโครงสร้างออสเทนไนต์เรานำมาชุบแข็งด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มน้ำหรือน้ำมัน โครงสร้างก็จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่มีส่วนหนึ่งที่ยังคงเป็นออสเทนไนต์อยู่เรียกว่าออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) ปริมาณของออสเทนไนต์ที่ตกค้างจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก อุณหภูมิชุบแข็งและการทำให้เย็น เรามารวมการทำให้ออสเทนไนต์ตกค้างนั้นหายไปได้โดยการอบคืนตัวหรือการทำ เทมเปอร์ริง (Tempering) โดยอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดในการทำแล้วแต่โลหะแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.24

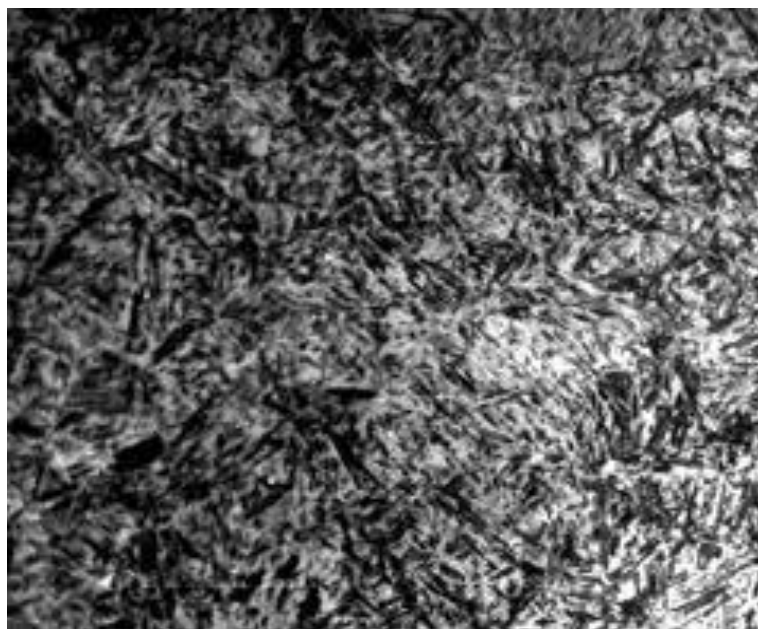


รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างออสเทนไนต์ [10]

2.6.5 มาร์เทนไซต์ (Martensite)

มาร์เทนไซต์ คือ โครงสร้างจุลภาคที่ไม่มีในแผนภูมิสมดุลเหล็กกล้าคาร์บอน โดยได้จัดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อโลหะอันเนื่องมาจากความร้อน โดยกำหนดเหล็กกล้าไฮโปยูเท็คตอยด์ ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์มาเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 จนถึงเส้น A_3 ซึ่งโครงสร้างภายในจะเป็นออสเทนไนต์ จากนั้นรีบนำออกมาจากเตาแล้วทำให้เย็นตัวอย่าง

รวดเร็วโดยการจุ่มในน้ำหรือน้ำมัน โครงสร้างภายในก็จะเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งโครงสร้างนี้มีลักษณะเด่นคือ มีความแข็งแรงมาก เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบว่ามีลักษณะคล้ายเข็ญ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [8]

2.7 โลหะที่ใช้ในการทดสอบ

2.7.1 อลูมิเนียม ALUMINIUM (Al) เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา คือ เบากว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า เนื้อโลหะจะมีสีขาวอ่อน เป็นตัวนำความร้อนและเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี อลูมิเนียมบริสุทธิ์เมื่อทิ้งไว้ในอากาศนาน ๆ จะเกิดออกไซด์ที่ผิวบาง ๆ ทำให้อลูมิเนียมทนต่อการกัดกร่อนได้ดี อลูมิเนียมง่ายต่อการแปรรูปไม่ว่าจะด้วยการหล่อ รีด หรือ ดึง และ อลูมิเนียม มีคุณสมบัติทนต่อดินฟ้าอากาศ (ใอน้ำในอากาศ) และทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีบางชนิด อลูมิเนียมเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี สามารถสะท้อนแสงและความร้อนได้ดี สามารถนำไปตัดเฉือนและขึ้นรูปได้ง่าย การขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งร้อนและเย็น ผิวสามารถทำการปรับปรุงได้เช่น การย้อมสี และการแอนโนไดซิง (Anodizing) ซึ่งเป็นการทำให้ผิวเกิดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์มีความแข็งแรงและจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งทำให้ผิวของอลูมิเนียมทนต่อการสึกกร่อน และทนต่อการขีดข่วน

อลูมิเนียมสามารถนำไปทำการเชื่อมและบัดกรีได้ดี แต่ไม่สามารถตัดด้วยแก๊สได้เหมือนเช่นเหล็กกล้า ทั้งนี้เพราะจุดไหม้ไฟอยู่สูงกว่าจุดหลอมเหลวมาก อลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิ่มแม่เหล็กดูดไม่ติด และยังใช้เป็นสารเจือให้กับโลหะอื่น เช่น เหล็ก และตัวอย่างการนำไปใช้งานที่

สำคัญ เช่น ชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ ตัวถังรถชนิดต่างๆ ลำตัวเครื่องบิน เรือ มอเตอร์ ห้องเกียร์ พัฒน์ ชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับโรงงานอาหารภาชนะใส่อาหารกรอบประดูกรอบหน้าต่าง อุตสาหกรรมเคมี ถึงความดัน และชิ้นส่วนถ่ายเทความร้อน

ผิวอลูมิเนียมเป็นออกไซด์ได้ง่าย ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งและทำให้ทนต่อการกัดกร่อน จากกรด ด่าง และอากาศ ความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของอลูมิเนียมขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียม ธาตุบางชนิดที่อยู่ในอลูมิเนียม เช่น ทองแดง เหล็ก จะทำให้ความสามารถต่อการทนต่อการกัดกร่อนลดลง ความแข็งของอลูมิเนียมมีค่าต่ำ คือ 15-25 HB ค่าความต้านแรงดึง มีค่า 40-100 MPa ค่าความเค้นคราก 10-80 MPa ค่ายังโมดูลัส 71000 MPa (1/3 ของเหล็ก)

ค่าความต้านแรงดึงของอลูมิเนียม จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน เช่นที่ 200 °Cค่าความต้านแรงดึงจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ค่าความต้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจากการขึ้นรูปเย็น จะลดลงถ้าอลูมิเนียมได้รับความร้อน อลูมิเนียมมีโอกาสเป็นรูพรุนได้ง่ายขณะทำการหล่อ ซึ่งเกิดจากแก๊สไฮโดรเจน และสามารถดูคุณสมบัติต่าง ๆ ของอลูมิเนียม ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอลูมิเนียม

ความหนาแน่น	2.7	กก/ดม ³
จุดหลอมเหลว	658° C	อุณหภูมิกลายเป็นไอ 1800° C
ความร้อนจำเพาะ	(0 – 100° C) 0.2259	แคลอรีกรัม° C
ความต้านทานจำเพาะ	(20° C) 2.699	ไมครอโอห์ม/ซ.ม.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม

ความเค้นแรงดึงสูงสุด	2	กก/มม ²
Elastic Limit	3	กก/มม ²
Modulus of elasticity	7800	กก/มม ²
Hardness	16	H.B.
Elongation	45	%

ประโยชน์ของอลูมิเนียมถูกนำมาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันมากขึ้นเป็นลำดับ เช่น เครื่องใช้ต่าง ๆ ในการหุงต้มอาหาร สายไฟฟ้า กรอบหรือโครงของเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ กระป๋องอาหาร ลำโพงรูป หลอดยาต่าง ๆ ใช้ทำชิ้นส่วนทั้งภายในและภายนอกรถยนต์ บางครั้งต้องการความแข็งแรงสูงแต่ต้องการน้ำหนักเบาก็สามารถทำได้โดยทำเป็นอลูมิเนียมผสมเช่น ชิ้นส่วนของเครื่องบิน ลูกสูบเครื่องยนต์ ฯลฯ

อลูมิเนียมแบ่งออกเป็น 4 เกรด

1) อลูมิเนียม (A_1) 99.99% มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในสถานะของน้ำทะเล มีราคาแพงประโยชน์ใช้ในพวกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการความเข้มสูง ทำให้เกิดการสะท้อนแสงได้อยู่ (Search light or Reflector)

2) อลูมิเนียม (A_2) 99.80% ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพราะมีความเหนียว (ductility) สูงคือสามารถโค้งงอได้เช่นทำ pipe, tube และแผ่นบาง ๆ ห่อหุ้มของ

3) อลูมิเนียม (A_3) น้อยกว่า 99.60% ต้านทานต่อการเกิดกัดกร่อนได้ดีมาก เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการอลูมิเนียมบริสุทธิ์มากนัก เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า สายเคเบิล การส่งถ่ายกระแสไฟฟ้าบางที่ก็เรียกเกรดนี้ว่า E.C. (Electrical conductor)

4) อลูมิเนียม (A_4) 99% ใช้ทำพวกภาชนะใส่อาหารทั่ว ๆ ไป ถังและแผ่นที่ใช้ทำงานทั่ว ๆ ไป ที่เราไม่ต้องการอลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงนัก พวกนี้ก็มีความเหนียวสูงพอควร [6]

2.7.2 ทองแดง Copper (Cu) เป็นโลหะที่ไม่ใช่เหล็กที่ใช้มาก มาเป็นที่สองรองมาจากเหล็ก มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu มีความแข็งตามสเกลของมอห์ (Moh's scale) 2.5 – 3.0 มีจุดหลอมเหลว 1083°C จุดเดือดที่ 2595°C อ่อนตัวที่ 20°C มีความหนาแน่น 8.99 มีความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) 1.71 ที่ 20°C และมีความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ในแนวตั้ง และโดยน้ำหนักที่เด่นมากเป็นรองก็แต่เงินและอลูมิเนียมเท่านั้น มนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์ของทองแดง ทำเครื่องมือสอยและอาวุธต่าง ๆ ตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ที่เรียกว่ายุคสัมฤทธิ์ (Bronzeage) มาตราบนปัจจุบันนี้ทองแดงยังเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาก มาเป็นที่สองรองลงมาจากเหล็กและเป็นโลหะที่สำคัญในกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non – Ferrous Metals) ทองแดงเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีอีกด้วย ดังนั้นทองแดงจึงถูกใช้ทำเป็นส่วนประกอบของหม้อต้มน้ำ เครื่องถ่ายเทความร้อน ฯลฯ คุณสมบัติของทองแดงอีกประการหนึ่งก็คือ มีความต้านทานจำเพาะต่ำ เป็นที่สองรองจากเงิน ปริมาณทองแดงที่ผลิตได้ประมาณครึ่งหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟฟ้าขดลวดที่ใช้ในมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ (Generators) ไฟฟ้า ฯลฯ ความต้านทานจำเพาะของทองแดงที่มีค่าสูงกว่าเงินเพียง

เล็กน้อยและต่ำกว่าอุณหภูมิเยนิมประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ของทองแดงก็คือโลหะสำหรับผสมเป็นโลหะผสม (Alloy) มีหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Brass) ทองบรอนซ์ (Bronze) พวกละหะโมเนล และใช้ทำลวด Thermocouple ชนิด Copper – Constant

ทองแดงและทองแดงผสมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น

- 1) คุณสมบัติต้านทานแรงดึงดี และมีช่วงพิคกกว้าง ทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติอ่อนและเหนียวสามารถรีดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ขนาด 1/500' สามารถดึงเป็นเส้นลวด เล็กๆ ขนาด 1/1000' โดยไม่ขาดทุดีเป็นวัตถุสำเร็จรูปโดยไม่มีการแตกร้า
- 2) ความเหนียวของทองแดงสูงมากสามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
- 3) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก (100 เปอร์เซนต์ แต่เงิน 106 เปอร์เซนต์)
- 4) เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก (100 เปอร์เซนต์ แต่เงิน 108 เปอร์เซนต์)
- 5) กลึงไสขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุอื่นบางตัวเข้าไป
- 6) ต้านทานความล้าได้ดี
- 7) ไม่มีสารแม่เหล็ก
- 8) ทนทานต่อการกัดกร่อนโดยเฉพาะเมื่อใช้กับกรดและน้ำทะเล
- 9) ทดทานต่อการสึกกร่อน (wear resistance)
- 10) มีสีสวยน้ำใช้
- 11) ทองแดงและโลหะผสมทองแดงแทบทุกชนิดสามารถเชื่อมได้อย่างง่ายดาย

โดยทั่วไปเราเรียกโลหะว่าทองแดง (Copper) เมื่อโลหะนั้นเป็นทองแดงเกือบบริสุทธิ์ มีสิ่งแปลกปนอื่น ๆ ผสมปนอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนักและเรียกว่าทองแดงผสมหรือโลหะผสมของทองแดงเมื่อโลหะนั้นมีทองแดง เป็นธาตุที่ผสมอยู่มากที่สุด แต่ไม่น้อยกว่า 40% และไม่สูงกว่า 99% โดยน้ำหนัก และสามารถดูคุณสมบัติต่าง ๆ ของทองแดงดังแสดงได้ในตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองแดง

น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	63.57	
โครงสร้างของผลึก	(FCC)	
มิติของแลตทิซ (oA)	3.6078	(oA = Angstrom) Unit
ความหนาแน่น (20 ° C)	8.94	เท่ากับหน่วยวัดขนาดคลื่นแสง
จุดหลอมเหลว	1083 ° C	เท่ากับหนึ่งในร้อยล้าน
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2595 ° C	ของเซนติเมตร
ความร้อนจำเพาะ (25 ° C)	0.0919 cal/g ° C	(1o A = 10-8 ซม.)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	16.47 x 10-6 ° C	
ความต้านทานจำเพาะ (30 ° C)	1.682	ไมโครโอห์ม/ซม3

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกลของทองแดง

Tensile Strength	17	กก/มม ²
Elastic Limit	10	กก/มม ²
Elongation	35-50	%
Hardness	35-50	H.B.
Modulus of Elasticity	12,000	Kg/mm2

แร่ทองแดงมีหลายชนิด แร่ที่สำคัญ ๆ ได้แก่

- แร่ทองแดงไพไรต์ (CuFeS₂)
- แร่ทองแดงออกไซด์ (Cuprite) Cu₂O สีแดง
- แร่ทองแดงดำ Copper glance (chalcocite) Cu₂S
- แร่ทองแดงคาร์บอเนต CuCO₃ Cu (COH)₂

- แร่ทองแดงบอร์ไนต์ (Cu_2FeS_2)
- แร่ทองแดงโคเวลไปรท์ (CuS)

ประโยชน์ของทองแดง เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติ ductility สูงและมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น Cu ประมาณมากกว่า 50% ใช้ในการทำ Alloy เช่น Brass, Bronze และ Monel และอีกประมาณ 20% ใช้ทำเครื่องมือถ่ายเทความร้อน เช่น Condenser, evaporator และอื่น ๆ

ตัวอย่างของ Cu เช่น คอมพิวเตอร์ ($\text{Cu} + \text{Ag}$) ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์, ปลอกกระสุนระฆัง ($\text{Cu} + \text{Sn}$) สปริงชนิดต่าง ๆ ทำจากบรอนซ์ ดีบุก ผสมฟอสฟอรัส, คาร์บิวเรเตอร์ ($\text{Cu} + \text{Sn} + \text{Zn} + \text{Pb}$) บูชและแปรง เป็นต้น โลหะผสมทองแดง เช่น ท่อกลั่น (condensortube) ปลอกกระสุนปืนดอกกุกญแจ เหยี่ยงกระษาปณ์ เช่น เหยี่ยงบาท และห้าบาท ทองแดงที่ใช้ในงานไฟฟ้าวิญจะต้องมีความบริสุทธิ์มากถึง 99 – 99.9% ถ้าทำให้บริสุทธิ์ 100 เปอร์เซนต์ ต้องใช้วิธีแยกด้วยไฟฟ้าถ้าต้องการความบริสุทธิ์เพียง 99.5% ใช้วิธีหลอมธรรมดาแล้วกวาดด้วยไม้สด [11]

2.7.3 ทองเหลือง (Br) มีจุดหลอมเหลวที่ 1063°C เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็ง (Solid Solution) ปริมาณของสังกะสีที่ละลายได้สูงถึง 39% และถ้าผสมสังกะสีมากกว่านี้จะได้สารประกอบเชิงโลหะระหว่างทองแดงกับสังกะสีอีกหลายชนิด ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียวและคุณสมบัติทนการกัดกร่อน ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไป ตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม

คุณสมบัติเชิงกลของทองเหลืองสังกะสีมีบทบาทอันสำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง โดยเพิ่มทั้งความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งให้กับทองแดง ในช่วงที่สังกะสีสามารถละลายให้สารละลายของแข็งในทองแดง แต่เมื่อเลยขีดการเป็นสารละลายของแข็งไปแล้ว สังกะสีจะให้สารประกอบเชิงโลหะกับทองแดง ซึ่งมีความแข็งและเปราะ ในช่วงนี้ความแข็งแรงกับความเหนียวจะค่อยๆ ลดลง คงจะเพิ่มแต่ความแข็งเท่านั้นจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อผสมสังกะสีประมาณ 40-45% จะได้ความแข็งแรงสูงสุดในสภาพภายหลังการรีด และความเหนียวซึ่งวัดได้โดยหาค่าอัตราการยืดตัว (% elongation) จะขึ้นสูงสุดเมื่อทองเหลืองมีส่วนผสมสังกะสี 25-30% ถ้าเลยขอบเขตอันนี้ความเหนียวจะลดลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลตามปริมาณสังกะสีทำให้ต้องเลือกให้ถูกลักษณะของโลหะผสมในการใช้งานและทองเหลืองได้ชื่อเรียกต่างกันไป ก็เพราะคุณสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.5 [12]

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลของทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีในระดับต่างๆ

ปริมาณสังกะสีใน ทองเหลือง (%)	CDA	สภาพอ่อน ขนาดเกรน 0.05 มม.		สภาพรีดเย็น ขนาด 1/2hard	
		เท น ไ ซ ล์ สเตร้ง (ksi)	ความยืด (%)	เท น ไ ซ ล์ สเตร้ง (ksi)	ความยืด (%)
0	110	32	45	42	14
10	220	37	45	52	11
20	240	44	50	61	18
30	260	47	62	62	23
40	280	54	45	70	15

2.8 การตรวจสอบวัสดุทางโลหะวิทยา (Metallographic Investigation Methods)

2.8.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (macroscope)

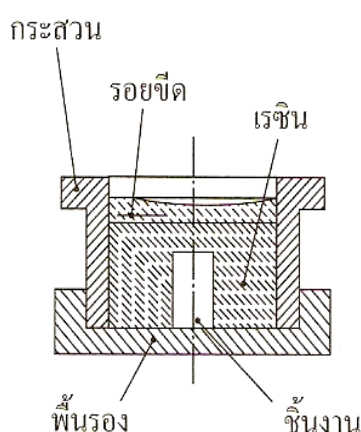
การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการดังนี้ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) สลักฝังในการเชื่อมของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบ (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้นผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบกับเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้

2.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

1) การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาด

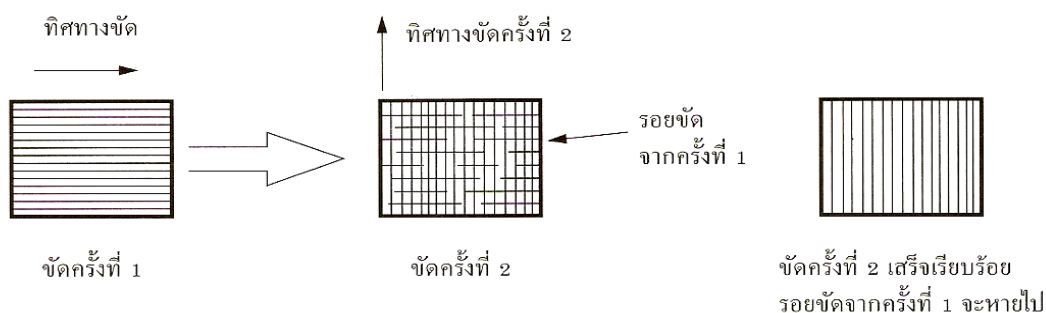
สำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 mm. หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 mm. แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าควรมีขนาด $25 \times 25 \times 20$ mm. ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของ เรซิน นั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเทเรซินหุ้มชิ้นทดสอบ [10]

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ หรือผิวชิ้นงาน ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 240 320 400 600 800 1000 1200 1500 และขัดจนถึงเบอร์ 2000 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [10]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

- การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้เป็น การขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 - 0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

- การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน [10]

2.8.3 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตาให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น

1) ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

- ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าตาเราจะมองเห็น
- ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

2) หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด (Resolution/Resolving power) หมายถึงความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two points of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่ม resolving power และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical aperture of objective lens/NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมากภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม

3) ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

- ลำกล้อง (Body tube) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุ มีหน้าป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกรบกวน
- แขน (Arm) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ยึดระหว่างส่วนลำกล้องกับฐาน เป็นตำแหน่งที่จับเวลาขยกล้อง
- แท่นวางวัตถุ (Specimens stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา
- ที่หนีบสไลด์ (Stage clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกขึ้น
- ฐาน (Base) เป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งกล้อง ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด
- กระจกเงา (Mirror) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟภายในห้องให้ส่องผ่านวัตถุโดยทั่วไปกระจกเงามี 2 ด้าน ด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสะดวกและชัดเจน
- เลนส์รวมแสง (condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา
- ไดอะแฟรม (diaphragm) อยู่ใต้เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ
- ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อทำให้เห็นภาพชัดเจน
- ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพ ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น

- เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จะติดอยู่กับจานหมุน (Revolving nose piece) ซึ่งจานหมุนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3-4 ระดับ คือ 4x 10x 40x 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ
- เลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ[9]

4) ประเภทของกล้องจุลทรรศน์

- กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิด คือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตาโดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วขึ้นมาที่เลนส์จนเห็นภาพที่บนวัตถุอย่างชัดเจน
- กล้องที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ เป็นกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพแบบ 3 มิติใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่ค่าแปล่าไม่สามารถแยกรายละเอียดได้จึงต้องใช้กล้องชนิดนี้ช่วยขยาย กล้องชนิดนี้มีข้อแตกต่างจากกล้องทั่วไป คือ ภาพที่เห็นเป็นภาพเสมือนมีความชัดลึกและเป็นภาพสามมิติ เลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายต่ำ (น้อยกว่า 1 เท่า) และใช้ศึกษาได้ทั้งวัตถุโปร่งแสงและวัตถุทึบแสง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ [13]

2.9 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง

การทดสอบโดยการดึง เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุดในทุกวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถที่จะให้ผลที่เป็นคุณสมบัติทางพื้นฐาน

พอสมควร เช่น ให้ผลเกี่ยวกับ ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว ความเหนียว ความเปราะ และ ลักษณะการแตกหักของวัสดุ ซึ่งนับว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป โดยทั่วไปการทดสอบก็ต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงขั้นทดสอบให้ยืดออก และขาดไปในที่สุด สำหรับการทดสอบโดยการดึงนั้นนิยมนำมาทดสอบกับวัสดุที่มีคุณสมบัติความเหนียวมากกว่าวัสดุเปราะ

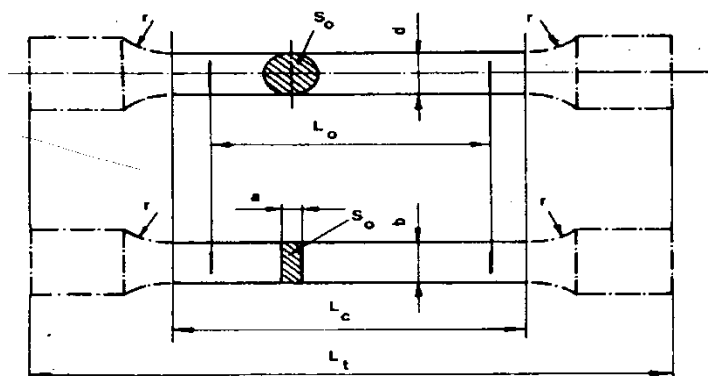
การที่จะเลือกทำการทดสอบแรงดึงอย่างไรนั้นมีความเหมาะสมมากกว่ากันนั้น เราจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

1) ความเหมาะสมของวัสดุที่เรา กำลังจะทดสอบ เช่น โลหะมักจะถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเพื่อรับแรงดึง เพราะมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ดังนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะจะถูกทดสอบแรงดึง แต่ในวัสดุเปราะบางประเภท เช่น คอนกรีตและอิฐ เป็นต้น จะมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกดอัด ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการรับแรงกดอัด และมักจะถูกทดสอบโดยการทดสอบแรงกดอัด

2) ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด เช่น ไม้เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่ค่อนข้างสูง แต่ไม้ไม่สามารถนำมาใช้ในโครงสร้างรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดเชื่อมต่อได้ง่าย ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของไม้จึงได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบแรงดึง

3) ความยากและความซับซ้อนในการจับยึดตัวอย่างทดสอบ

2.9.1 ชิ้นทดสอบ (Specimens) โดยการดึงนั้น จะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบคือ อาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือในกรณีพิเศษอาจจะเป็นรูปอื่นก็ได้ สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะส่วนมากจะเตรียมโดยการกลึงให้มีพื้นภาคตัดขวางกลม หรืออาจจะเตรียมให้มีพื้นที่ภาคตัดขวาง สี่เหลี่ยมมุมฉากก็ได้ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.29

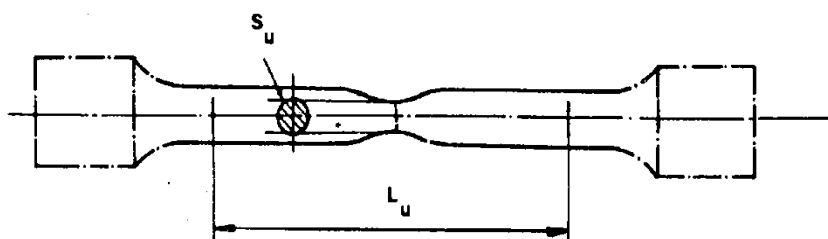


รูปที่ 2.29 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดขวางกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก [12]

2.9.2 ส่วนสำคัญต่างๆ ของชิ้นทดสอบ

1) ความยาวพิักัด (Gauge length) หมายถึง ความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้น 2 จุด ในส่วนที่ขนานกันของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้หาความยืดระหว่างการทดสอบ

- ความยาวพิักัดเดิม (L_0) หมายถึง ความยาวพิักัดก่อนการทดสอบ
- ความยาวพิักัดสุดท้าย (L_u) หมายถึง ความยาวพิักัดหลังจากชิ้นทดสอบถูกดึงให้ขาด แล้วนำส่วนที่ขาด แล้วนำส่วนที่ขาดมาวางต่อเข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรงเดียวกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดขวางกลมหลังจากขาด [12]

ความยาวพิักัดสำหรับเครื่องวัดความยืด (Extensometer gauge length, L_e) หมายถึง ความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้น 2 จุด ในส่วนขนานของชิ้นทดสอบ ใช้สำหรับวัดการยืดโดยเครื่องวัดการยืดความยาวนี้อาจจะแตกต่างจากความยาวพิักัดเดิม (L_0) และอาจจะมีค่าใดก็ได้ที่มากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) หรือความกว้าง (b) ของชิ้นทดสอบ แต่ต้องน้อยกว่าความยาวของส่วนขนาน (L)

2.9.3 ชิ้นทดสอบมาตรฐาน (Standard specimen) ชิ้นทดสอบต่างๆ ที่มีรูปทางเรขาคณิตคล้ายกัน และมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพิักัดและพื้นที่ภาคตัดขวางตามที่กำหนดไว้เรียกว่า ชิ้นทดสอบได้สัดส่วนสำหรับชิ้นทดสอบโดยการดึงก็จัดไว้ในประเภทของชิ้นทดสอบได้สัดส่วนเหมือนกัน และก็มีขนาดกำหนดตามมาตรฐาน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.6 ขนาดชิ้นทดสอบโดยการดึงมีภาคตัดขวางกลม

Test Diameter d (mm)	Test cross- sectional area S_0 (mm ²)	Gauge Length L_0 (mm)	Minimum parallel length L_c (mm)	Minimum radius at shoulder		
				Wrought metals and cast steel (mm)	Other cast metals (mm)	Tolerance on diameter (mm)
25-23	500	125	140	25	50	0-15
22-6	400	113	124	23-5	47	0-125
20	314	100	110	22	44	0-10
16	200	80	88	15	30	0-08
14	154	70	77	12	25	0-07
11-3	100	56-5	62	10	20	0-055
10	78-5	50	55	9	18	0-05
8	50	40	44	7-5	15	0-04
7	38-5	35	38-5	6	13	0-035
5-64	25	28-2	31	5	12	0-030
5	19-6	25	27-5	5	11	0-025
3	7-07	15	16-5	4	8	0-015

ตารางที่ 2.7 ขนาดชิ้นทดสอบโดยการดึงมีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉาก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ความกว้าง b	ความยาวพิคัด L_0	รัศมีต่ำสุดของบ่าขึ้นทดสอบ R	ความยาวรวโดยประมาณ L_t
3	12	6	50
6	24	12	100
12.5	50	25	200
25	100	25	300

2.9.4 การเตรียมชิ้นทดสอบ นับว่าเป็นสิ่งสำคัญมากต่อความถูกต้อง แม่นยำ ของผลการทดสอบ กล่าวคือ ถ้ารูปร่างของชิ้นทดสอบไม่ได้สัดส่วนและขนาดที่ถูกต้อง ก็จะเป็นผลทำให้แรงทดสอบส่งแรงกระทำไม่ได้ตามแนวแกนแรงของชิ้นทดสอบจริงๆ ดังนั้นการเตรียมชิ้นทดสอบจึงมีข้อควรพิจารณาดังนี้

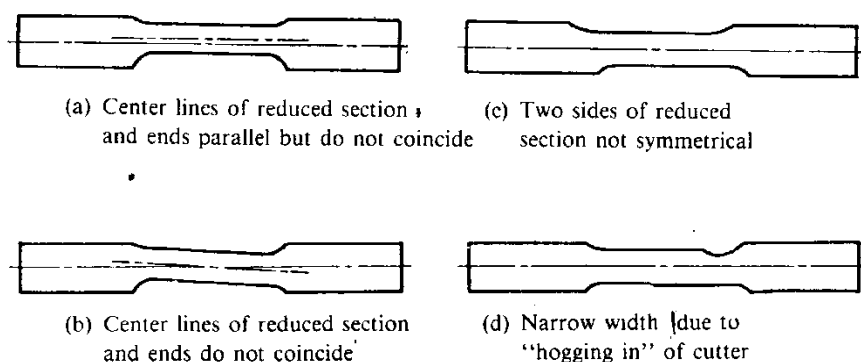
1) การตัดชิ้นทดสอบออกจากชิ้นตัวอย่าง ต้องระวังการเสียดสี และให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด ในส่วนที่จะนำไปใช้ทดสอบ ควรหลีกเลี่ยงการตัดด้วยเปลวไฟ วิธีที่ดีที่สุดคือ ใช้เลื่อยตัด และมีการระบายความร้อนด้วย

2) ทิศทางในแนวแกนของชิ้นทดสอบ ให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดว่าด้วยวัสดุของมาตรฐานผลิตภัณฑ์นั้นๆ ถ้าทิศทางของแนวแกนไม่ได้ระบุไว้ ให้ตัดชิ้นทดสอบโดยมีแนวแกนตามความยาวตั้งฉากกับทิศทางของการรีดเหล็กครั้งสุดท้าย

3) ผิวของชิ้นทดสอบต้องมีการตกแต่งโดยเครื่องมือกล จะต้องระวังไม่ให้เกิดความร้อนเกินไป หรือเกิดความแข็งโดยทางกล ขอบที่คมต้องลบให้มนและไม่ให้มีรอยเครื่องมือ หรือร่องตามแนวขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดสัมผัสระหว่างส่วนโค้งของบ่ากับความยาวส่วนขนาน

4) การทำเครื่องหมายความยาวพิคัด เพื่อความสะดวกในการทดสอบอาจทำเครื่องหมายบนผิวชิ้นทดสอบเป็นเส้นขนานกับแกนยาว ถ้าเป็นชิ้นทดสอบแบนให้ขีดที่กึ่งกลางความกว้างชิ้นทดสอบ โดยขีดเป็นเส้นบางๆ ไม่ควรทำเครื่องหมายเป็นรอยลึกในเนื้อเหล็กสำหรับเหล็กที่ไวต่อการแตกร้าวเมื่อมีรอยบาก

5) ในการเตรียมชิ้นทดสอบแบบ อาจจะมีข้อผิดพลาดที่ควรระวังเสมอ ดังแสดงได้
ในรูปที่ 2.31



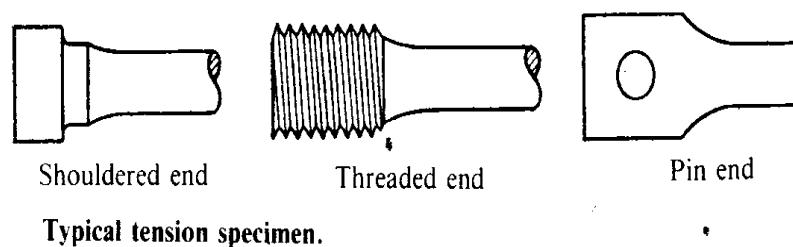
รูปที่ 2.31 ข้อผิดพลาดสำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแบบ [12]

จากรูป จะเห็นว่าข้อผิดพลาดสำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแบบในหลายลักษณะ
แต่ละรูป คือ

- (a) เส้นศูนย์กลางของส่วนขนานและปลายยึดของชิ้นทดสอบขนานกัน แต่ไม่
ทับกัน
- (b) เส้นศูนย์กลางของส่วนขนานและปลายยึดของชิ้นทดสอบไม่ทับกัน
- (c) ด้านทั้งสองของส่วนขนานไม่สมมาตรกัน
- (d) เกิดร่องแคบตามแนวขวางระหว่างส่วน โค้งของปากกับความยาวเส้นขนาน
ขนาน เนื่องจากอุปกรณ์ตัด

2.9.5 ลักษณะการยึดชิ้นทดสอบ โดยการดึงนั้น จะต้องยึดด้วยวิธีเหมาะสม ว่าจะใช้
อุปกรณ์ใดยึดชิ้นทดสอบ และวิธีไหนจึงจะสะดวก ข้อสำคัญในการยึดชิ้นทดสอบ คือต้องพยายาม
อย่างดีที่สุดที่จะให้แรงทดสอบกระทำอยู่ในแนวแกนของชิ้นทดสอบ และจะต้องมีความแน่ใจด้วย
ว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจนชิ้นทดสอบขาด

สำหรับวิธียึดชิ้นทดสอบมีอยู่หลายวิธี เช่น ใช้ลิ่มยึด เกลียวยึด ปากยึด โดยแต่ละวิธี
ยึดชิ้นทดสอบนั้นจะต้องไม่เกิดการบิดแกว่ง หรือเกิดการดัดโค้งขณะที่ทำการทดสอบ ดังนั้นตรง
ปลายยึดชิ้นทดสอบจึงต้องมีการเตรียมให้มีรูปร่างลักษณะยึดตามวิธีที่เหมาะสม ดังแสดงได้ในรูปที่

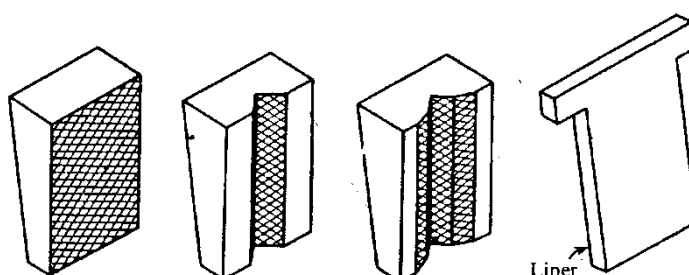


รูปที่ 2.32 ลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง [12]

จากรูป จะเห็นว่าลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบจะถูกเตรียมได้หลายแบบ ดังนี้คือ

- ปลายยึดแบบป้า (Shouldered end)
- ปลายยึดแบบเกลียว (Thread end)
- ปลายยึดแบบเจาะรูใส่สลัก (Pin end)

อุปกรณ์สำหรับการยึดชิ้นทดสอบนั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมหรือสะดวกต่อการใช้ และสะดวกต่อการเตรียมปลายยึดชิ้นทดสอบนั้นก็คือ ลิ่มยึด (wedge grips) การยึดด้วยวิธีใช้ลิ่มนั้นเหมาะสำหรับกับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะเหนียวมากกว่าโลหะเปราะ เพราะการยึดชิ้นทดสอบจะทำให้ผิวแตกและอาจจะเกิดการดึงขาดใกล้บริเวณที่จับยึดชิ้นทดสอบก็ได้ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.33



Wedge-grip units for tension tests of metals.

รูปที่ 2.33 ลักษณะลิ่มยึดที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง [12]

2.9.6 การทดสอบชิ้นทดสอบอันดับแรกต้องมีการวัดขนาดชิ้นทดสอบก่อนทดสอบ ขนาดของ $\phi d_0 < 10\text{mm}$ ให้ค่าผิดพลาดได้ 0.01 mm ขนาด $\phi d_0 > 10\text{mm}$ ให้ค่าผิดพลาดได้ 0.1 mm

ชิ้นงานที่เป็นผิวรีดขนาดผิดพลาดได้ 0.1 mm ชิ้นงานที่ไม่เป็นหน้าตัดทรงกระบอกกลม หรือไม่เป็นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ให้ขนาดผิดพลาดได้สูงสุด 1% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าความเร็วความเค้นในการทดลองแรงดึง สำหรับเหล็กกล้าและโลหะไม่ใช่เหล็ก

วัสดุ	ความเร็วความเค้นสูงสุดในช่วงยืดหยุ่น		
	ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง	สูงกว่าอุณหภูมิห้อง
เหล็กกล้า	ตามแต่ตกลง	30 N/mm ² .s	10 N/mm ² .s
โลหะไม่ใช่เหล็ก	ตามแต่ตกลง	10 N/mm ² .s	10 N/mm ² .s

ความเร็วการยืดตัวในการหาจุดครากตัวล่าง (R_{eL}) ที่อุณหภูมิห้องจะให้ไม่เกิน 15% ต่อนาที สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ให้ความเร็วการยืดตัวสูงสุดไม่เกิน 40% ต่อนาที

$$\text{ความยืด } A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \times 100 \text{ หน่วย } \% \quad (2.1)$$

L_0 = ความยาวก่อนดึง, mm

L_u = ความยาวหลังดึงขาด, mm

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่น } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ หน่วย N/mm}^2 \quad (2.2)$$

σ = ความเค้นดึง, N/mm²

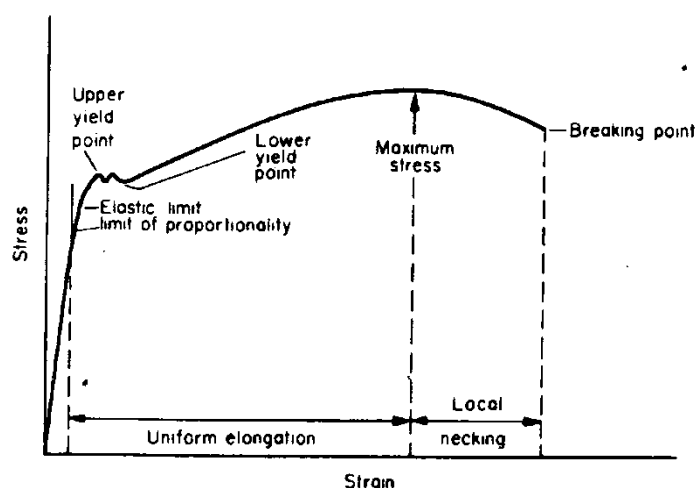
$$\varepsilon = \text{ส่วนที่ออก} = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

L = ความยาวที่ยืดออก, mm

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า $E = 21.10^4 \text{ N/mm}^2$

2.9.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ในการทดสอบโดยการดึงนั้น จะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดในชิ้นทดสอบ แล้วก็นำค่าทั้งสองนี้มาเขียนแผนภาพ โดยให้ค่าทางแกนนอนแทนความเครียด แกนตั้งแทนความเค้น แผนภาพความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain diagram) แต่ในการทดสอบจริงนั้น แผนภาพที่เขียนจากเครื่องทดสอบจะเป็นแผนภาพของแรงกับการยืด ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแผนภาพความเค้นกับความเครียด

สำหรับแผนภาพความเค้นกับความเครียด จะมีส่วนต่างๆ ที่สำคัญแสดงถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นช่วงๆ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็ก [12]

1) พิกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional limit) หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับไว้ได้ โดยที่ความเค้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ดังนั้นกราฟในช่วงแรกนี้จะเป็นเส้นตรง และวัสดุยังคงลักษณะตามกฎของฮุก

2) พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) หมายถึง พฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับความเค้นซึ่งอยู่ภายในช่วงของการคืนรูป ไม่เกิดการแปรรูปอย่างถาวร คือเมื่อปล่อยแรงดึง วัสดุก็จะหดกลับสู่สภาพเดิม ในการทดสอบบางครั้งการที่จะกำหนดพิกัดความยืดหยุ่นในกราฟทำได้ยาก เพราะโลหะหรือวัสดุบางชนิดจะมีพิกัดความยืดหยุ่นเกือบจะเป็นตำแหน่งเดียวกันในกราฟ แต่โดยส่วนมากแล้วพิกัดความยืดหยุ่นจะอยู่เหนือพิกัดความเป็นสัดส่วนเล็กน้อย

3) จุดคราก (Yield point) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำเกินพิกัดความยืดหยุ่น ก็จะเกิดการแปรรูปอย่างถาวรจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้วัสดุแปรรูปได้ง่ายคือ อัตราการยืดตัวจะสูงกว่าตอนแรก เมื่อเป็นเช่นนี้วัสดุจะแปรรูปทั้งๆ ที่ความเค้นคงที่จึงเรียกจุดนี้ว่าจุดครากบน (upper yield point) สำหรับเหล็กกล้าแล้วในช่วงนี้จะมีอัตราการยืดตัวสูงมาก เร็วกว่าแรงดึงขณะทดสอบจะเพิ่มขึ้นได้ทัน จึงเหมือนว่าการดึงในช่วงนี้ใช้แรงดึงน้อยกว่าเดิม จึงมีจุดครากล่าง (lower yield point) ใน

