

# โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิว เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C

## Microstructure and Wear Resistance of Hard-facing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface

สุรัตน์ ตรีวานพงศ์\* วรญา วัฒนจิตสิริ และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี E-mail: surat.t@en.rmutt.ac.th \* โทรศัพท์ 02-549-4416

Surat Triwanapong\*, Voraya Wattanajitsiri and Kittipong Kimapong

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyaburi, Klong-hok, Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand.

E-mail: surat.t@en.rmutt.ac.th \* Tel 02-549-4416

### บทคัดย่อ

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C เป็นโลหะสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรเกษตรเนื่องจากสมบัติทางกลที่ดีและราคาถูก เมื่อชิ้นส่วนเหล่านี้ถูกนำไปใช้และเกิดความเสียหายในการใช้งาน ชิ้นส่วนมักถูกนำมาทำการซ่อมโดยเทคนิคการเชื่อมซ่อมด้วยการเลือกตัวแปรการเชื่อมแบบสุ่ม ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงพบว่ามี การศึกษาเกี่ยวกับการเลือกตัวแปรการเชื่อมที่มีความเหมาะสมกับรูปร่างและชนิดโลหะเฉพาะตลอดเวลา งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การลดอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมส่งผลทำให้เกิดการลดขนาดเกรน เพิ่มความแข็ง และเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าอัตราการสึกหรอ 2.0200 กรัม และความแข็ง 984 HV มีค่าเท่ากับ 150°C การเพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็งส่งผลทำให้ลดอัตราการสึกหรอของโลหะเชื่อม เนื่องจากการลดขนาดเกรนและการเพิ่มความแข็งของโลหะเชื่อม

**คำสำคัญ:** การเชื่อมพอกแข็ง, อุณหภูมิอุ้งงาน, อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม, อัตราการสึกหรอ, โครงสร้างจุลภาค

### Abstract

JIS-S50C medium carbon steel was important raw metal that used for producing the agricultural machine part because of an excellent mechanical properties and low cost. When these parts were applied and failed during the service, the parts were frequently repaired using a welding repair technique with a random selection of welding process parameter. In the present day, it was found that the selection of the optimized welding process parameter for specific part and metal was still concerned and investigated. This research aimed

to study an influence of pre-heat temperature and inter-pass temperature on JIS-S50C medium carbon steel hard-facing weld metal properties. The summarized experimental results showed that decreasing of pre-heat temperature and the inter-pass temperature affected to decrease the grain size, increase the hardness and also increase the wear resistance of the hard-facing weld metal. The optimized pre-heat temperature and inter-pass temperature that produced the weld metal hardness of 984 HV and minimum wear rate of 2.02 g was the pre-heat temperature and the inter-pass temperature of 150°C. Increase of hard-facing layer also affected to decrease the wear rate due to the decrease of the grain size and the increase of the weld metal hardness.

**Key word:** Hard-facing welding, pre-heat temperature, inter-pass temperature, wear rate, microstructure

## 1. บทนำ

ความต้านทานการสึกหรอเป็นสมบัติสำคัญของโลหะที่ใช้ในการผลิตเครื่องมือ ชิ้นส่วน และเครื่องจักรทางกลศาสตร์ ที่มีการสัมผัสเสียดสีกับชิ้นส่วนหรือสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดการสึกหรอ [1] เมื่อชิ้นส่วนเกิดการพังทลายหรือเสียหายเนื่องจากการใช้งาน ชิ้นส่วนมักถูกนำไปทำการซ่อมแซมเพื่อให้สามารถนำชิ้นส่วนกลับมาใช้ใหม่ได้ และทำให้เกิดการลดต้นทุนในการผลิตสินค้าเกษตรของเกษตรกรลงได้ ในการซ่อมแซมชิ้นส่วนที่เกิดการพังทลายนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่นการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal spray) การชุบผิวแข็ง (Surface hardening) วิธีการเชื่อมพอกแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการที่สามารถซ่อมแซมผิวของชิ้นส่วนที่เกิดการสูญหายจากการสึกหรอได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถทำให้เกิดผิวหน้าที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสม เช่น ความต้านทานการสึกหรอ และความแข็งสูงที่ผิวหน้าและที่กึ่งกลางของชิ้นส่วนที่มีความเหนียว (Ductile property) [2] ตัวแปรการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสมสามารถทำให้เกิดสมบัติทางกลที่มีค่าสูงได้ เช่น ส่วนผสมทางเคมีสำคัญทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็ง ความสามารถในการขึ้นรูป และพฤติกรรมความต้านทานการสึกหรอสูงได้นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและขนาดเกรนของโลหะเชื่อมที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงวิธีและขนาดของความร้อนที่ให้แก่โลหะฐานและลวดเชื่อมขณะทำการเชื่อมลวดสามารถส่งผลทำให้สมบัติทางกลของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นได้ [3]

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของ โครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลในรอยเชื่อมอาร์กอลูมิเนียม ฟลักซ์และรอยเชื่อมอาร์กอลูมิเนียมตัวประสานอยู่ในเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA) โดยการเปรียบเทียบผลของการเชื่อมเชื่อมกับสภาวะการเชื่อมทั่วไป โดยชิ้นงานเชื่อมเชื่อมประกอบด้วย การเชื่อมสร้างชั้นรองพื้น (Buffering layer) และไม่มีชั้นรองพื้น (No-buffering layer) ชิ้นงานที่ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความล้าตัวของรอยเชื่อม พบว่ารอยเชื่อมเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้นชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมจริงทำให้ความแข็งแรงบริเวณพื้นหลอมละลายมีค่าลดลง โดยมีสาเหตุมาจากเฟอไรต์ถูกกักขังไว้ในโครงสร้าง [4] และนอกจากนั้นการศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมอาร์กอลูมิเนียมฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งที่มีส่วนผสมหลัก คือ นิกเกิล เชื่อมบนผิวเหล็กหล่อเหนียวโดยการทำการเชื่อมแนวเดียว (Single

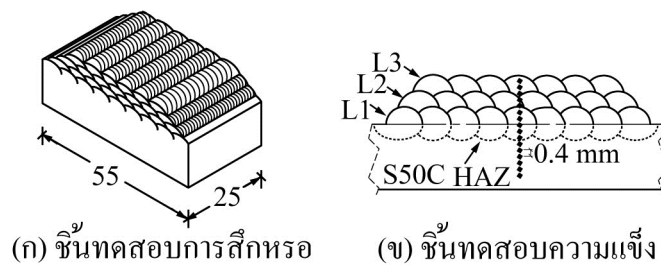
pass) และสองแนว (2 passes) ผลของการจำนวนแนวเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาคของผิวพอกแข็งถูกทำการศึกษา พบว่า โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยออสเทนไดต์ (Fe, C) เฟสแกมมา (Fe, Ni) และคาร์ไบด์ส่วนเล็กๆ ( $Cr_7C_3$ ) ความแข็งของผิวพอกแข็งมีค่าสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียว โดยค่าความแข็งแนวเดียวและสองแนวมีค่า 500 และ 450HV ตามลำดับ [5] หรือการศึกษาทำการเคลือบผิวแข็งโลหะผสม Ni-Cr-B-Si บนเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยการใช้เลเซอร์ จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และการต้านทานการสึกหรอ พบว่า ปริมาณการเกิดการเงาของส่วนผสมทางเคมีส่งผลในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างจุลภาค จากเฟสขนาดใหญ่และหยาบมาสู่เฟสที่มีโครงสร้างเหล็กละเอียดมีรูปร่างเป็นคอลัมน์ ความแข็งของผิวพอกแข็งมีค่าลดต่ำลงตามระยะความห่างจากพื้นผิวพอกแข็ง [6]