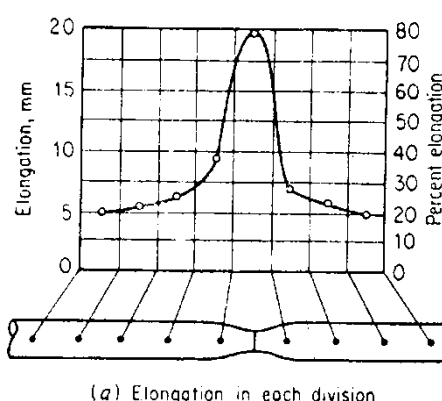
แผนภาพดังรูป ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวมาก เช่น เหล็กกล้าหรือ อลูมิเนียม เท่านั้น

2.9.8 ข้อควรสังเกตสำหรับการทดสอบโดยการดึง

ในขณะทำการทดสอบโดยการดึงกับเครื่องทดสอบที่มีการทำงานอัตโนมัติ ก็จะสะดวกต่อการบันทึกข้อมูลได้ถูกต้อง แต่ถ้าทำการทดสอบกับเครื่องมือแบบง่ายๆ ธรรมดา ก็ต้องใช้ข้อสังเกตหลายอย่าง เช่น ความเร็วในการทดสอบความเค้น ความเครียด ค่าความยืด การลดลงของพื้นที่หน้าตัด ความแข็งแรงดึงสูงสุด และรอยแตกหักหรือขาดของชิ้นทดสอบ เป็นต้น

1) ความยืด (Elongation) ความยืดของชิ้นทดสอบภายหลังที่ถูกดึงจนขาดแล้ว วัดได้จากการนำชิ้นทดสอบมาวางต่อเข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรง แต่ต้องพิจารณาถึงตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบขาดด้วย คือ ถ้าขาดใกล้กับส่วนปลายยืดชิ้นทดสอบซึ่งจะไม่อยู่ในช่วงความยาวพิคกิ้งก็ต้องทำการทดสอบใหม่ และถ้าขาดในช่วงต่าง ๆ ของความยาวพิคกิ้ง ก็ให้วัดความยืดโดยประมาณ

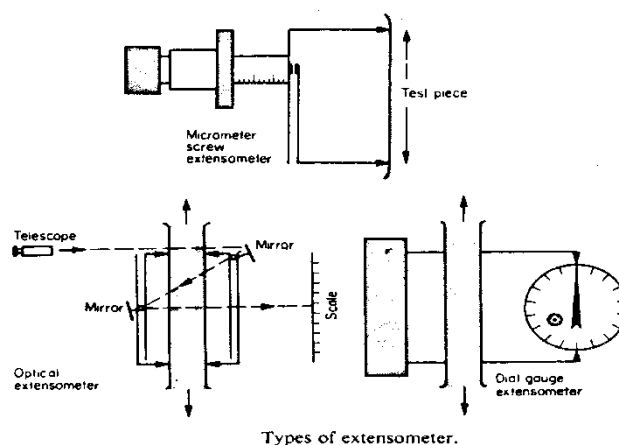
จากการทดสอบโดยการดึงโลหะเหนียวนั้น ส่วนมากเปอร์เซ็นต์ความยืดหรือความยืดจะเกิดขึ้นมากตรงบริเวณจุดขาดของชิ้นทดสอบ เพราะโลหะเหนียวจะถูกดึงยืดออกจนเกิดคอคอดแล้วก็ขาดในที่สุด สำหรับความยืดของแต่ละช่วงบนความยาวพิคกิ้งชิ้นทดสอบที่เป็นเหล็กกล้า จะมีลักษณะ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ความยืดในแต่ละช่วงบนความยาวพิคกิ้ง [12]

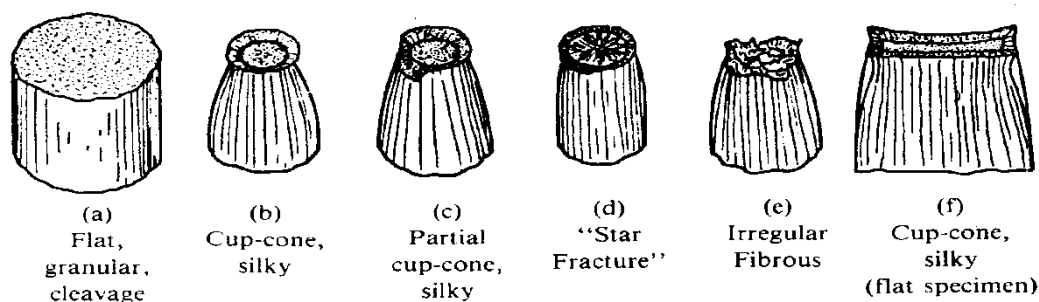
ในการทดสอบโดยการดึงนั้น ถ้าต้องการวัดความยืดให้ได้ผลที่ถูกต้องแน่นอนก็ต้องใช้อุปกรณ์วัดการยืด เรียกว่า เครื่องวัดการยืด (extensometers) เครื่องนี้จะถูกนำไปประกบกับชิ้นทดสอบตรงส่วนที่เป็นความยาวพิคกิ้งสำหรับเครื่องวัดการยืด จากรูปจะเห็นว่าเครื่องวัดการยืด

มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ และทุกแบบนี้จะต้องมีความไวในการวัดความยาวพิสัยของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ตาม เครื่องวัดการยืดโดยทั่วไปจะเป็นแบบไมโครมิเตอร์วัดหรือแบบอ่านค่าความยืดจากนาฬิกาวัด หรือแบบโลหะสองแท่งประกบกันแล้วมีกระจกสะท้อนแสง ซึ่งเครื่องวัดการยืดแบบนี้สามารถอ่านได้ละเอียดมาก ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ชนิดของเครื่องวัดการยืด [12]

2) ลักษณะรอยแตกขาดของชิ้นทดสอบ โดยทั่วไปลักษณะรอยแตกขาดของชิ้นทดสอบภายหลังการดึง มีอยู่ด้วยกันหลายแบบและหลายลักษณะด้วยกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ลักษณะรอยแตกขาดของชิ้นทดสอบแบบต่างๆ [12]

สำหรับโลหะบางชนิดจะมีรอยแตกขาดภายหลังการทดสอบที่แน่ชัด เช่น เหล็กกล้าจะมีรอยแตกขาดแบบถ้วยและกรวย (cup-cone) เหล็กหล่อจะมีลักษณะรอยแตกขาดแบบหน้าราบ (flat) และโลหะที่ผ่านการทำงานเย็น หรือโลหะที่มีความเค้นหลงเหลือภายใน เนื่องจาก

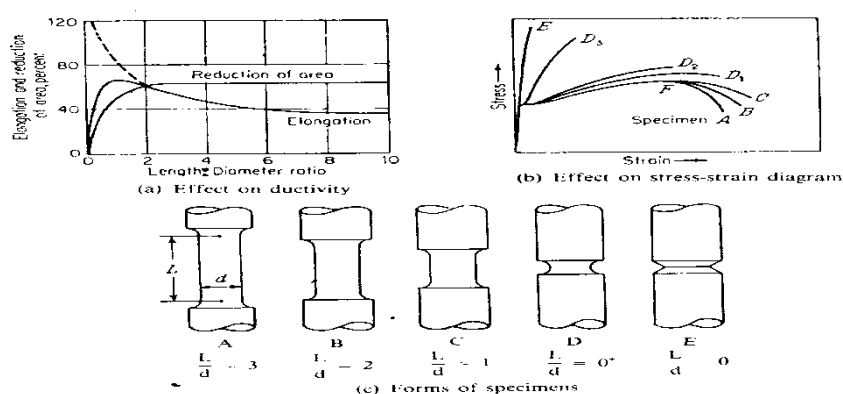
ผ่านกระบวนการอบชุบมาจะมีลักษณะรอยแตกขาดแบบ star fracture ดังรูป d เหตุนี้เองการพิจารณาลักษณะรอยแตกขาดของชิ้นทดสอบก็พอที่จะทำนายได้ว่า โลหะใดเหนียวหรือเปราะ หรือมีความแข็งแรงต่ำ บางครั้งโลหะจะมีรอยแตกขาดที่ไม่สมมาตรกัน อันเนื่องมาจากแรงทดสอบไม่ได้กระทำตามแนวแกนชิ้นทดสอบ หรืออาจจะเกิดจากโลหะมีความบกพร่องต่างๆ อยู่ภายใน เช่น รูพรุน สแตก และสิ่งเจือปน เป็นต้น

2.9.9 ผลกระทบอื่นที่มีต่อผลการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดสอบโดยการดึง ก็เพื่อต้องการทราบผลการทดสอบซึ่งแสดงคุณสมบัติของวัสดุ แต่ในบางครั้งผลทดสอบที่ได้อาจเปลี่ยนแปลงไป ทั้งๆ ที่วัสดุนั้นมีคุณภาพหรือมีเนื้อเดียวสม่ำเสมอจนตลอดชิ้นทดสอบ การที่เป็นเช่นนี้ก็อาจเนื่องจากผลกระทบอื่น เช่น เปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างชิ้นทดสอบ หรือเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดสอบ หรืออุณหภูมิที่ขณะทำการทดสอบ เป็นต้น และผลกระทบอื่นที่มีผลต่อการทดสอบโดยการดึงนั้น พอสรุปได้ดังนี้

1) เปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างชิ้นทดสอบ จากการทดลองกำหนดให้ชิ้นทดสอบมีความยาวพิคัด $L_0 = k \sqrt{S_0}$ เมื่อ S_0 คือ พื้นที่ภาคตัดขวางเดิมในความยาวพิคัด และ k คือค่าคงที่สำหรับชนิดของชิ้นทดสอบความยืด ก็จะมีค่าคงที่ด้วย ชิ้นทดสอบมาตรฐานโดยทั่วไปจะกำหนดความยาวพิคัด $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ หรือ $L_0 \approx 5d$ นั้นเองแต่จากการเตรียมชิ้นทดสอบโลหะเหนียวชุดหนึ่งให้มีอัตราส่วนความยาวพิคัดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) มีค่าต่างๆ กัน แล้วศึกษาว่าอัตราส่วน L/d ดังกล่าวจะมีผลต่อทั้งความยืดและการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงได้ในรูปที่

2.38



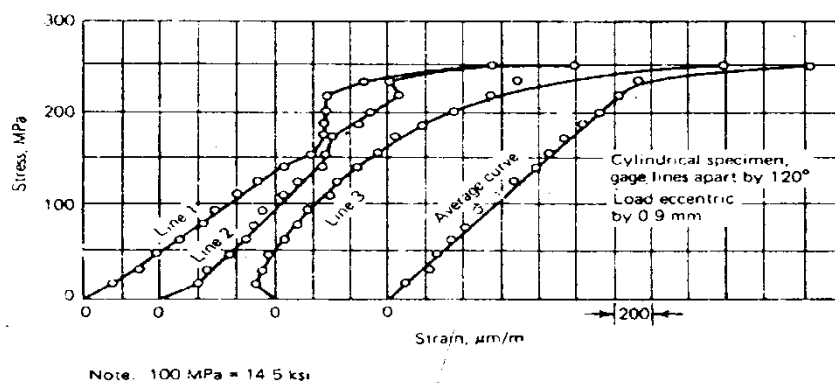
รูปที่ 2.38 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและความเหนียวเมื่อเปลี่ยนรูปร่างชิ้นทดสอบ [12]

จากรูป a จะเห็นว่าสำหรับค่า L/d ที่มีค่ามากกว่า 2 จะไม่มีผลกระทบต่อ ทั้งการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและความยืด แต่ถ้าค่า L/d มีค่าน้อยกว่า 2 จะทำให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดและความยืดลดลงมาถึงศูนย์ เปอร์เซ็นต์ความยืดไม่มีโอกาสสูงขึ้นตามเส้นโค้งประได์เลย ซึ่งหมายความว่าผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านการเหนียวนั่นเอง

สำหรับรูป b ถ้าอัตราส่วน L/d มีค่ามากกว่า 1 จะไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงสูงสุด (maximum strength) ที่จุด F แต่จะมีผลกระทบต่อส่วนโค้งที่ถัดจากจุด F ไป คือ ถ้าอัตราส่วน L/d ยิ่งมีค่าน้อยหรือขึ้นทดสอบมีความยาวพิคัดน้อย ส่วนโค้งที่ถัดจากจุด F จะสูงขึ้น นั้นหมายถึงความแข็งแรงที่จุดวัสดุแตกหัก (breaking strength) จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะขึ้นทดสอบที่มีอัตราส่วน $L/d = 0$ จะทำให้แผนภาพความเค้น-ความเครียด เหมือนกับเส้นกราฟ E ซึ่งแสดงพฤติกรรมโลหะเปราะ คือ เกิดการยืดหรือเปลี่ยนแปลงรูปไปได้เล็กน้อยก็จะขาดออกจากกัน

สำหรับรูป c จะเห็นว่าอัตราส่วน $L/d = 0$ นั้นจะไม่ใช้ความยาวพิคัด แต่กลับจะเป็นร่องบาก (notch) บนชิ้นทดสอบ ร่องบากนี้จะเป็บริเวณรวมของความเค้น (stress concentration) ซึ่งจะทำให้เกิดการขาดที่ร่องบากนี้ ชิ้นทดสอบที่มีลักษณะนี้นั้น เวลานำไปทดสอบจะสามารถรับความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้น แต่ความยืดจะลดลงทั้งที่เป็นวัสดุหรือโลหะเหนียว ตัวอย่างในการทดสอบ โดยการดึงเหล็กกล้าคาร์บอนผสมสูง ที่ถูกเตรียมเป็นชิ้นทดสอบมาตรฐาน ผลการทดสอบพบว่ามีความต้านทานแรงดึงสูงสุด 703 MPa แต่ถ้าเตรียมชิ้นทดสอบให้มีลักษณะเป็นร่องบากสี่เหลี่ยม ขนาดร่องกว้าง 0.8 มม. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานร่องบาก เท่ากับชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน ภายหลังการทดสอบพบว่ามีการต้านแรงดึงสูงเพิ่มขึ้นกว่าเดิมเป็น 1124 MPa แต่สำหรับโลหะเปราะนั้นร่องบากที่เตรียมบนชิ้นทดสอบนั้นกลับจะเป็นเหตุทำให้ถูกลดความแข็งแรงลงไป

2) การเอียงศูนย์ (Eccentricity) หมายถึงขณะที่ทำการดึงชิ้นทดสอบในบางครั้งการจับชิ้นทดสอบไม่ถูกต้อง ก็จะเป็นผลทำให้ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบกระจายไม่ทั่วทั้งพื้นที่ภาคตัดขวาง เนื่องจากแรงดึงไม่สามารถกระทำตามแนวแกนชิ้นทดสอบได้และก็จะทำให้พิคัดความเป็นสัดส่วนในแผนภาพความเค้น - ความเครียด ที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 ผลกระทบของการให้แรงดึงเอียงศูนย์ต่อความเครียด [12]

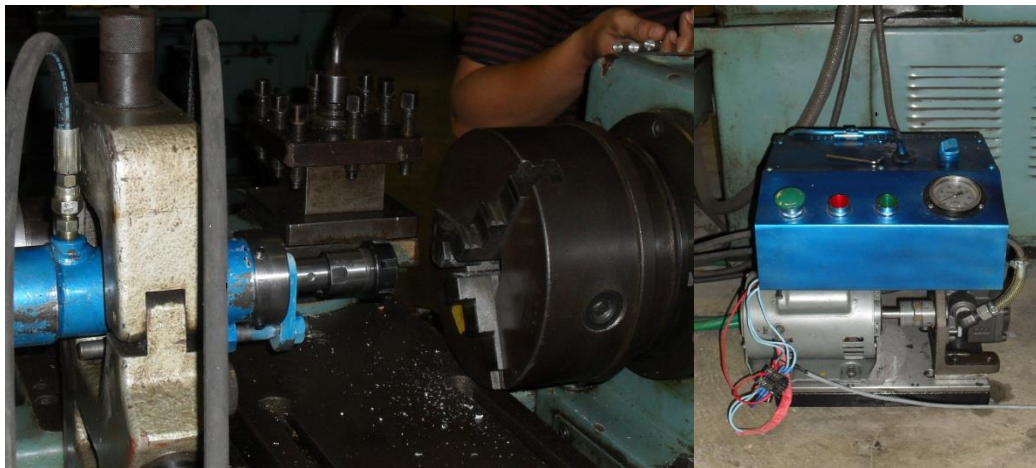
ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุจะต้องมีความระมัดระวังมาก คือ อย่าให้เกิดการดึงอย่างเอียงศูนย์ขึ้นขณะทำการทดสอบเป็นอันขาด เพราะจะทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดไปได้ การเอียงศูนย์ขณะดึงนั้นจะไม่มีผลกระทบต่อน้ำหนักของโลหะเหนียว แต่จะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโลหะเปราะมากกว่า [12]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบเครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องจักรที่สามารถหาได้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ในการทดลองครั้งนี้จะใช้เครื่องกลึงแนวนอนในการทดลองโดยประยุกต์เอาหลักการเครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมาใช้กับเครื่องกลึงแนวนอนโดยใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการให้แรงดันในการเชื่อมสามารถแสดงให้เห็นได้ ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

อุปกรณ์ที่จะต้องสร้างขึ้นและมีความสำคัญมากกับการทดลองครั้งนี้ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าแรงดันในการเชื่อมออกมา ซึ่งจะออกแบบเป็นระบบไฮดรอลิกส์เพื่อให้แรงดันมากพอ และสามารถทราบขนาดของแรงดันขณะทำการทดสอบกับ วัสดุทดสอบอลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองแดง

3.1.1 ชุดควบคุมไฮดรอลิกส์

ชุดควบคุมและไฮดรอลิกส์ ทำขึ้นมาเพื่อ ควบคุมแรงดันของกระบอกไฮดรอลิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งสามารถวัดค่าได้สูงสุด 343N/m^2 โดยมีเกจวัดค่าแรงดันที่

สามารถปรับตั้งค่าของแรงดันได้ตามที่ต้องการ ในการเชื่อมวัสดุและสามารถควบคุมได้ทั้งการเคลื่อนที่เข้าและเคลื่อนที่ออกของกระบอก โดยปุ่มสวิตช์สี่เหลี่ยมด้านซ้ายมือ เป็นปุ่ม เปิด-ปิด สวิตช์สี่เหลี่ยมด้านขวาและสวิตช์สี่เหลี่ยมด้านซ้ายมือเคลื่อนที่เข้า ในการทดลองครั้งนี้จะกำหนดแรงในการเชื่อมไว้ที่ 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 และ 235N/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมไฮดรอลิกส์

3.1.2 กระบอกไฮดรอลิกส์

กระบอกไฮดรอลิกส์ได้มีการออกแบบทำขึ้นมาเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องกลึงได้ โดยการเชื่อมเหล็กติดด้านหลังของกระบอก แล้วทำการกลึงเรียบเอียง 3 องศา เพื่อให้สามารถสวมเข้ากับศูนย์ท้ายแท่นเครื่องกลึงได้ ส่วนแกนกระบอกไฮดรอลิกส์ ได้ทำการปรับปรุงตัวจับยึดวัสดุในการเชื่อมโดยนำ Collect Milling ซึ่งสามารถจับชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ได้ และมีการออกแบบทำเดือยล็อกแกนไม่ให้หมุนตามเมื่อทำการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบอกไฮดรอลิกส์

3.1.3 ตัวกันสะท้าน

ตัวกันสะท้าน จะสามารถช่วยลดการสะท้านของกระบอกไฮดรอลิกส์ ในขณะที่ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เนื่องจากกระบอกไฮดรอลิกส์ มีขนาดยาวและยื่นออกมาพอสมควรซึ่งแน่นอนว่าเมื่อวัตถุมีการเสียดสีย่อมมีการสะท้านเกิดขึ้นแน่นอน และยังให้แรงในการเชื่อมมากยิ่งขึ้น สะท้านมากขึ้นตามลำดับ จึงได้มีการนำตัวกันสะท้านมาช่วยในการทำงาน เพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างมีคุณภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวกันสะท้าน

3.1.4 เครื่องกลึงแนวนอนรุ่น SN 40C TOS TRENCIN

เครื่องกลึงแนวนอนจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เครื่องกลึงที่ใช้จะต้องมีเบรกที่สามารถหยุดหัวจับเครื่องได้โดยใช้ระยะเวลาในการหยุดน้อยที่สุด เครื่องกลึงที่ใช้มีลักษณะ ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกลึงแนวนอน

3.2 ขั้นตอนการสร้าง / ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การสร้างชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม มาขึ้นรูปตามแบบที่กำหนดเอาไว้ดังแสดง
ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบ ทองเหลือง อลูมิเนียม และทองแดง

ตารางที่ 3.1 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดของแรงดึง

ชิ้นงาน แรงดัน(N/m ²)	จำนวนชิ้นงานทดสอบ		
	Al+Cu	Al+Br	Al+Al
147	3	3	3
176	3	3	3
206	3	3	3
235	3	3	3
รวม	12	12	12

ตารางที่ 3.2 จำนวนชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมทั้งหมด

ชิ้นงาน แรงดัน(N/m ²)	จำนวนชิ้นงานทดสอบ		
	Al+Cu	Al+Br	Al+Al
147	3	3	3
176	3	3	3
206	3	3	3
235	3	3	3
รวม	12	12	12

ตารางที่ 3.3 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงาน แรงดัน(N/m ²)	จำนวนชิ้นงานทดสอบ		
	Al+Cu	Al+Br	Al+Al
147	3	3	3
176	3	3	3
206	3	3	3
235	3	3	3
รวม	12	12	12