ข้อมูลงานวิจัยข้างต้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงความแข็งหรือความต้านทานการสึกหรอ และ โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของผิวเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้ความร้อนที่ให้แก่โลหะเชื่อม (Heat input) ที่เปลี่ยนแปลงสามารถส่งผลทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมได้ เหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิอุ่นงาน (Pre-heat temperature) และอุณหภูมิระหว่างที่ยาวเชื่อม (Inter-pass temperature) ที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์ ผลการทดลองที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการเชื่อมชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C ที่มีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย 0.52%C 0.26%Si 0.78%Mn และ 0.19%Cr (%โดยน้ำหนัก) ขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร ผิวด้านบนของแผ่นเหล็กถูกทำการเจียรในผิวหน้าเพื่อกำจัดผิวดิบและปรับให้เรียบสม่ำเสมอ โลหะเชื่อมพอกแข็งถูกทำการเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการรับรองมาตรฐานจากกรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน โดยใช้ลวดหุ้มฟลักซ์พอกแข็งที่มีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย 0.4%C 1.5%Si 0.2%Mn และ 8.5%Cr (%โดยน้ำหนัก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร และกำหนดให้ใช้กระแสเชื่อม 100A ก่อนและขณะทำการเชื่อมชิ้นงานถูกอุ่นงาน (Preheat temperature) และควบคุมอุณหภูมิระหว่างที่ยาวเชื่อม (Inter-pass temperature) ที่ 150°C จำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้นซึ่งแสดงผลการเชื่อมที่แสดงความต้านทานการสึกหรอสูงสุดในการทดลองที่ผ่านมา [7] การเชื่อมเป็นแบบเดินแนวเส้นตรงไม่ส่ายลวดเชื่อม (Non waving) แนวเชื่อมที่ได้ถูกนำมาทำการตัดตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อมเพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 1 (ก) ชิ้นทดสอบที่ได้นี้ถูกนำไปทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-2000 ขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร และกัดผิวหน้ามันวาวด้วยสารละลาย 5%ไนตรัส เพื่อแสดงรายละเอียดเกรน ชิ้นงานที่ได้ถูกนำไปทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยทำการตรวจที่ตำแหน่งต่างๆ ประกอบด้วยโลหะฐาน (S50C) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) โลหะเชื่อมชั้นที่ 1 (L1) โลหะเชื่อมชั้นที่ 2 (L2) และ

โลหะเชื่อมชั้นที่ 3 (L3) ดังรูปที่ 1 (ข) ความแข็งไมโครวิกเกอร์สของแนวเชื่อมถูกทำการทดสอบบนผิวหน้าการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยทำการทดสอบเริ่มต้นที่ผิวบนสุดของโลหะเชื่อมจนถึงโลหะฐานดังรูปที่ 1 (ข) กำหนดให้ระยะห่างของจุดทดสอบเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร แรงกด 100 กรัม เวลากด 10 วินาที อัตราการสึกหรอหาค่าได้โดยการใช้ชั้นทดสอบดังรูปที่ 1 (ก) มาทำการทดสอบการสึกหรออ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G65 สภาวะทดสอบ คือ ทรายทะเลขนาด 300 ไมโครเมตร อัตราการไหลของผงขัด 390 กรัมต่อนาที ความเร็วรอบของล้ออย่าง 200 รอบต่อนาที แรงกด 130 N และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 30 นาที [8]