ดังนั้นจำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งสิ้น 108 ชิ้น

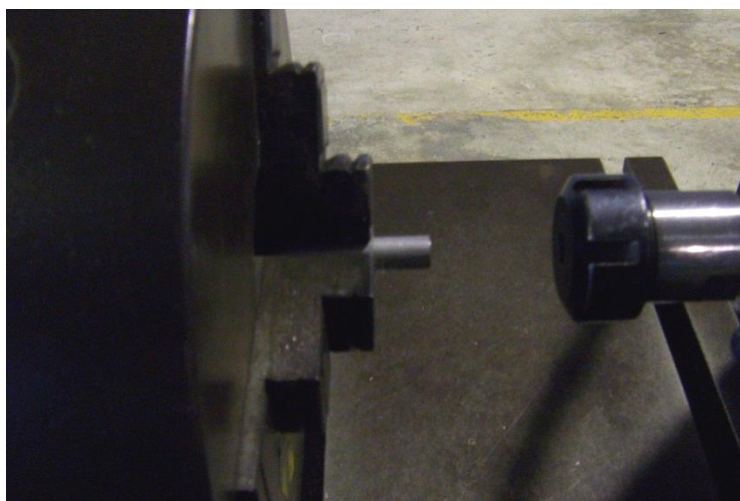
3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ติดตั้งชุดให้แรงดันให้ได้ระยะที่พอดีในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและใช้ตัวกันสะท้อนในการประกอด้วยดังแสดงได้รูปที่ 3.7



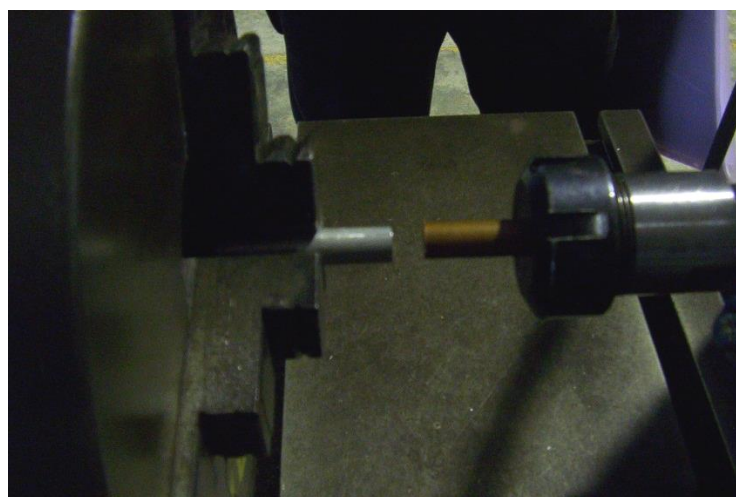
รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดให้แรงดันให้ได้ระยะที่เหมาะสม

2) นำชิ้นงานอลูมิเนียมที่ใช้ทดสอบมาจับยึดกับหัวจับเครื่องกลึงดังแสดงได้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 นำชิ้นงานอลูมิเนียมที่ใช้ทดสอบมาจับยึดกับหัวจับเครื่องกลึง

3) นำวัสดุทองแดงมาจับยึดเข้ากับ Collect Milling ที่อยู่กับชุดกระบอกไฮดรอลิกส์ให้แรงดันแล้วลือค้ำให้แน่นดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการจับยึดทองแดงโดย Collect Milling

4) ปรับตั้งความเร็วรอบของเครื่องกลึง วัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมความเร็วรอบคือ 710 รอบ/นาที ส่วน อลูมิเนียมกับทองแดง และ อลูมิเนียมกับทองเหลือง อยู่ที่ 1000 รอบ/นาทีดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการปรับตั้งความเร็วรอบ

5) ปรับตั้งขนาดของแรงที่ต้องการ เริ่มต้นที่ 147N/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการปรับตั้งขนาดของแรงดัน

6) เคลื่อนชิ้นทดสอบเข้ามาชนกันแล้วเปิดเครื่องกลึง ความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 700 รอบ/นาที ถึง 1000 รอบ/นาที แล้วแต่วัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้ามาชนกัน

7) ทำการเชื่อมชิ้นงานโดยการเปิดเครื่องกลึงแล้วให้แรงดันอย่างต่อเนื่อง เวลาในการเชื่อมนั้น 4-25วินาที ขึ้นอยู่กับ วัสดุและความเร็วรอบและขนาดของแรงจะได้ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมออกมา ดังแสดงในรูป 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการเชื่อมติดกันของ อลูมิเนียมกับทองแดง

ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วในความเร็วรอบ แรง และเวลากดแซ่ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ และแรงที่เหมาะสม

ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วในความเร็วรอบ แรง และเวลากดแซ่ที่ไม่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในความเร็วรอบ แรง และเวลากดแซ่ที่ไม่เหมาะสม

จากการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียม ทองเหลือง และทองแดง การเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม จะใช้ความเร็วรอบที่ 710 รอบ/นาที ที่ขนาดแรง 147N/m^2 ใช้เวลาในการเชื่อม 10 วินาที ที่ขนาดแรง 176N/m^2 ใช้เวลาในการเชื่อม 8 วินาที ที่ขนาดของแรง 206N/m^2 ใช้เวลาในการเชื่อม 6 วินาที และที่ขนาดของแรง 235N/m^2 ใช้เวลาในการเชื่อม 4 วินาที

การเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง จะใช้ความเร็วรอบที่ 1000 รอบ/นาที ที่ขนาดแรง 147N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 18 วินาที ที่ขนาดแรง 176N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 15 วินาที ที่ขนาดของแรง 206N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 12 วินาที และที่ขนาดของแรง 235N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 10 วินาที

การเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลืองจะใช้ความเร็วรอบที่ 1000 รอบ/นาที ที่ขนาดแรง 147N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 25 วินาที ที่ขนาดแรง 176N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 20 วินาที ที่ขนาดของแรง 206N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 17 วินาที และที่ขนาดของแรง 235N/m² ใช้เวลาในการเชื่อม 15 วินาที

- 8) ถอดชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องกลึง
- 9) ตรวจสอบการเชื่อมด้วยสายตาและทดสอบดึงด้วยมือดูว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันหรือไม่
- 10) หากชิ้นงานเชื่อมติดกันก็จะนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกลต่อไป
- 11) ทำการทดสอบวัสดุระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมอลูมิเนียมกับทองแดงอลูมิเนียมกับทองเหลือง ตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 11 อีกครั้ง

3.3 วิธีการทดสอบ / วิธีการวัดผล

3.3.1 ตรวจสอบการเชื่อมติดกันระหว่างทองแดงและทองเหลืองบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

- 1) ผ่าด้วยเลื่อยมือ ขนาดฟันเลื่อย 24 ฟัน/นิ้ว ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เลื่อยมือ

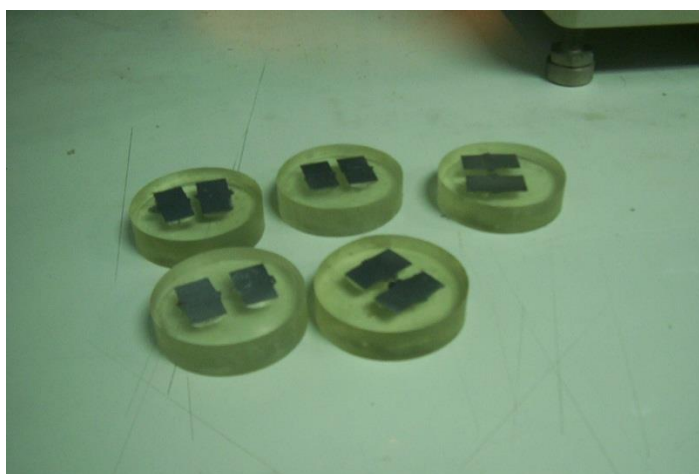


รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ผ่าแล้ว

2) นำชิ้นงานไปหล่อเรซิน ดังแสดงได้ในรูปที่3.19



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานที่นำไปหล่อเรซิน

3) นำชิ้นงานที่หล่อเสร็จไปขัดผิวด้วยเครื่องขัด ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องขัด

4) นำชิ้นงานไปส่องกล้องMicroscopeดังแสดงได้ในรูปที่3.21



รูปที่ 3.21 ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยการผ่าแล้วนำไปส่องกล้อง Microscope

3.3.2 ตรวจสอบสอบแรงดึงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากเครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.3 ตรวจสอบความแข็งแรงของผิวในการเชื่อมติดกันด้วยแรงเสียดทาน ของ อลูมิเนียม กับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลืองและอลูมิเนียมกับทองแดง โดยใช้หัวกด ทรงปรมิคหัวเพชร แรงที่ใช้ในการกด 1Kgf โดยกดทั้งหมด 6 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สูตรในการคำนวณ ดัง แสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการตรวจสอบความแข็งแรงของผิวรอยเชื่อม

สูตรในการคำนวณ

$$HV = \frac{1.854F}{d^2}$$

โดย F = Applied load, (N)

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

HV = Vickers hardness

3.3.4 ทำการตรวจสอบวัสดุระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง ตาม ขั้นตอนเดียวกันกับการตรวจสอบระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการดำเนินงานการศึกษาอิทธิพลของแรงดันที่มีผลต่อการเชื่อมอลูมิเนียมกับโลหะผสมด้วยวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานสำหรับอุตสาหกรรมการเชื่อม และได้ศึกษาหาวิธีในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยการเชื่อมในสภาวะในที่อุณหภูมิปกติและจะใช้อุปกรณ์ช่วยในการทดลองเพื่อควบคุมแรงในการทดลอง ในส่วนของบทนี้เป็นการนำเสนอและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของแรงดันที่มีผลต่อการเชื่อมโลหะผสมด้วยวิธีการแรงเสียดทานสำหรับอุตสาหกรรมการเชื่อม จะได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดสอบแรงดึง

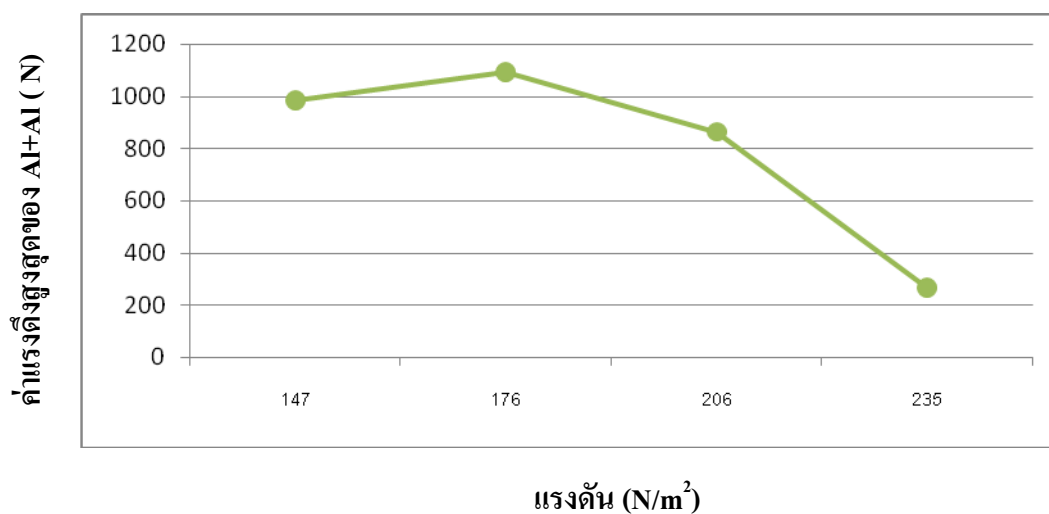
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงของวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม หลังจากการเชื่อมเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกดึงยึดออกเสมอ (ปราศจากการกระแทก) จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ความเร็วในการยึดตัวจะต้องต่ำ ทั้งนี้เพื่อมิให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดแรงดึงและความยาวที่ยึดออกของชิ้นทดสอบจะถูกวัดค่าหรือถูกพิมพ์เป็นค่าและกราฟออกมาให้ทราบ

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ด้วยแรงเสียดทาน โดยการใช้แรงในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ก.1)

แรงดัน ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)			
	147 N/m ²	176 N/m ²	206 N/m ²	235 N/m ²
Al+Al	982.14	1091	862.24	265.30

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับอุณหภูมิที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



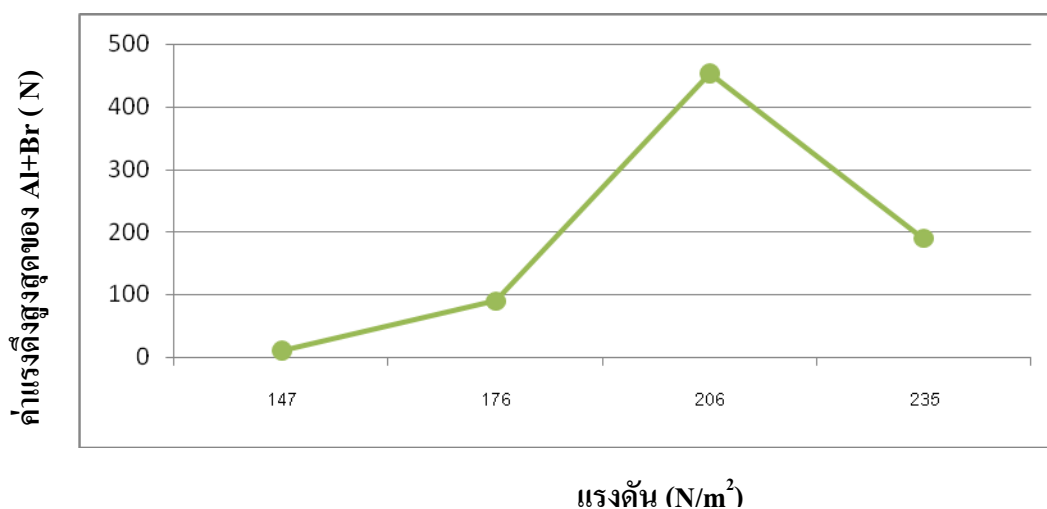
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Al

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ที่แรงดันแตกต่างกันจะเห็นได้ว่าที่แรงดัน $176 N/m^2$ ให้ค่าแรงดึงสูงสุด ซึ่งหมายความว่าวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมเกิดการยึดติดกันจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากที่สุดทำให้ทนต่อแรงดึงมากกว่าแรงดันอื่นๆ ดังนั้นการเชื่อมที่แรงดัน $176 N/m^2$ จึงให้ผลที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยใช้แรงในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ก.2)

แรงดัน ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)			
	$147 N/m^2$	$176 N/m^2$	$206 N/m^2$	$235 N/m^2$
Al+Br	10.20	89.56	454.08	189.80

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับอุณหภูมิที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



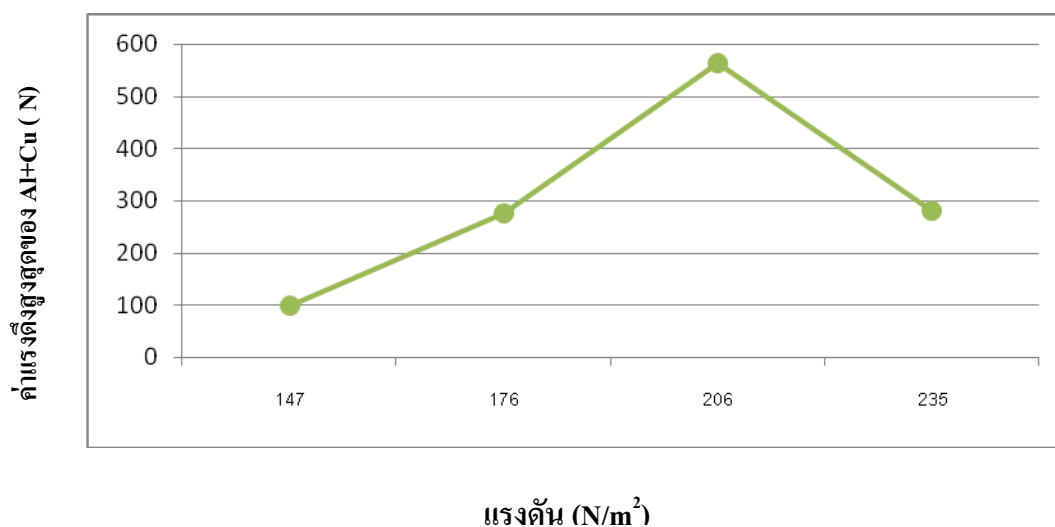
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Br

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับทองเหลือง ที่แรงดันแตกต่างกันจะเห็นได้ว่าที่แรงดัน $206 N/m^2$ ให้ค่าแรงดึงสูงสุด ซึ่งหมายความว่าวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองเกิดการยึดติดกันจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากที่สุดทำให้ทนต่อแรงดึงมากกว่าแรงดันอื่นๆ ดังนั้นการเชื่อมที่แรงดัน $206 N/m^2$ จึงให้ผลที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยใช้แรงในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ค.3)

แรงดัน ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)			
	147 N/m^2	176 N/m^2	206 N/m^2	235 N/m^2
Al+Cu	98.21	275.51	564.28	281.32

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับอุณหภูมิที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้

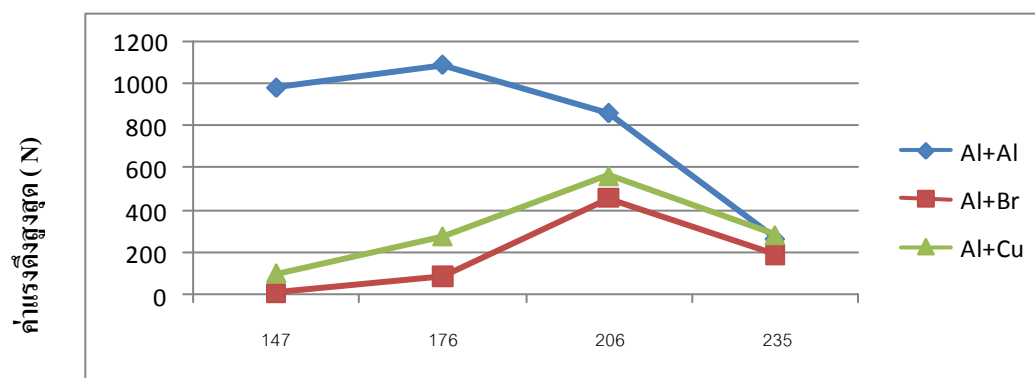


รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Cu

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดง ที่แรงดันแตกต่างกันจะเห็นได้ว่าที่แรงดัน $206 N/m^2$ ให้ค่าแรงดึงสูงสุด ซึ่งหมายความว่าวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงเกิดการยึดติดกันจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมากที่สุดทำให้ทนต่อแรงดึงมากกว่าแรงดันอื่นๆ ดังนั้นการเชื่อมที่แรงดัน $206 N/m^2$ จึงให้ผลที่ดีที่สุด

4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดกับแรงที่ใช้ในการเชื่อมที่มีผลต่อการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน

จากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงสูงสุดของวัสดุผสมกับอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมสามารถยึดติดกันได้ดีเพราะสามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุดที่ 1,091 N ซึ่งมากกว่าการเชื่อมอลูมิเนียมกับกับวัสดุอื่น เนื่องมาจากวัสดุเป็นวัสดุชนิดเดียวกันมีจุดหลอมละลายต่ำอยู่ที่ 658 องศาเซลเซียสเท่ากัน จึงสามารถหลอมละลายเข้าหากันได้เป็นอย่างดีเมื่อเกิดแรงหมุนเสียดทานกัน และสามารถยึดติดกันได้ดีที่สุดที่ขนาดของแรงในการเชื่อมเท่ากับ 176N/m^2 แต่เมื่อดูจากกราฟพบว่าการเชื่อมที่แรง 206N/m^2 ของวัสดุชนิดต่างๆ มีค่าแรงดึงค่อนข้างสูง ดังนั้นสรุปได้ว่าขนาดของแรงแรงที่ 206N/m^2 เหมาะสมมากที่สุดกับการเชื่อมอลูมิเนียมกับวัสดุผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ยกเว้นวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมเหมาะสมกับขนาดแรงดัน 176N/m^2 มากสุด และเมื่อแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ค่าแรงดึงก็ต่ำลงตามกราฟที่ได้เพราะวัสดุอลูมิเนียมไม่สามารถทนความร้อนได้สูงมากนักและเมื่อมีแรงเพิ่มมากขึ้นเกิดการเสียดสีมากขึ้นการหลอมละลายยิ่งมากขึ้นทำให้เมื่อหยุดเครื่องทันทีนั้น อลูมิเนียมที่ยังอยู่ที่อุณหภูมิสูงอยู่ จะบิดงอและฉีกขาดก่อนที่จะเย็นตัวที่อุณหภูมิปกติทำให้วัสดุไม่สมบูรณ์ ด้านทานแรงดึงได้น้อยลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดกับขนาดของแรงต่างๆ พบว่าวัสดุประเภทเดียวกันจะสามารถเชื่อมติดกันได้ดี เพราะมีจุดหลอมละลายที่เท่ากัน วัสดุต่างชนิดกันจะเชื่อมติดกันได้แต่ทนแรงดึงได้ไม่สูงมากจะสามารถเห็นความแตกต่างได้จากกราฟความสัมพันธ์ด้านบน ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลืองนั้นวัสดุสองชนิดนี้ มีจุดหลอมละลายที่ต่างกันในการเชื่อมนั้นทองเหลืองจะไม่หลอมละลายเพียงแต่เกิดความร้อนเท่านั้น แต่อลูมิเนียมจะหลอมละลายมายึดติดกับทองเหลืองเองทำให้วัสดุเชื่อมติดกันได้ และถึงแม้ทองเหลืองจะมีจุดหลอมละลายต่างจากอลูมิเนียมน้อยกว่าทองแดง แต่ในทดลองนั้น อลูมิเนียมกับทองเหลืองทนแรงดึงได้น้อยกว่าอลูมิเนียมกับทองแดง เพราะว่าทองเหลืองมีคุณสมบัติแข็งและเปราะกว่าทองแดง และเมื่อทำการเชื่อมเสียดสีกันทองเหลืองเมื่อได้รับความร้อนมากๆ แล้วผิวจะหลุดแตกออกทำให้การเชื่อมติดกันไม่ได้ไม่ดีเท่าอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมและอลูมิเนียมกับทองแดงและในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดงก็เช่นกันเมื่อทองแดงมีจุดหลอมละลายที่ $1,083\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่างจากอลูมิเนียมมาก ในการเชื่อมนั้นเมื่อเกิดการเสียดทานกันอลูมิเนียมก็จะหลอมละลายมายึดติดกับทองแดงโดยที่ทองแดงไม่หลอมละลายเพียงแต่เกิดความร้อนเท่านั้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดงนั้นยังสามารถนำไปพัฒนาใช้งานต่อไปได้

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างแรงที่ใช้ในการเชื่อมกับความต้านทานแรงดึง

4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม

ต้องการทราบว่าในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของAI+Al นั้นในขนาดแรงต่างๆกัน มีผลกับความต้านทานแรงดึงหรือไม่จึงได้นำมาทำการทดสอบกับแรงจำนวน 4 แรงที่ใช้ในการเชื่อมดังนี้ 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2 และจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 20 ตัวอย่างในตารางข้างล่างนี้โดยใช้ ANOVA ในการทดสอบว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

147N/m^2 176N/m^2 206N/m^2 235N/m^2

982.14 1091.00 862.24 265.30

950.11 1028.12 871.44 287.90

987.87 989.34 866.21 245.89

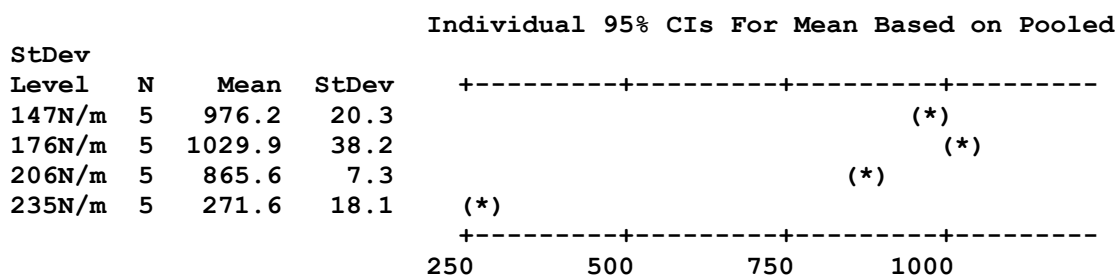
961.11 1008.67 854.92 269.11

999.88 1032.17 872.96 289.86

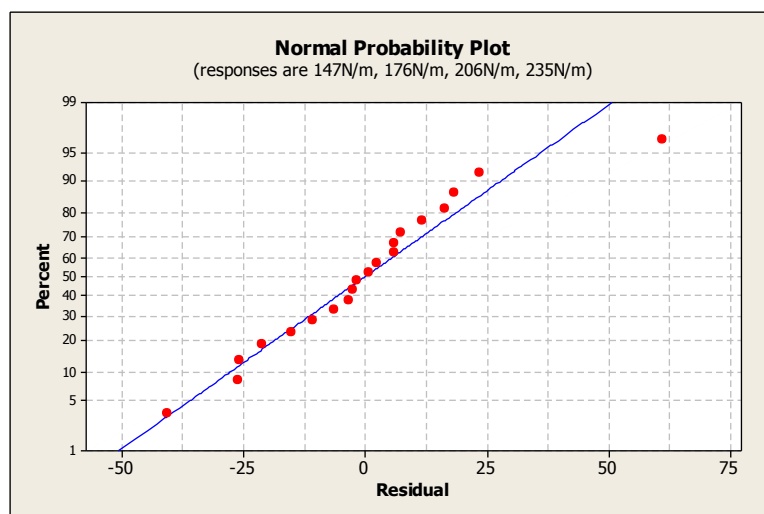
One-way ANOVA: 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	1832879	610960	1086.40	0.000
Error	16	8998	562		
Total	19	1841877			

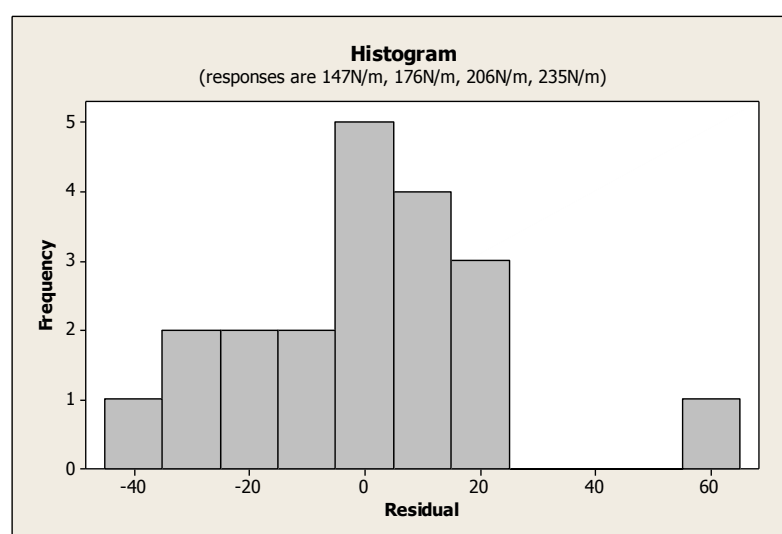
S = 23.71 R-Sq = 99.51% R-Sq(adj) = 99.42%



Pooled StDev = 23.7



รูปที่ 4.5 Normplot of Residuals for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²



รูปที่ 4.6 Residual Histogram for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²

จากผลการวิเคราะห์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ อลูมิเนียมกับ อลูมิเนียมดังที่แสดงในตาราง ANOVA ได้ค่า $F = 1086.40$ และอ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ $0.000 < 0.05$ จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลือง

ต้องการทราบว่าในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของAl+Br นั้นในขนาดแรงต่างๆกัน มีผลกับความต้านทานแรงดึงหรือไม่จึงได้นำมาทำการทดสอบกับแรงจำนวน 4 แรงที่ใช้ในการเชื่อมดังนี้ 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2 และจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 20 ตัวอย่างในตารางข้างล่างนี้โดยใช้ ANOVA ในการทดสอบว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

147N/m 176N/m 206N/m 235N/m

10.20	89.56	454.08	189.80
12.11	94.11	448.21	193.87
9.42	87.63	463.32	177.89
8.32	91.01	431.98	190.09
10.09	85.43	458.55	188.32

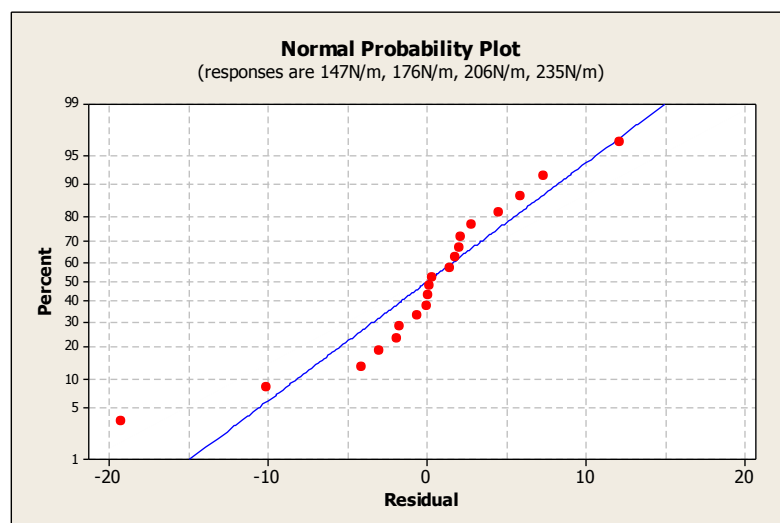
One-way ANOVA: 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	553061.2	184353.7	3766.28	0.000
Error	16	783.2	48.9		
Total	19	553844.4			

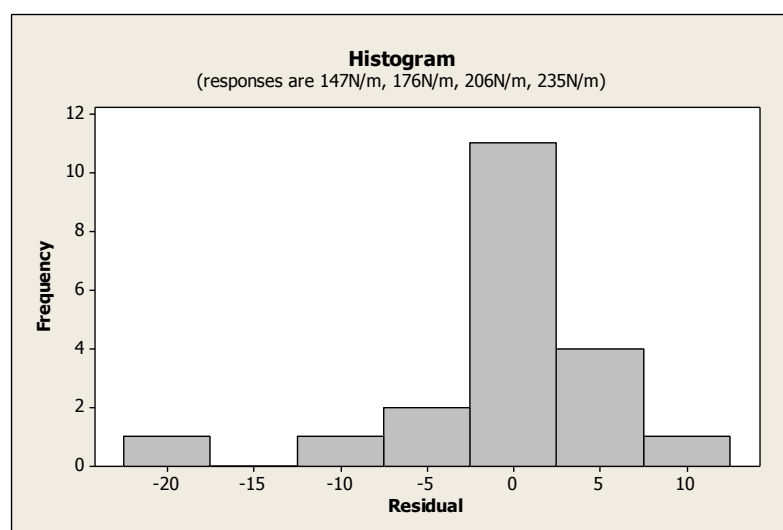
S = 6.996 R-Sq = 99.86% R-Sq(adj) = 99.83%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----			
147N/m	5	10.03	1.38	(*			
176N/m	5	89.55	3.30		(*)		
206N/m	5	451.23	12.12				(*
235N/m	5	187.99	6.01			(*	
				+-----+-----+-----+-----			
				0 120 240 360			

Pooled StDev = 7.00



รูปที่ 4.7 Normplot of Residuals for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²



รูปที่ 4.8 Residual Histogram for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²

จากผลการวิเคราะห์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลืองดังที่แสดงในตาราง ANOVA ได้ค่า $F = 3766.28$ และอ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ $0.000 < 0.05$ จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง

ต้องการทราบว่าในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของAl+Cu นั้นในขนาดแรงต่างๆกันมีผลกับความต้านทานแรงดึงหรือไม่จึงได้นำมาทำการทดสอบกับแรงจำนวน 4 แรงที่ใช้ในการเชื่อมดังนี้ 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2 และจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 20 ตัวอย่างในตารางข้างล่างนี้โดยใช้ ANOVA ในการทดสอบว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

147N/m^2 176N/m^2 206N/m^2 235N/m^2

98.21 275.51 564.28 281.32

100.21 281.98 577.67 266.09

97.55 266.43 534.22 291.80

93.21 253.24 569.81 265.55

102.81 279.96 555.08 289.07

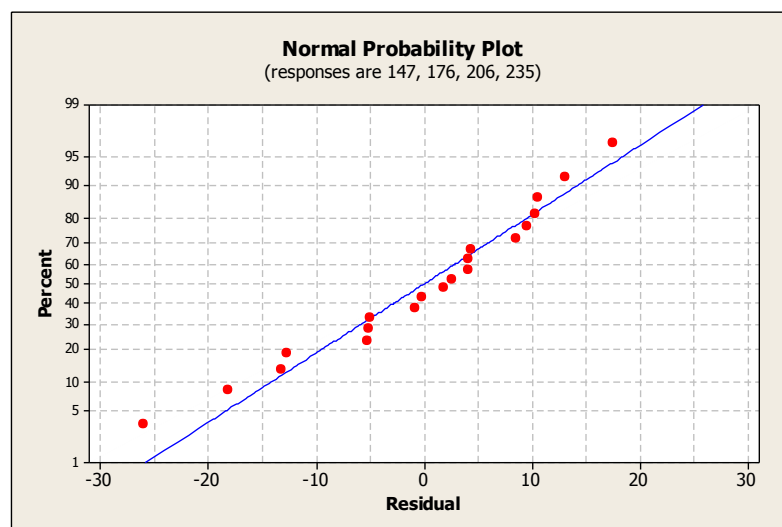
One-way ANOVA: 147N/m^2 , 176N/m^2 , 206N/m^2 , 235N/m^2

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	3	548009	182670	1248.86	0.000
Error	16	2340	146		
Total	19	550349			

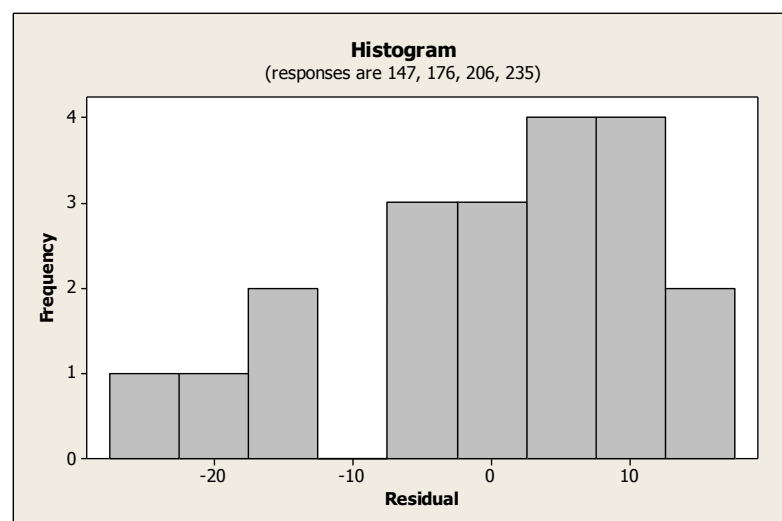
S = 12.09 R-Sq = 99.57% R-Sq(adj) = 99.50%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----	
147N/m	5	98.40	3.55	(*	
176N/m	5	271.42	11.80	(*)	
206N/m	5	560.21	16.70		*)
235N/m	5	278.77	12.43	(*	
-----+-----+-----+-----+-----					
		150	300	450	600

Pooled StDev = 12.09



รูปที่ 4.9 Normplot of Residuals for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²



รูปที่ 4.10 Residual Histogram for 147N/m², 176N/m², 206N/m², 235N/m²

จากผลการวิเคราะห์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ อลูมิเนียมกับทองแดงดังที่แสดงในตาราง ANOVA ได้ค่า $F = 1248.86$ และอ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ $0.000 < 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง และอลูมิเนียมกับทองแดงนั้นจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ทั้งสามครั้งข้างต้นนั้นจะไปใน

ทิศทางเดียวกัน นั้นหมายความว่า การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ ANOVA ในการทดลองนั้น ผลปรากฏว่าแรงที่ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับวัสดุผสมในขนาดแรงที่แตกต่างกันนั้นเห็นได้ว่า แรงที่ใช้ในการเชื่อมมีผลกับความต้านทานแรงดึงของวัสดุอย่างชัดเจน จึงพอสรุปได้ว่าแรงในขนาดต่างๆกันมีผลกับการเชื่อมอลูมิเนียมกับวัสดุผสม โดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

4.3 การศึกษาระยะเวลาในการกดแซ่

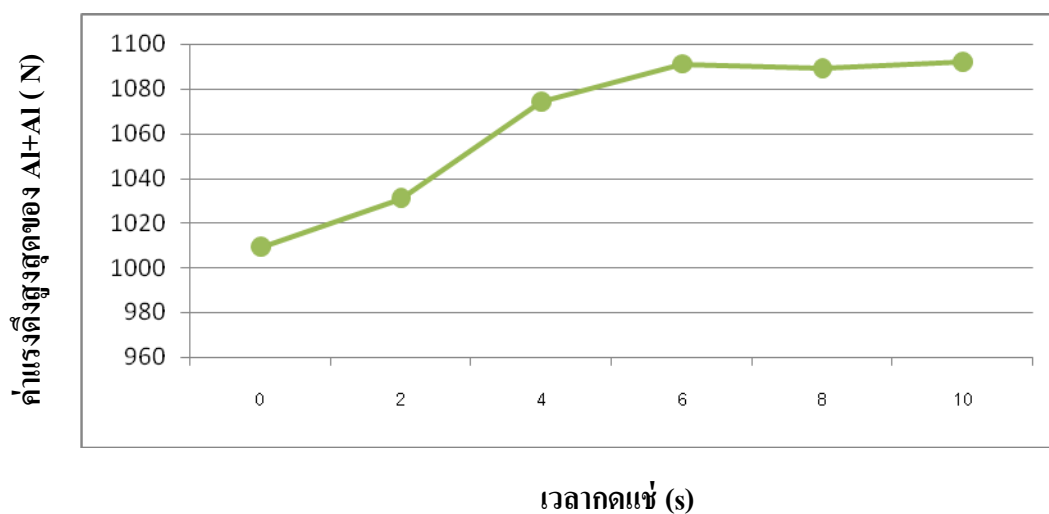
4.3.1 ผลการศึกษาระยะเวลาในการกดแซ่

การศึกษาระยะเวลาในการกดแซ่ของการเชื่อมต่ออลูมิเนียมกับวัสดุผสม โดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้น ศึกษาเพื่อหาเวลากดแซ่ที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมต่ออลูมิเนียมกับวัสดุผสมด้วยแรงเสียดทาน โดยศึกษาที่เวลา 0,2,4,6,8,10 วินาที ตามลำดับ และนำไปทดสอบโดยการทดสอบคุณสมบัติทางกลในการต้านทานแรงดึงเพื่อหาเวลาที่สามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุด โดยได้นำเอาเฉพาะแรงที่เหมาะสมในการเชื่อมของแต่ละวัสดุมาทำการศึกษา คือ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียมแรงที่ใช้ในการเชื่อม 176 N/m^2 อลูมิเนียมกับทองเหลือง 206 N/m^2 และอลูมิเนียมกับทองแดง 206 N/m^2

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมด้วยแรงเสียดทานแรงที่ใช้ในการเชื่อม 176 N/m^2 โดยใช้เวลากดแซ่ในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ง.1)

เวลา(s) ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)					
	0s	2s	4s	6s	8s	10s
Al+Al	1,009	1,031	1,074	1,091	1,089	1,092

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับเวลากดแซ่ที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



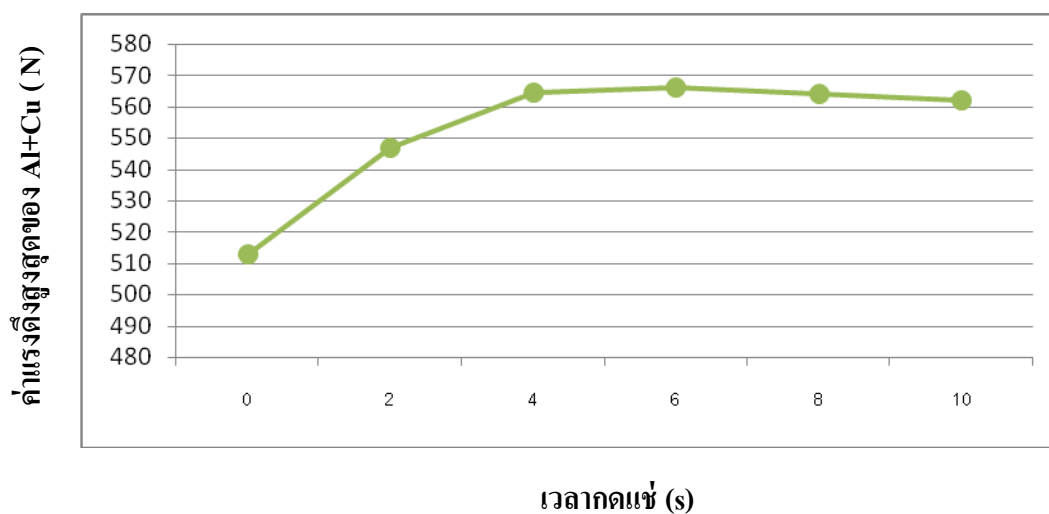
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Al

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 176 N/m^2 เวลาที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 6, 8, 10 วินาที ด้านทานแรงดึงได้สูงสุดและใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการใช้เวลาคัดเซามากๆ นั้นทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการเชื่อมวัสดุ ดังนั้นเวลาคัดเซที่ด้านทานแรงดึงได้ดีและใช้เวลาในการเชื่อมน้อยที่สุดคือ 6 วินาที จึงเป็นเวลาคัดเซที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงด้วยแรงเสียดทานแรงที่ใช้ในการเชื่อม 206 N/m^2 โดยการใช้เวลาคัดเซในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ง.2)

เวลา(s) ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)					
	0s	2s	4s	6s	8s	10s
Al+Cu	512.73	546.81	564.28	566.12	563.91	562.03

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับเวลาคัดเซที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดง สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



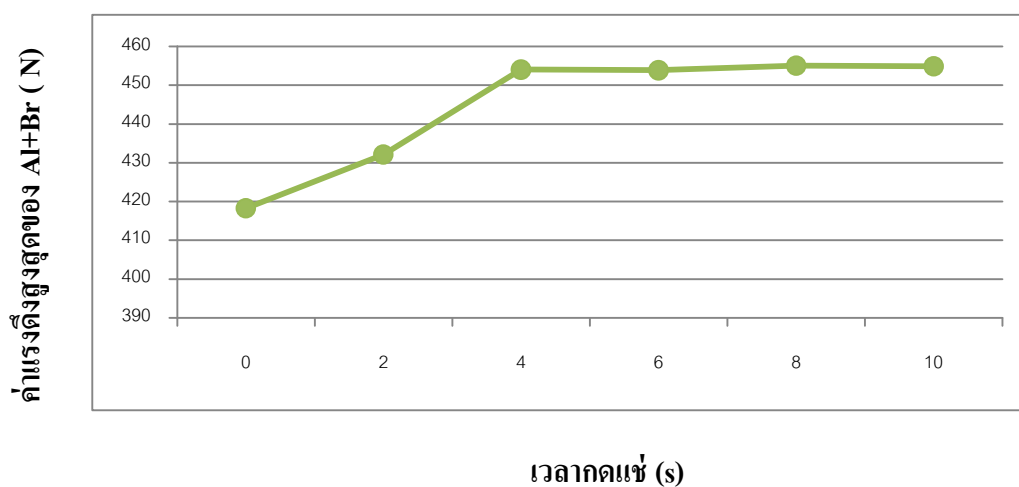
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Cu