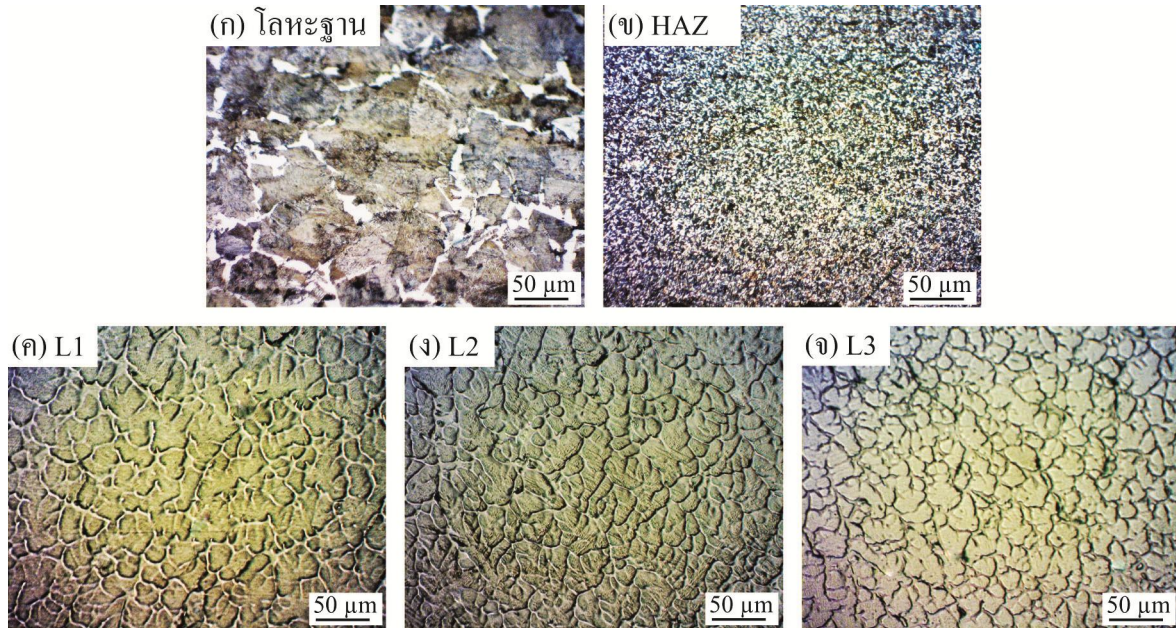


รูปที่ 1 ชั้นทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม (หน่วย: มิลลิเมตร)

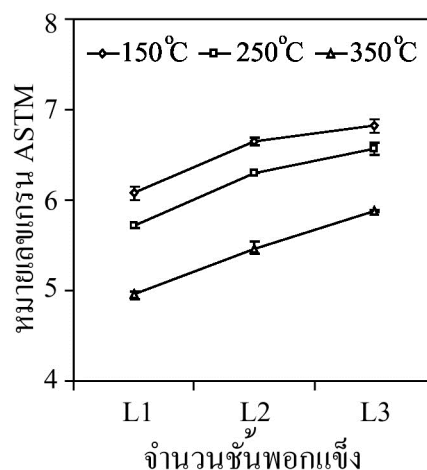
### 3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ประกอบด้วยโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือ พื้นที่สีขาวของเฟอไรต์และพื้นที่สีเข้มของเพิลไลต์ ซึ่งเป็นเฟสพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.5% ดังรูปที่ 2 (ก) เฟสทั้งสองสามารถพบได้เช่นเดียวกันในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้า AISI1015 แต่มีปริมาณเฟสที่แตกต่างกัน [9] อย่างไรก็ตามชื่อของเฟสที่ปรากฏนั้นเป็นการเทียบเคียงเฟสมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเท่านั้น การระบุรูปแบบเฟสที่ถูกต้องด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพสูง เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) ต่อไป เมื่อโลหะฐานได้รับความร้อนจากการเชื่อมเฟสทั้งสองถูกปรับให้มีขนาดเล็ก ละเอียด และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอดังพบได้ในโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระทบร้อนในรูปที่ 2 (ข) เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าสู่พื้นที่ของโลหะพอกแข็งเฟสเฟอไรต์และเฟสเพิลไลต์ไม่สามารถตรวจสอบพบได้ และพบเฟสเนื้อเดียวของโลหะเชื่อมที่มีความกลมมน (Equi-axed grain) เพียงเฟสเดียวดังรูปที่ 2 (ค)-(ง) เมื่อทำการตรวจสอบเกรนตามมาตรฐาน ASTM E 1120-10 และแสดงผลการตรวจสอบดังรูปที่ 3 พบว่าเกรนมาตรฐานมีตัวเลขเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ให้ทราบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าลดลง การลดลงของค่าอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมส่งผลทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าลดลงด้วย (หมายเลขเกรนมาตรฐานเพิ่มขึ้น) การเพิ่มอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมส่งผลให้ขนาดเกรนลดลงนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของโลหะเชื่อมอาร์กด้วยแท่งทั้งสะเตนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 [10] และการเชื่อมซ้อนหลายแนวบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 [11]

ที่พบการเติบโตของเกรน (Grain growth) ในพื้นที่ที่กระตบร้อนและโลหะเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อโลหะเชื่อมได้รับความร้อนซ้ำ และมีค่าอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้น การควบคุมให้อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมมีค่าต่ำสามารถทำให้เม็ดเกรนของโลหะเชื่อมมีค่าเล็กและละเอียดได้ และสามารถส่งผลทำให้สมบัติทางกลของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นได้