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงในการเชื่อม 206 N/m^2 เวลาที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 4, 6, 8, 10 วินาที ด้านทานแรงดึงได้สูงสุดและใกล้เคียงกันแต่ เนื่องจากการใช้เวลาทดสอบมากขึ้นทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการเชื่อมวัสดุ ดังนั้น เวลาทดสอบที่ดีและใช้เวลาในการเชื่อมน้อยที่สุดคือ 4 วินาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดงโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองด้วยแรงเสียดทานแรงที่ใช้ในการเชื่อม 206 N/m^2 โดยการใช้เวลาทดสอบในการเชื่อมที่ต่างกัน (ข้อมูลจากตาราง ง.2)

เวลา(s) ชิ้นงาน	ค่าแรงดึงสูงสุด (N)					
	0s	2s	4s	6s	8s	10s
Al+Br	418.29	432.17	454.08	453.92	455.11	454.96

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับเวลาทดสอบที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลือง สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้

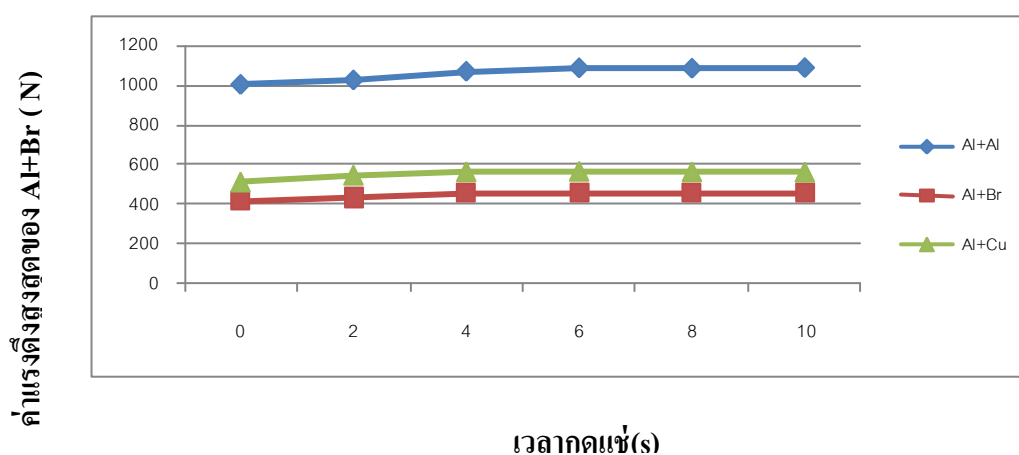


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Br

จากกราฟ พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงในการเชื่อม 206N/m^2 เวลาที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 4,6,8,10 วินาที ด้านทานแรงดึงได้สูงสุดและใกล้เคียงกันแต่ เนื่องจากการใช้เวลาทดสอบมากขึ้นทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการเชื่อมวัสดุ ดังนั้น เวลาทดสอบที่ด้านทานแรงดึงได้ดีและใช้เวลาในการเชื่อมน้อยที่สุดคือ 4 วินาที จึงเป็นเวลาที่ เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดงโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม

จากความสัมพันธ์ระหว่างการด้านทานแรงดึงและเวลาทดสอบที่มีผลต่อการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง สามารถที่จะนำเสนอเป็น แผนภูมิ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์การด้านทานแรงดึงสูงสุดระหว่างของวัสดุผสมกับเวลาทดสอบ

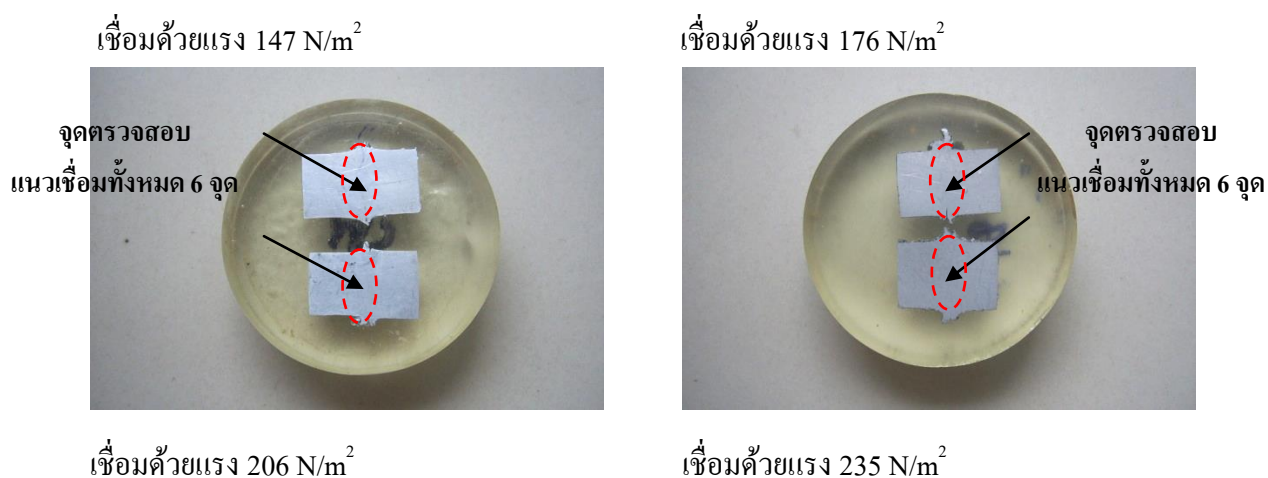
จากการศึกษาระยะเวลาในการกดแซ่ของการเชื่อมต่ออูมิเนียมกับวัสดุผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้น จากกราฟจะสามารถเห็นได้ว่าการเชื่อมอูมิเนียมกับอูมิเนียมโดยใช้เวลากดแซ่ 0,2,4,6,8,10 วินาที ในการทดลองนั้น เวลาที่เหมาะสมคือ 6วินาทีและจะเห็นได้ว่าในเวลากดแซ่ที่มากกว่า 6วินาที นั้นก็ต้านทานแรงดึงได้ดีเช่นกัน แต่เวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 6วินาที ที่ใช้เวลาน้อยที่สุดและต้านทานแรงดึงได้ดีที่สุดและในการเชื่อมอูมิเนียมกับทองเหลือง และอูมิเนียมกับทองแดง นั้นก็เช่นกัน ต่างกันที่ว่าการเชื่อมอูมิเนียมกับทองเหลืองและอูมิเนียมกับทองแดงนั้นเวลากดแซ่ที่เหมาะสมที่สุดคือ 4วินาที เนื่องจากทองแดงกับทองเหลืองสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าอูมิเนียม จึงใช้เวลาในการกดแซ่ค่อนข้างน้อยกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมอูมิเนียมกับวัสดุผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้นเวลากดแซ่ที่เหมาะสมคือ 4วินาที ยกเว้นการเชื่อมอูมิเนียมกับอูมิเนียมเวลากดแซ่ที่เหมาะสมนั้นคือ 6 วินาที

4.4 การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม

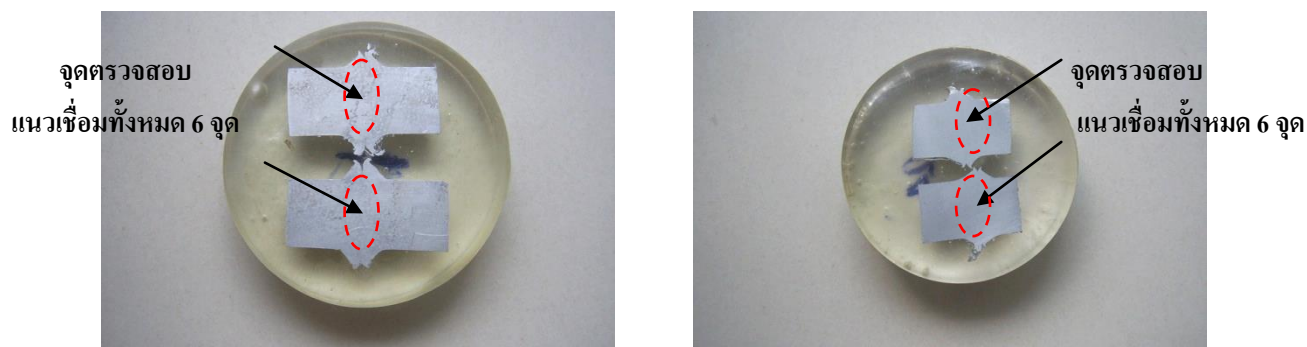
4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของผิว

หลังจากชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการเชื่อมในสภาวะที่แรงดันที่แตกต่างกันเพื่อที่จะนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบความแข็งแรงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของผิวรอยเชื่อมสูงสุดแต่ละขนาดของแรงในการเชื่อมต่างๆ และหาค่าจากสูตรในการทดลองซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.7 การทดสอบความแข็งแรงแรงของแนวเชื่อมอูมิเนียมกับอูมิเนียม ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง หัวกดปริมาตรรูปเพชรแรงที่ใช้ในการกดทดสอบ 1Kgf (ข้อมูลจากตาราง ง.1)



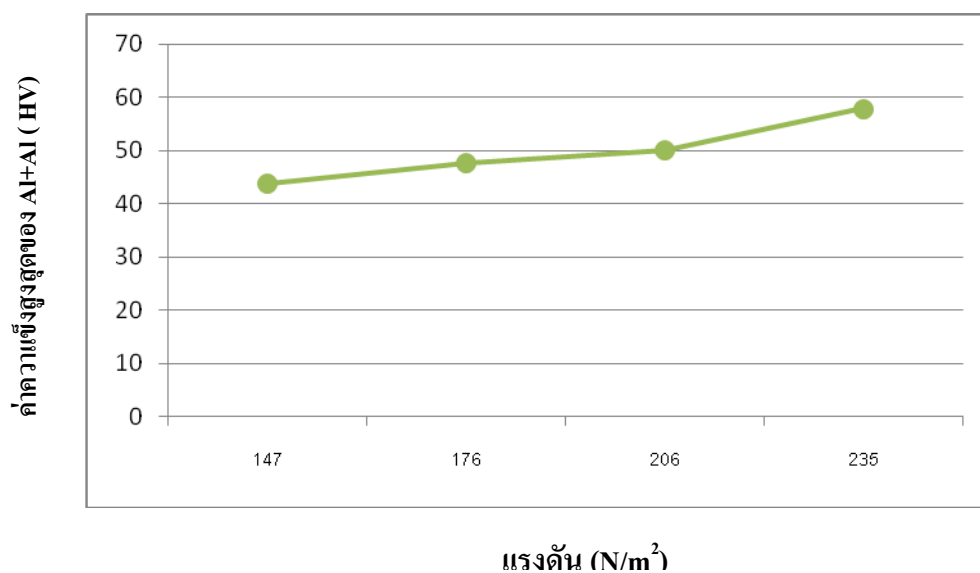
รูปที่ 4.15 ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงแรงของแนวเชื่อมอูมิเนียมกับอูมิเนียม



รูปที่ 4.15 ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม(ต่อ)

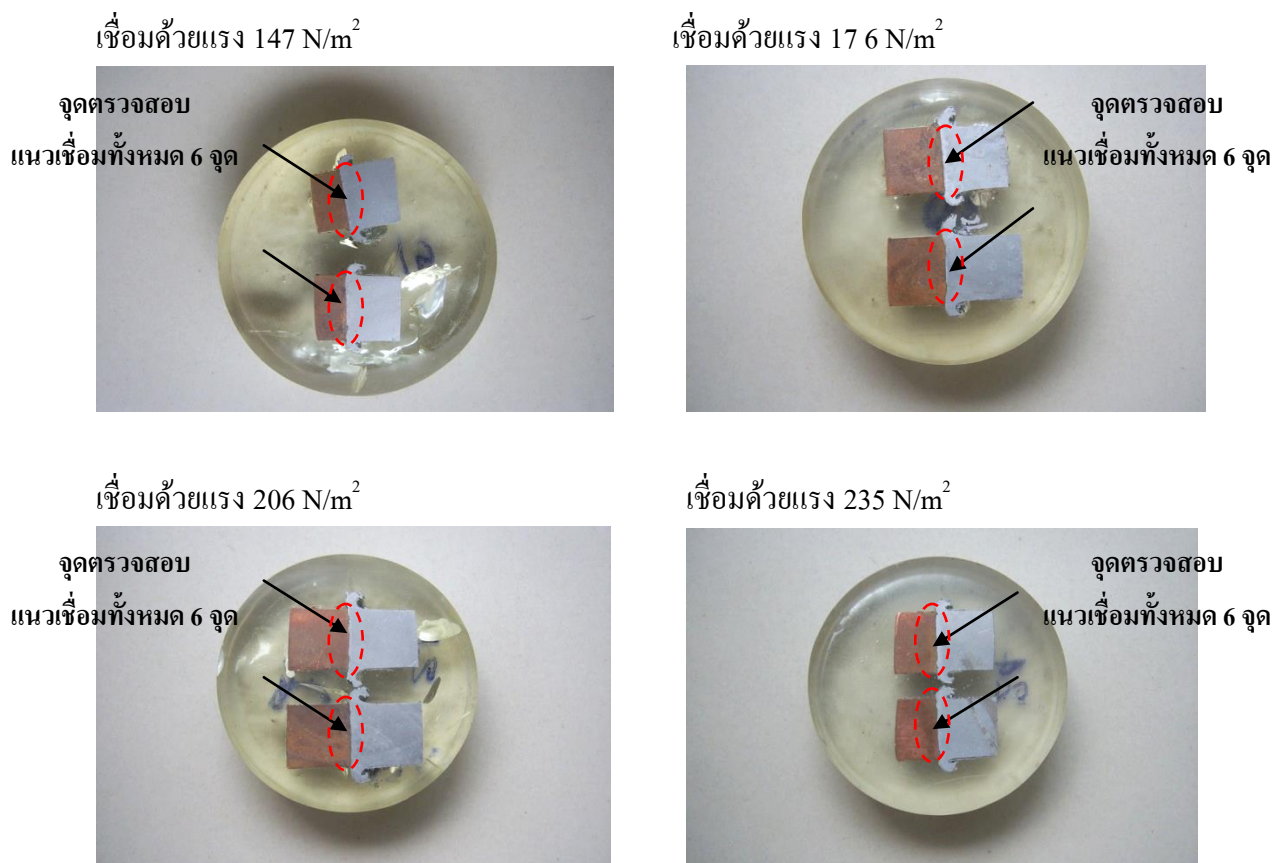
แรง ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงสูงสุด (HV)			
	147N/m ²	176 N/m ²	206 N/m ²	235 N/m ²
Al+Al	43.35	47.70	50.11	57.79

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดกับขนาดของแรงที่มีผลต่อการเชื่อมต่อดูอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 4.16 แสดงค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดของ Al+Al

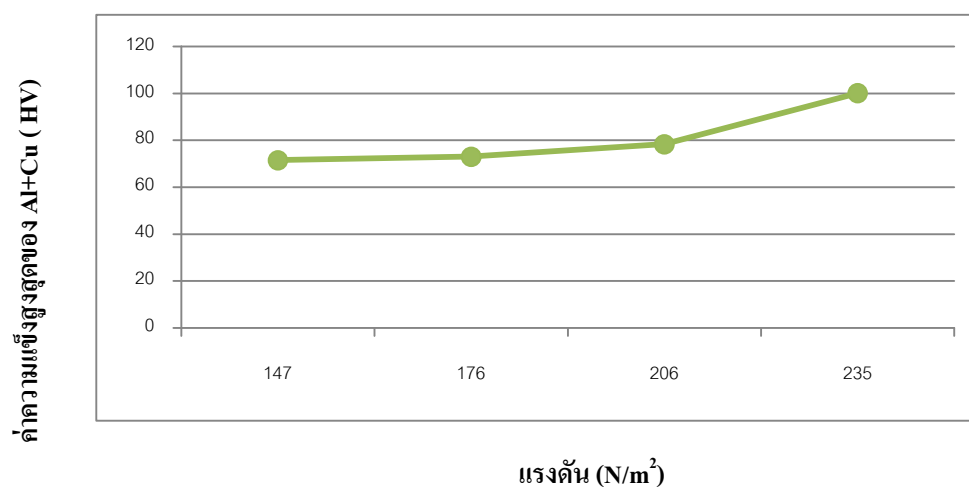
ตารางที่ 4.8 การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง หัวกดปริมาตรเพชรแรงที่ใช้ในการกดทดสอบ 1Kgf (ข้อมูลจากตาราง ง.2)



รูปที่ 4.17 ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง

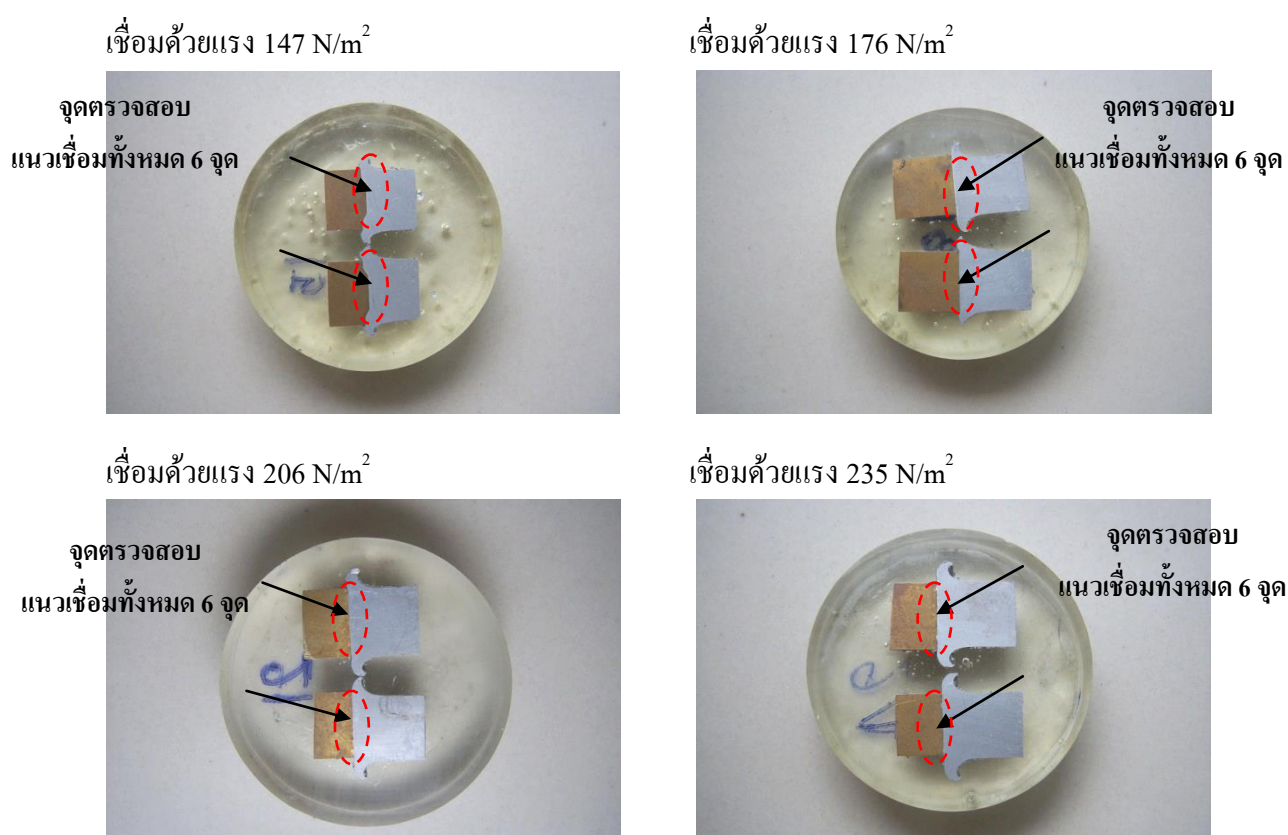
ชิ้นงาน \ แรง	ค่าความแข็งแรงสูงสุด (HV)			
	147N/m ²	176 N/m ²	206 N/m ²	235 N/m ²
Al+Cu	71.55	73.00	78.38	82.38

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดกับขนาดของแรงที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของ Al+Cu

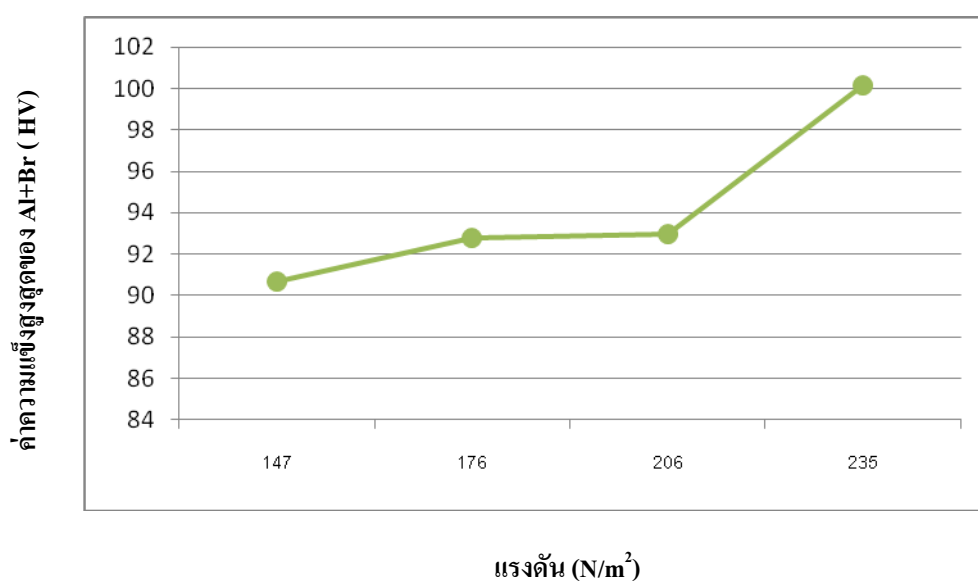
ตารางที่ 4.9 การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลือง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง หัวกดปริมาตรเพชรแรงที่ใช้ในการกดทดสอบ 1Kgf (ข้อมูลจากตาราง ง.3)



รูปที่ 4.19 ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง

แรง ชิ้นงาน	ค่าความแข็งสูงสุด (HV)			
	147N/m ²	176 N/m ²	206 N/m ²	235 N/m ²
Al+Br	90.66	92.80	92.98	100.18

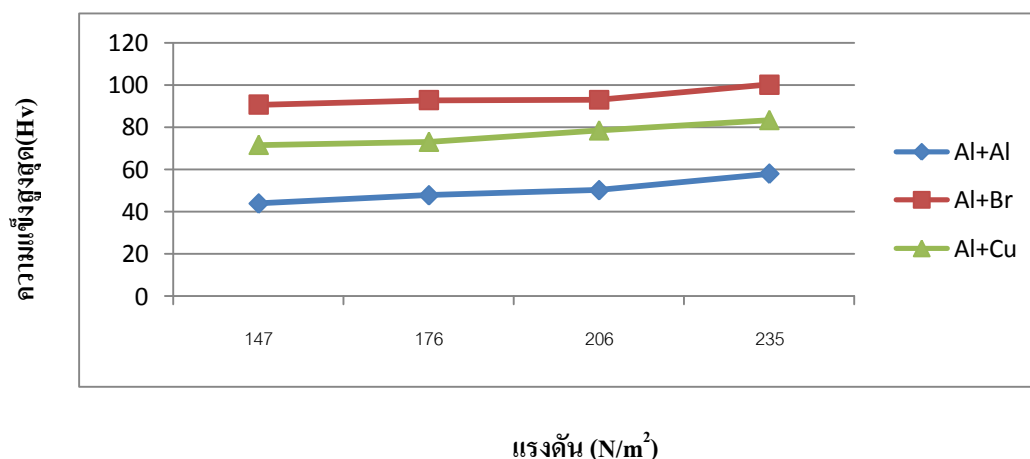
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดกับขนาดของแรงที่มีผลต่อการเชื่อมต่อวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของ Al+Br

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดกับแรงที่ใช้ในการเชื่อมที่มีผลต่อการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดงสามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน

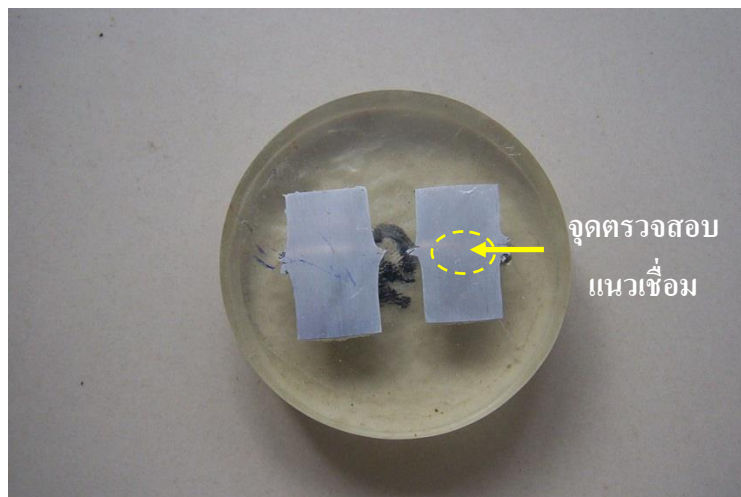
การทดสอบความแข็งของผิวแนวเชื่อมนั้น สามารถเห็นได้ว่าความแข็งของแนวเชื่อมมีค่าความแข็งไม่มาแตกต่างกันมากนัก ในแต่ละแรงที่ทำการเชื่อมของแต่ละวัสดุ สาเหตุก็เพราะว่า ในกระบวนการเชื่อมนั้นเมื่อวัสดุเสียดสีกันจนถึงจุดหลอมละลายเข้าหากันแล้ว จะหยุดเชื่อมทันทีที่แรงขนาดต่างๆกันในการเชื่อมนั้น จะช่วยให้เวลาในการเชื่อมสั้นลงเพราะแรงดันมากเกินไปก็ทำให้หลอมละลายได้เร็วกว่าแรงดันที่น้อยกว่าและเมื่อหลอมละลายแล้วก็หยุดเครื่องทันที จึงทำให้ในแต่ละแรงที่ใช้ในการเชื่อมความแข็งของแนวเชื่อมจึงไม่ต่างกันมากนัก

อย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นได้ว่าความแข็งของแนวเชื่อมของ อลูมิเนียมกับทองเหลืองจะแข็งที่สุด เนื่องจากผิวทองเหลืองมีความแข็งมากที่สุด ประมาณ 122.7 Hv ทองแดง 94.4 Hv และอลูมิเนียม 56.1 Hv และอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมมีความแข็งต่ำสุด จากกราฟจะเห็นว่าแนวเชื่อมของ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับทองเหลืองและอลูมิเนียมกับทองแดงนั้น กราฟจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ นั่นหมายความว่าแรงยิ่งมากผิวของแนวเชื่อมยิ่งแข็งเพิ่มมากขึ้น

4.5 การตรวจสอบโครงสร้างการเชื่อมติดกันของวัสดุผสม (ทองแดง,ทองเหลือง และอลูมิเนียม) บริเวณแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope (ขยาย 100X)

4.5.1 ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมบริเวณแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope (ขยาย 100X)

1) แรงดัน 147N/m^2



รูปที่ 4.22 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147N/m^2



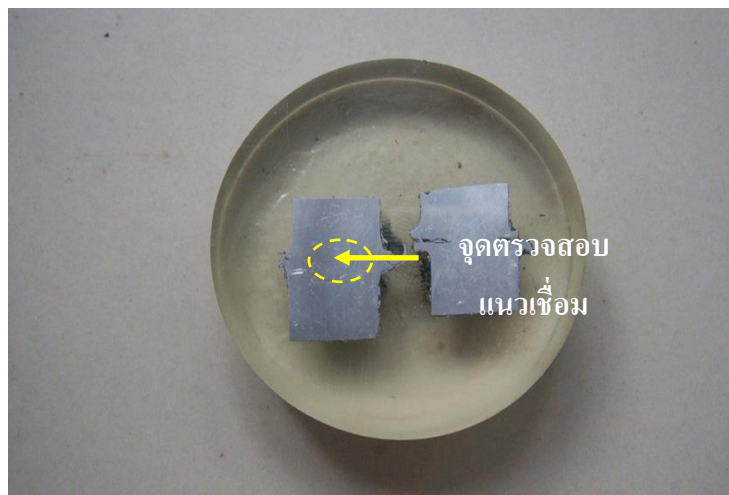
วัสดุอลูมิเนียม

วัสดุอลูมิเนียม

รูปที่ 4.23 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 147N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.23 จะไม่สามารถมองเห็นจุดที่วัสดุเชื่อมติดกันได้ชัดเจนเนื่องจากวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เชื่อมติดกันได้เป็นอย่างดี

2) แรงดัน 176N/m^2



รูปที่ 4.24 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m^2

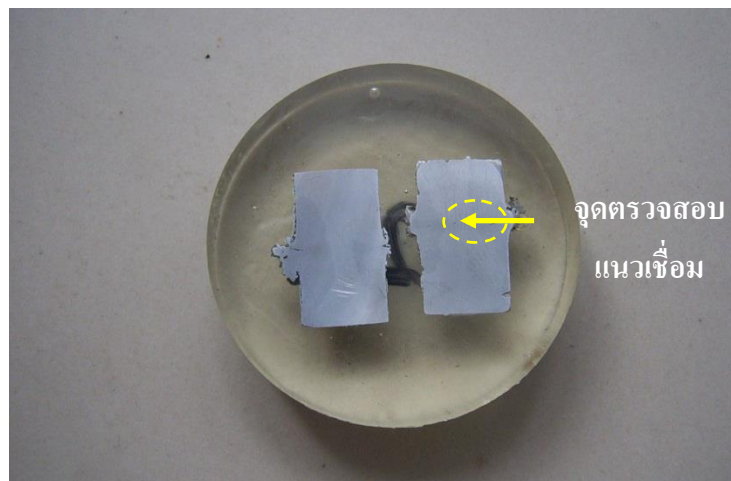


วัสดุอลูมิเนียม

วัสดุอลูมิเนียม

รูปที่ 4.25 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 176N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.25 จะไม่สามารถมองเห็นจุดที่วัสดุเชื่อมติดกันได้ชัดเจนเนื่องจากวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เชื่อมติดกันได้เป็นอย่างดี

3) แรงดัน 206N/m^2 

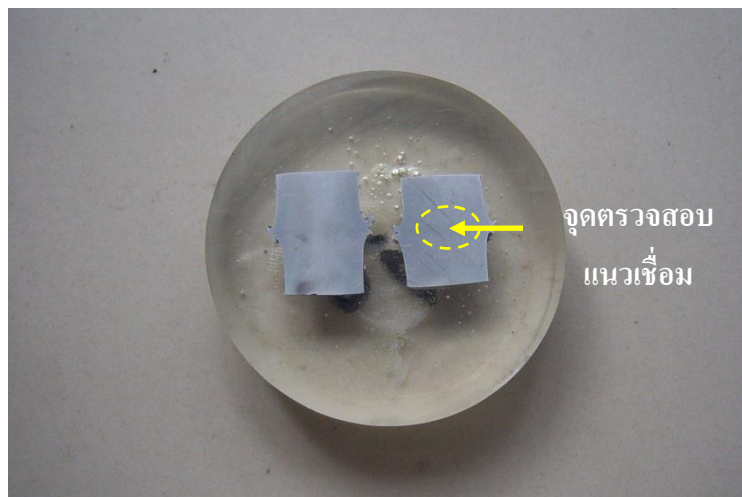
รูปที่ 4.26 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206N/m^2



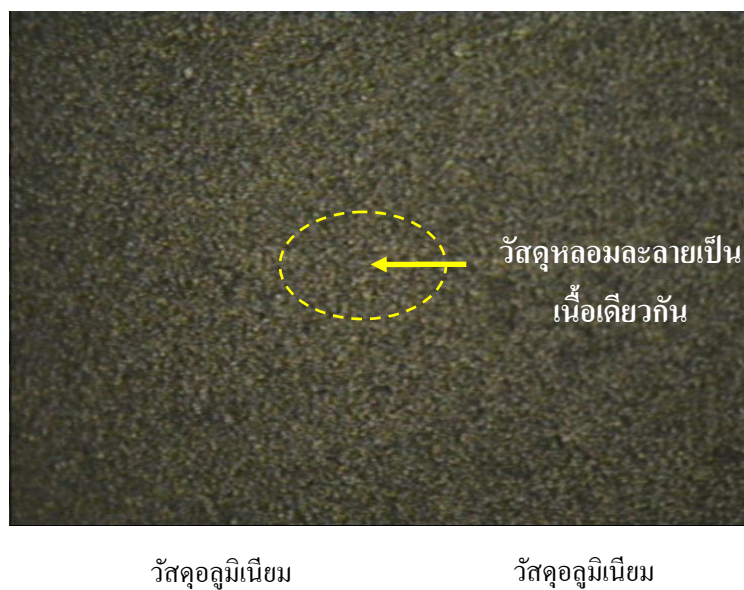
รูปที่ 4.27 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 206N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.27 ก็คงยังไม่สามารถมองเห็นแนวเชื่อมได้เนื่องจากวัสดุสามารถเชื่อมหลอมละลายติดกันได้เป็นอย่างดี แต่โครงสร้างของผิวจะมีกราฟไค์เพิ่มมากขึ้นนั่นหมายความว่าผิวขอแนวเชื่อมเริ่มแข็งมากขึ้น

4) แรงดัน 235N/m^2



รูปที่ 4.28 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235N/m^2

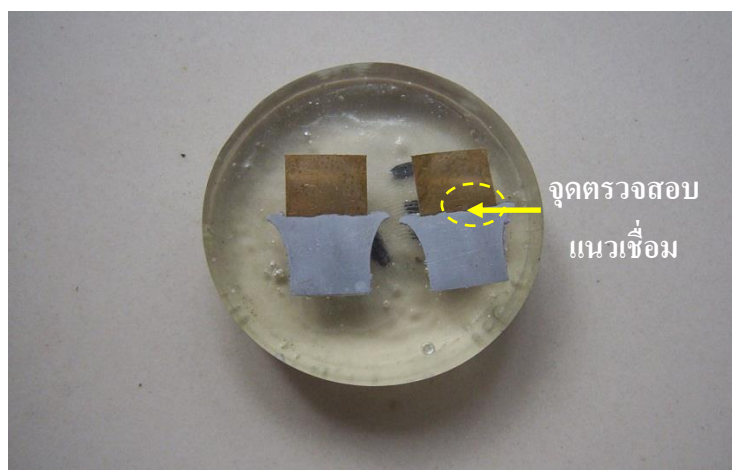


รูปที่ 4.29 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 235N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.29 ก็คงยังไม่สามารถมองเห็นแนวเชื่อมได้เนื่องจากวัสดุสามารถเชื่อมหลอมละลายติดกันได้เป็นอย่างดี แต่จากรูปโครงสร้างของผิวแนวเชื่อมกราฟไฟจะน้อยลงกว่าที่แรงดัน 206N/m^2 เล็กน้อยนั่นหมายความว่าความแข็งของผิวแนวเชื่อมเริ่มลดลง

4.5.2 ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองเหลืองบริเวณแนวเชื่อม ด้วยกล้อง Microscope (ขยาย 100X)

1) แรงดัน 147N/m^2



รูปที่ 4.30 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147N/m^2



วัสดุทองเหลือง

วัสดุอลูมิเนียม

รูปที่ 4.31 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 147N/m^2 (ขยาย 100X)

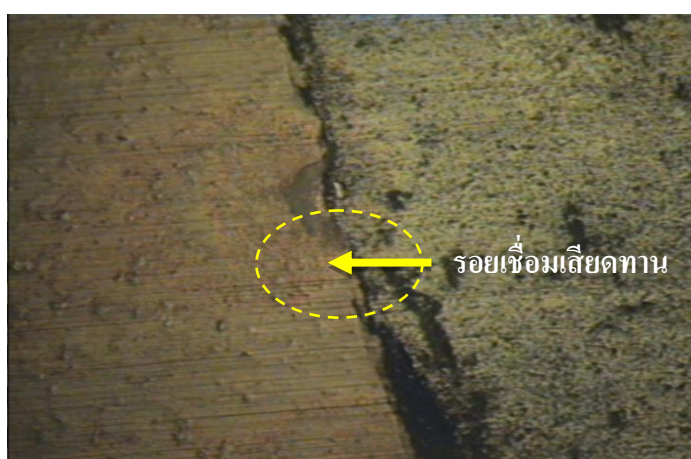
จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าวัสดุทองเหลืองมีการหลุดแตกออกเนื่องจากขนาดของแรงในการเชื่อมที่ยังไม่เหมาะสม ทำให้การเชื่อมยึดติดกันได้ไม่ดีเท่าที่ควรและสามารถมองเห็นแนว

เชื่อมได้ชัดเจนเนื่องจากวัสดุมีจุดหลอมละลายที่ต่างกันจึงไม่สามารถเชื่อมหลอมละลายติดเป็นเนื้อเดียวกันได้ แต่จากรูปโครงสร้างของผิวแนวเชื่อมแสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถเชื่อมติดกันโดยที่ไม่ได้หลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้แต่ก็ยังไม่ดีเท่าที่ควร

2) แรงดัน 176N/m^2



รูปที่ 4.32 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m^2



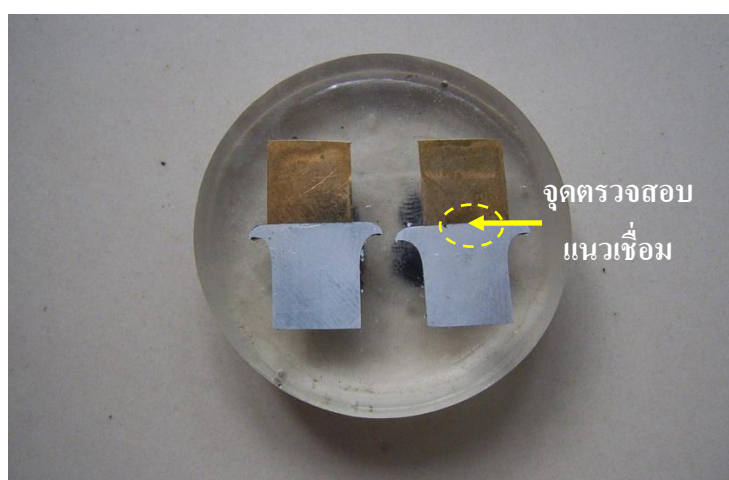
วัสดุทองเหลือง

วัสดุอลูมิเนียม

รูปที่ 4.33 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 176N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่าวัสดุทองเหลืองยังมีการหลุดแตกออกแต่น้อยลงเนื่องจากขนาดของแรงในการเชื่อมที่ยังไม่เหมาะสมแต่ที่ขนาดแรง 176 N/m^2 แนวเชื่อมจะยึดติดกันได้ดีกว่าแรง 147 N/m^2 เนื่องจากวัสดุมีการประสานกันได้ดียิ่งขึ้นและแนวเชื่อมสามารถมองเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากวัสดุมีจุดหลอมละลายที่ต่างกันจึงไม่สามารถเชื่อมหลอมละลายติดเป็นเนื้อเดียวกันได้ แม้แรงในการเชื่อมจะเพิ่มก็ตาม

3) แรงดัน 206 N/m^2



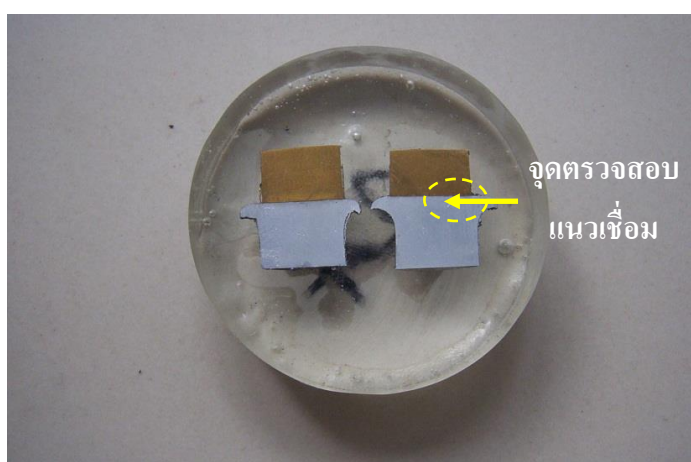
รูปที่ 4.34 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206 N/m^2



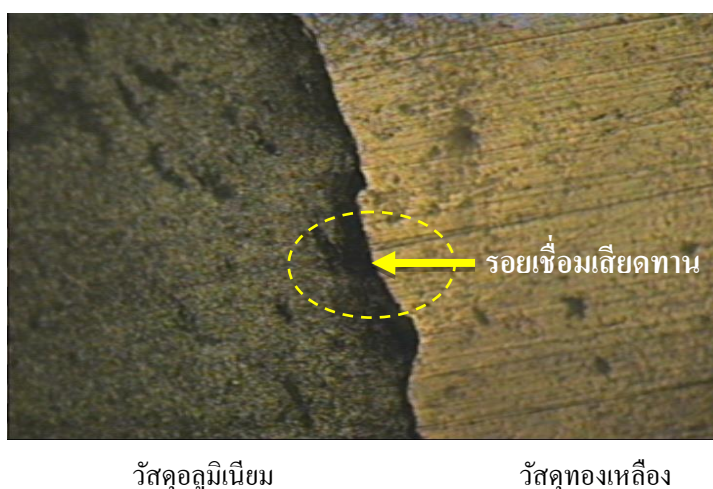
รูปที่ 4.35 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 206 N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.35 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ขนาดแรง 206N/m^2 แนวเชื่อมจะยึดติดกันได้ดีมากขึ้นเนื่องจากผิวของทองเหลืองขณะเชื่อมมีการหลุดแตกออกน้อยมากเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มหลอมละลายก่อนที่จะประสานติดกัน จึงทำให้สามารถยึดติดกันได้ดีตลอดแนวเชื่อม ได้ดีมากว่าที่แรงดันอื่นๆ จึงพอสรุปได้ว่าแรง 206N/m^2 เป็นแรงที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อม ด้วยแรงเสียดทานของวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลือง