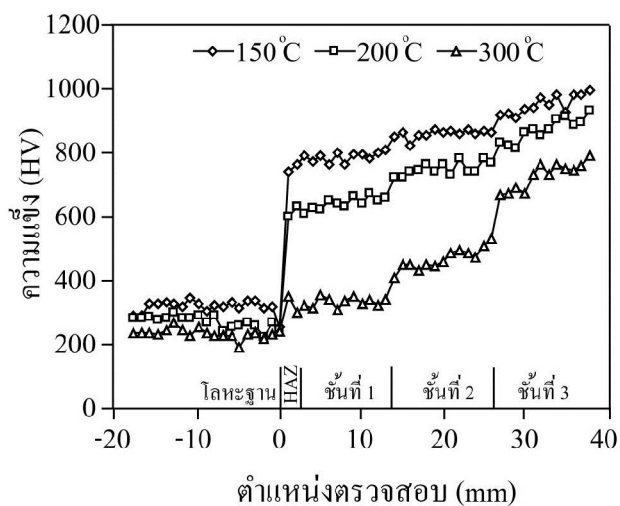


รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150°C

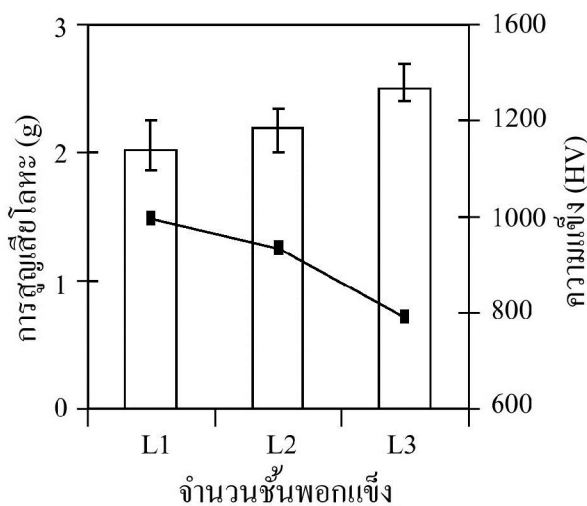


รูปที่ 3 หมายเลขเกรนมาตรฐานโลหะเชื่อม

รูปที่ 4 (ก) แสดงผลการทดสอบความแข็ง โลหะเชื่อมพอกแข็งที่กำหนดให้ตำแหน่ง 0.0 มิลลิเมตร คือ ขอบเขตระหว่างโลหะฐานและพื้นที่ที่กระทบร้อน พบว่าโลหะฐานมีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 230-320 HV ค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 350 HV ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มความกลมมนและละเอียดขึ้นของเฟสเฟอร์ไรต์และซิเมนไตต์ดังที่กล่าวไว้ในรูปที่ 2 (ข) ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าสู่พื้นที่โลหะเชื่อมพอกแข็ง และสูงขึ้นเมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งมีค่าเพิ่มจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น ค่าความแข็งสูงสุดของการทดสอบประมาณ 984 HV พบได้ที่ตำแหน่งผิวบนสุดของโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ของโลหะเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 150°C เมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบหมายเลขเกรนมาตรฐานในรูปที่ 3 พบว่าค่าความแข็งที่ได้แปรผกผันกับการลดลงของขนาดเกรนโลหะเชื่อมพอกแข็ง พื้นที่ที่กระทบร้อน และโลหะเชื่อมตามลำดับ การลดขนาดเกรนที่ส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะเชื่อมหลายชนิด รวมถึงการเกิดในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานกวนที่ก่อให้เกิดเกรนเล็กและละเอียด และส่งผลทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมสูงขึ้นไปตามกฎของฮอลล์เพทซ์ (Hall-Petch rule) [12] ค่าความแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นและมักแสดง ความแข็งสูงสุดที่ผิวหน้าแนวเชื่อมนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก การเกิดการเจือจาง (Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมมากขึ้นเมื่อจำนวนชั้นของโลหะเชื่อมพอกแข็งเพิ่มขึ้นและตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้ผิวหน้าโลหะเชื่อม [13]



(ก) ความแข็งของโลหะเชื่อมพอกแข็ง



(ข) การสูญเสียโลหะของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

รูปที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

รูปที่ 4 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม และปริมาณการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 ถึง 3 พบว่าการสึกหรอของผิวหน้าโลหะเชื่อมแปรผกผันตามความแข็ง