4) แรงดัน 235N/m^2



รูปที่ 4.36 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235N/m^2



วัสดุอลูมิเนียม

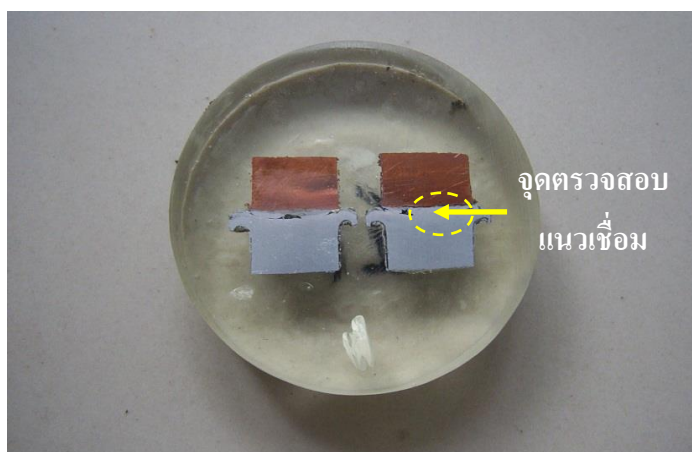
วัสดุทองเหลือง

รูปที่ 4.37 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 235N/m^2 (ขยาย 100X)

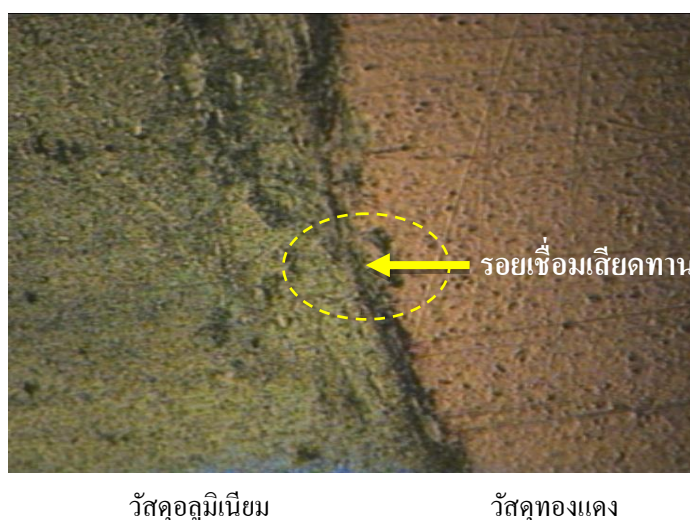
จากรูปที่ 4.37 จะเห็นว่าที่ขนาดแรง 235 N/m^2 แนวเชื่อมยังคงยึดติดกันได้ดีแต่ผิวของทองเหลืองขณะเชื่อมมีการหลุดแตกออกเพิ่มมากขึ้นกว่าแรง 206 N/m^2 เมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่อลูมิเนียมกำลังหลอมละลายก่อนที่จะประสานติดกัน จึงทำให้สามารถยึดติดกันไม่ได้ดีน้อยกว่าแรง 206 N/m^2 แต่อย่างไรก็ตามในแรง 235 N/m^2 ก็ยังสามารถเชื่อมติดกันได้ดีกว่าแรง 147 N/m^2 และ 176 N/m^2

4.5.3 ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงบริเวณแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope (ขยาย 100X)

1) แรงดัน 147 N/m^2



รูปที่ 4.38 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147 N/m^2



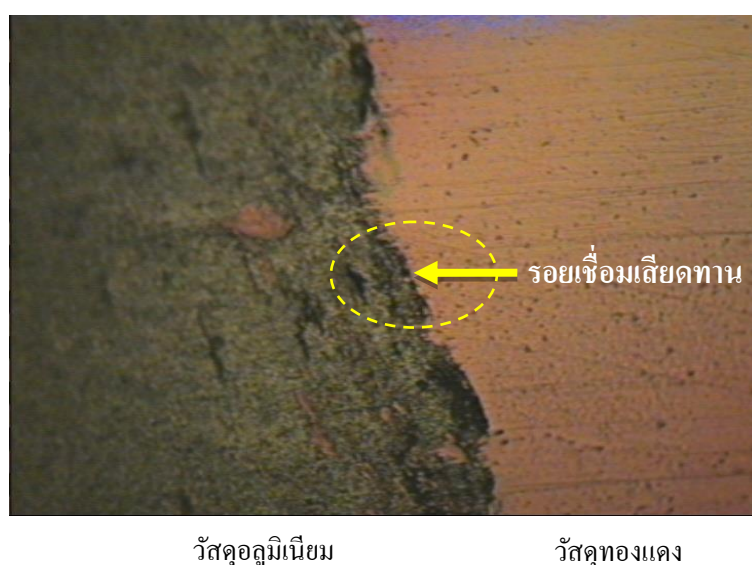
รูปที่ 4.39 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 147 N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.39 การเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากความร้อนสะสมที่วัสดุทองแดงมีค่าน้อยทำให้ทองแดงอ่อนตัวเกิดการซึมลึกไม่เต็มผิวหน้าสัมผัสบวกกับจุดหลอมละลายที่ต่างกันของวัสดุทั้งสองจึงทำให้ทองแดงแทรกตัวไปปะปนกับอลูมิเนียมได้น้อยมากและเป็นอลูมิเนียมที่หลอมละลายมาติดกับทองแดงมากกว่าทำให้สามารถเชื่อมติดกันได้

2) แรงดัน 176N/m^2



รูปที่ 4.40 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m^2



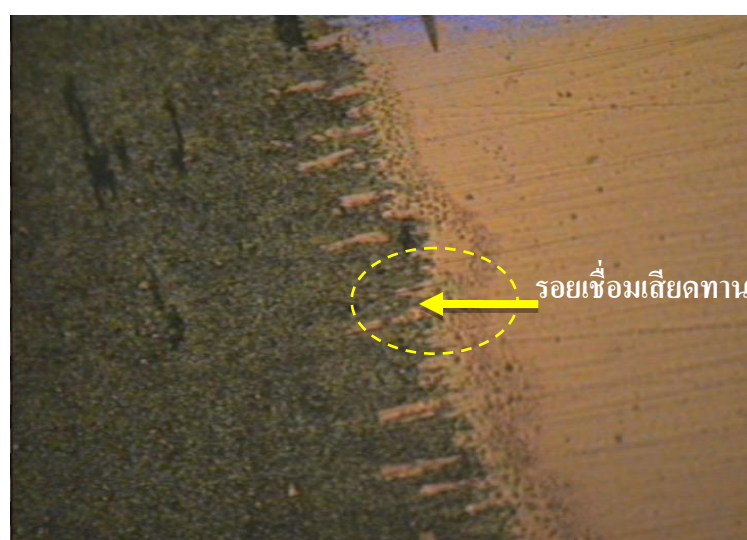
รูปที่ 4.41 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 176N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.41 การเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงเริ่มประสานกันได้ดีขึ้น เนื่องจากความร้อนสะสมที่วัสดุทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ทองแดงสามารถแทรกซึมลึกได้มากขึ้น ทำให้ทองแดงแทรกตัวไปปะปนกับอลูมิเนียมได้ดีขึ้น

3) แรงดัน 206N/m^2



รูปที่ 4.42 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206N/m^2



วัสดุอลูมิเนียม

วัสดุทองแดง

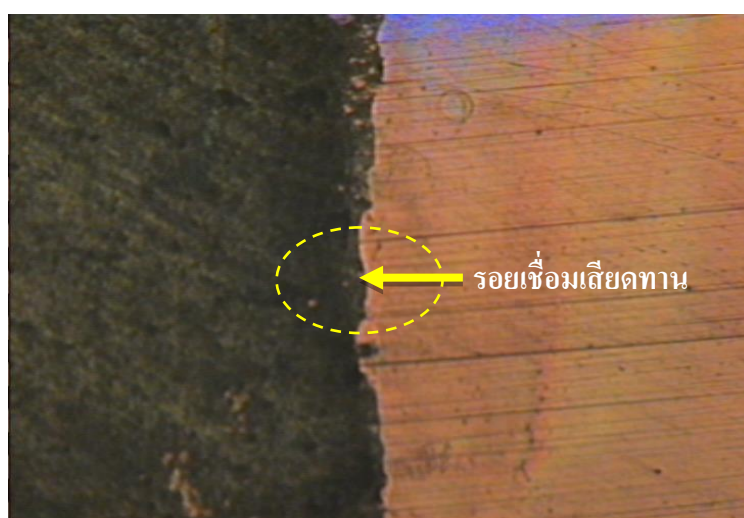
รูปที่ 4.43 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 206N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.43 การเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงเริ่มประสานกันได้ดีมากขึ้นเนื่องจากความร้อนสะสมที่วัสดุทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นบวกกับแรงขนาด 206 N/m^2 เป็นแรงที่เหมาะสมในการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง ทำให้ทองแดงกับอลูมิเนียมสามารถแทรกซึมได้ลึกมากที่สุด

4) แรงดัน 235 N/m^2



รูปที่ 4.44 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235 N/m^2



วัสดุอลูมิเนียม

วัสดุทองแดง

รูปที่ 4.45 แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 235 N/m^2 (ขยาย 100X)

จากรูปที่ 4.45 การเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมกับทองแดงสามารถมองเห็นได้ว่าเชื่อมติดกันได้น้อยลงทั้งๆที่ความร้อนสะสมที่วัสดุทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากแรงที่ใช้ในการเชื่อมมากเกินไปทำให้รอยเชื่อมมีรอยไหม้มากขึ้นส่งผลกระทบทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรง การประสานกันของวัสดุทั้งสองชนิดจึงเริ่มน้อยลง

การเชื่อมติดกันของวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ตัวอย่างเช่นการเชื่อมติดกันระหว่างอลูมิเนียมและทองเหลืองเกิดจากแรงเสียดทานเมื่ออลูมิเนียมหมุนและทองเหลืองเคลื่อนที่เข้าเสียดสีกับอลูมิเนียมทำให้เกิดความร้อนทำให้อลูมิเนียมเมื่อทองเหลืองเคลื่อนที่ไประยะหนึ่ง อลูมิเนียมและทองเหลืองจะเสียดทานเข้าด้วยกันด้วยแรงบิดจากการหมุนของอลูมิเนียมและแรงการเคลื่อนที่ของทองเหลืองเมื่อทำการหยุดการหมุนอลูมิเนียมและหยุดการเคลื่อนที่ของทองเหลืองทันทีทันใดด้วยหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะทำให้อลูมิเนียมและทองเหลืองส่วนที่ใกล้จุดหลอมละลายเกิดการเย็นตัวลงเกิดเป็นแนวเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมและทองเหลือง

จากการทดลองสภาวะของอุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานมีผลต่อการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม เพราะที่อุณหภูมิสูงชิ้นงานเกิดการระบายความร้อนออกจากชิ้นได้น้อยกว่าอุณหภูมิปกติทำให้ขณะทำการเชื่อมแบบเสียดทานอุณหภูมิของชิ้นงานจึงสูงตามไปด้วยการเชื่อมติดกันระหว่างวัสดุดังกล่าวจึงดีกว่าอุณหภูมิปกติและวัสดุที่จุดหลอมเหลวที่แตกต่างกันมากจะสามารถเชื่อมติดกันได้ดีทำให้ได้แนวเชื่อมที่ดีด้วย

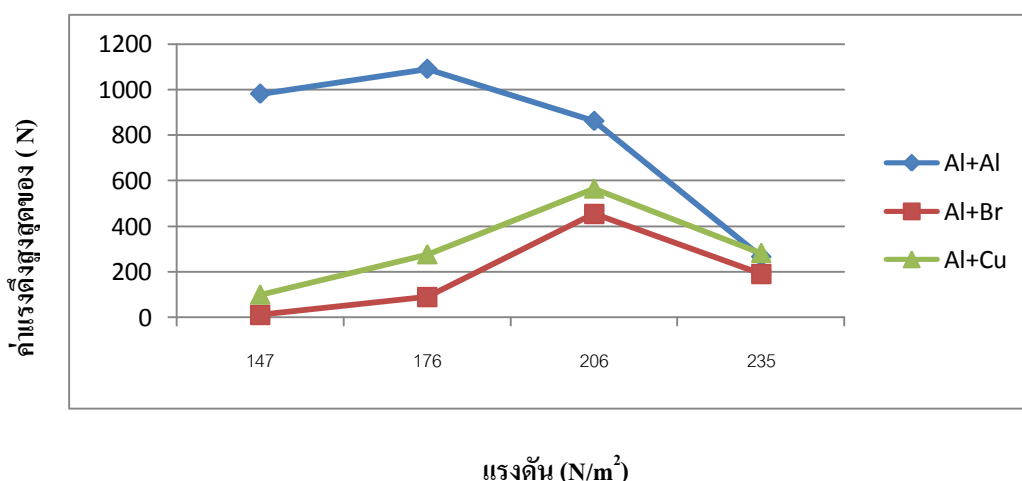
บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคการเชื่อมต่อโลหะผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน สำหรับอุตสาหกรรมการเชื่อมสามารถรู้ถึงแนวโน้มและปัญหาของการเชื่อมวัสดุ อลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม เมื่อมีการเพิ่มตัวแปรให้กับการเชื่อมแบบเสียดทานเช่น อุณหภูมิ ความเร็วรอบ และความเร็วอัดเข้าไป เป็นต้น ในการดำเนินโครงการนี้จะได้ผลการทดลองที่มีความแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด และสามารถสรุปผลโครงการได้ดังนี้

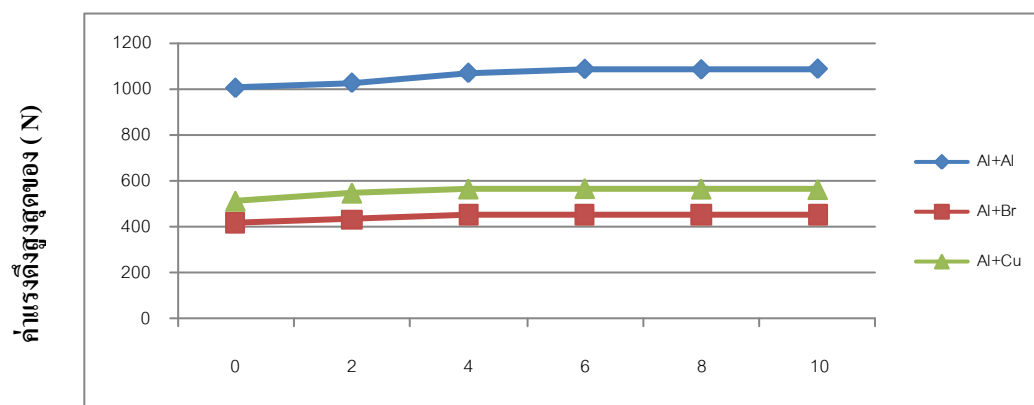
5.1 สรุปผลการทำโครงการ

จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียมการเชื่อมได้ค่าต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดจะอยู่ที่ 1091 N วัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงการเชื่อมได้ค่าต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 564.28 N วัสดุ อลูมิเนียมกับกับทองเหลืองการเชื่อมได้ค่าต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 454.08 N จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุจะเห็นได้ว่าวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียมมีค่าต้านทานแรงดึงได้มากกว่าวัสดุผสมชนิดอื่น เนื่องจากวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมในการเชื่อมมีการยึดติดกันได้ดีกว่าวัสดุผสมชนิดอื่น สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.1



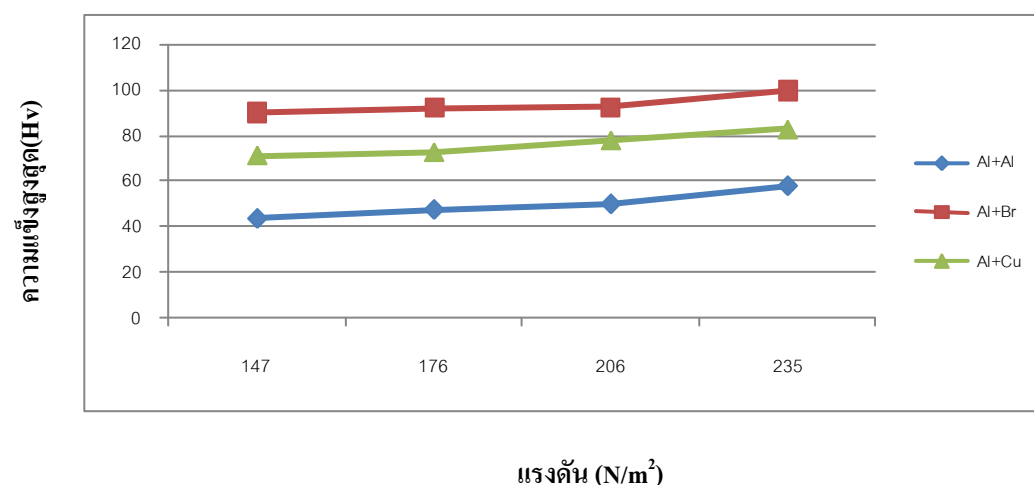
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ในการต้านทานแรงดึง

จากการศึกษาระยะเวลาการแช่ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับโลหะผสมในการเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมเวลาการแช่ที่เหมาะสมคือ 4 วินาที อลูมิเนียมกับทองแดง 6 วินาที อลูมิเนียมกับทองเหลือง 4 วินาทีซึ่งเป็นเวลาการแช่ที่สามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุดและเหมาะสมที่สุด สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์การต้านทานแรงดึงสูงสุดระหว่างของวัสดุผสมกับเวลาการแช่

จากการทดสอบความแข็งแรงผิวของแนวเชื่อมของวัสดุ อลูมิเนียมกับอลูมิเนียมได้ค่าความแข็งแรงผิวของแนวเชื่อมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 57.90 Hv วัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงได้ค่าความแข็งแรงผิวของแนวเชื่อมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 83.28 Hv วัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองได้ค่าความแข็งแรงผิวของแนวเชื่อมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 100.18 Hv จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าอลูมิเนียมกับทองเหลืองจะแข็งที่สุด เนื่องจากผิวทองเหลืองมีความแข็งแรงมากที่สุด ประมาณ 122.7 Hv ทองแดง 94.4 Hv และอลูมิเนียม 56.1 Hv สามารถที่จะนำเสนอเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน

จากการตรวจสอบแนวเชื่อมพบว่าบริเวณการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลือง อลูมิเนียมกับทองแดง และอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมจะเห็นว่าเชื่อมของวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม เกิดการเกาะยึดเข้ากันได้ดี สาเหตุเพราะว่าอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าทองเหลือง และทองแดงทำให้เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ รอยเชื่อมที่ได้ก็มีความแข็งแรงอีกด้วย แต่เมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายของตัวอลูมิเนียมก็จะเกิดรอยไหม้ เลยไม่เหมาะกับการเชื่อมที่อุณหภูมิสูง

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ

- 5.2.1 หลังจากการเลื่อนชิ้นงานแนวเชื่อมเกิดการหลุด
- 5.2.2 การควบคุมการหมุนอัดระหว่างการเชื่อมไม่คงที่
- 5.2.3 การเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมไม่เหมาะกับการเชื่อมที่อุณหภูมิที่สูงๆ
- 5.2.4 ขณะเชื่อมงานเข้าด้วยกันชุดกระบอกไฮดรอลิกมีการสั่นสะท้าน

5.3 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

- 5.3.1 การเชื่อมวัสดุที่มีจุดหลอมละลายที่ใกล้เคียงกันจะทำให้ได้แนวเชื่อมที่ดีและแข็งแรง
- 5.3.2 ควรใช้เครื่องกลึงที่มีประสิทธิภาพสูงในการเบรคหยุดเครื่อง
- 5.3.3 การเลื่อนชิ้นงานควรใช้ ไมโครไฟเบอร์ในการตัดผ่านชิ้นงาน
- 5.3.4 ก่อนการทดลองต้องทำความสะอาดชิ้นงานก่อน

บรรณานุกรม

- [1] เชษฐา สุเพ็งคำ, และคณะ. 2546. **เครื่องเชื่อมแรงเสียดทาน** ปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง คณะอุตสาหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] ชลิตต์ มธุรสมนตรี และ คณะ. 2544. **กระบวนการผลิต**. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ.
- [3] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. 2542. **คู่มือการเชื่อมมิก-แม็ก**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [4] Sahin,A.Z., Yibas, B.S., Ahmed, M., Nickel, J., 1998, Analysis of the friction welding process
in relation to the welding of copper and steel bars, Journal of Materials Processing Technology
82, pp.127–136.
- [5] Sahin, M., 2005, Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel, Journal of Materials Processing Technology 168, pp.202–210.
- [6] Seli, H., Ismail, A. I., Rachman, E., Ahmad, Z.A., Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium,2010, Journal of Materials Processing Technology 210, pp. 1209–1216.
- [7] Yilba, B.S., Sahin, A.Z., Kahraman, N. and, Garni,A., Friction welding of St-A1 and Al-Cu materilas, 1995, Journal of Materials Processing Technology (49), pp. 431–443.
- [8] อติศักดิ์ วรรณะวัลย์. 2521. **วิศวกรรมเชื่อม**. กรุงเทพฯ : พิมพ์ครั้งที่ 2
- [9] **Advantage Fabricated Metals. Shielded Metal Arc Welding.**[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://www.advantagefabricatedmetals.com/images/smaw.gif>
- [10] มนัส สติธิจินดา. 2538. **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] http://www.tozzhin.com/dynamic_th/web/article_detail. (11 สิงหาคม 2552)
- [12] มานพ ต้นตระกูลจิตต์. 2546 **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม (ฉบับปรับปรุง)**. กรุงเทพฯ : สมาคม
ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [13] Sammak. **Microscope**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
http://www.princess-it.org/kp9/hrhprojects/file/20060327_sammakkee/Aee/Lunla/index.htm