ของโลหะเชื่อมที่ได้ ความแข็งของโลหะเชื่อมที่มีค่าสูงให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงสุด (การสูญเสียโลหะต่ำสุด) อุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150°C ที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดแสดงการสูญเสียมวลต่ำสุด ประมาณ 2.020 กรัม การเพิ่มอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อมสูงขึ้นทำให้เกรนใหญ่ขึ้นและความแข็งต่ำลง ส่งผลทำให้การสึกหรอสูงขึ้น ผลการทดลองที่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่มีเหตุผลระหว่างรูปแบบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และอัตราการสึกหรอของโลหะเชื่อม หากโลหะเชื่อมมีเกรนละเอียดและความแข็งสูง อาจสามารถพยากรณ์ได้ว่าโลหะเชื่อมที่ได้มักมีค่าความต้านทานการสึกหรอสูงด้วย [14, 15]

#### 4. สรุปผลการทดลอง

- 4.1 โลหะเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยอุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150°C และโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น แสดงค่าความต้านทานการสึกหรอต่ำสุดที่ค่าประมาณ 2.02 กรัม
- 4.2 อุณหภูมิอุ้งงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อมที่ลดลงส่งผลทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลทำให้เพิ่มความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อม
- 4.3 จำนวนชั้นโลหะเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดความละเอียดและการกระจายตัวของเฟสเสริมความแข็งในโลหะฐานและโลหะเชื่อม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยประจำปี 2558 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. H. Jones and P. Roffey, "The improvement of hard facing coatings for ground engaging applications by the addition of tungsten carbide," *Wear*, Vol. 267, pp. 925-933, 2009.
- [2] J. Liu, S. Yang, W. Xia, X. Jiang, and C. Gui, "Microstructure and wear resistance performance of Cu-Ni-Mn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 654, pp. 63-70, 2016.
- [3] M. S. Shadabroo, A. R. Eivani, H. R. Jafarian, S. F. Razavi, and J. Zhou, "Optimization of interpass annealing for a minimum recrystallized grain size and further grain refinement towards nanostructured AA6063 during equal channel angular pressing," *Materials Characterization*, Vol. 112, pp. 160-168, 2016.
- [4] C. Zhang, X. Song, P. Lu, and X. Hu, "Effect of microstructure on mechanical properties in weld-repaired high strength low alloy steel," *Materials & Design*, Vol. 36, pp. 233-242, 2012.

- [5] R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, and M. Shamanian, "Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding," *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 1531-1536, 2011.
- [6] S. Selvi, S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan, "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, pp. 356-362, 2008.
- [7] K. Kimapong, P. Poonnayom, and V. Wattanjitsiri, "Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts," *Materials Science Forum*, Vol. 872, pp. 55-61, 2016.
- [8] S. Gao, H. Nakashin, M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, H. Watanabe, *et al.*, "Development of WC Hard-facing Welding Process using Pulse Heated Hot-wire Gas Tungsten Arc Welding System," *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY*, Vol. 31, pp. 57s-60s, 2013.
- [9] S. Kyle, R. Benjamin, and P. Rajiv, "Segregation, Banding, and Inclusions in AISI 1050 Carbon Steel," *Materials Processing and Design*, pp. 430-440, 2010.
- [10] H. Jamshidi Aval, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "Prediction of Grain Growth Behavior in HAZ During Gas Tungsten Arc Welding of 304 Stainless Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, pp. 1193-1200, 2009.
- [11] X. Chen, X. Chen, H. Xu, and B. Madigan, "Monte Carlo simulation and experimental measurements of grain growth in the heat affected zone of 304 stainless steel during multipass welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, pp. 1197-1211, 2015.
- [12] Y. Sun, H. Fujii, Y. Takada, N. Tsuji, K. Nakata, and K. Nogi, "Effect of initial grain size on the joint properties of friction stir welded aluminum," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, pp. 317-321, 2009.
- [13] I. Hemmati, V. Ocelík, and J. T. M. De Hosson, "Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys," *Materials Letters*, Vol. 84, pp. 69-72, 2012.
- [14] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp. 61-69, 2006.
- [15] N. Yüksel and S. Şahin, "Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys," *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 491-498, 2014.