



รหัสโครงการ SUT7-717-60-12-43

รายงานการวิจัย

การสังเกตโดยตรงของการเกิดบริเวณอ่อนในการเชื่อมแบบต่างประเภทของ
เหล็กกล้าเจือต่ำเกรด T22 ด้วยแสงซินโครตรอน

Direct Observation of Soft Zone Formation in HSLA Grade T22
Dissimilar Joining by using Synchrotron Light

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT-717-58-12-45

รายงานการวิจัย

การสังเกตโดยตรงของการเกิดบริเวณอ่อนในการเชื่อมแบบต่างประเภทของ
เหล็กกล้าเจือต่ำเกรด T22 ด้วยแสงซินโครตรอน
Direct Observation of Soft Zone Formation in HSLA Grade T22
Dissimilar Joining by using Synchrotron Light

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. จงกล ศรีธรร

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

นางสาวสุดารัตน์ เขตสูงเนิน

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2561

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีจากความกรุณาและอนุเคราะห์ช่วยแนะนำช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จาก ดร.ชนรรค์ เอื้อรักสกุล และ ดร.พัฒน์ โพธิ์ทองคำ นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง นางสาวทิพย์อุษา วงศ์พินิจ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ และพนักงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ที่คอยให้ความช่วยเหลือชี้แนะในเรื่องต่าง ๆ ตลอดการทำการทดลอง ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ศูนย์อาคารเครื่องมือ 6 และอาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย ตลอดจนบุคลากรที่สนับสนุนมีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลในงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีผู้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

คณะวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการสลายตัวของมาเทนไซด์ในบริเวณกระแทบร้อนทางด้าน T22 (T22 HAZ) ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม (Weld Interface) ในชิ้นงานเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมเกรด T22 โดยใช้วิธีการสังเกตโดยตรง (Direct Observation) ด้วยเทคนิค Low-energy Electron Microscopy (LEEM) ใต้อุณหภูมิยูเทคตอยด์ ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) และศึกษาคุณสมบัติทางกลภายหลังจากการให้ความร้อนจากการเชื่อมของวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมเกรด T22 ที่อุณหภูมิ 760°C เวลา 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิจัยในเทคนิค LEEM ของการบันทึกภาพแบบ in-situ ได้พิจารณาจากลักษณะของเกรนและโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าเมื่อให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ที่ 690-700°C เป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมง โครงสร้างมาเทนไซด์ในบริเวณกระแทบร้อนทางด้านวัสดุ T22 (T22 HAZ) ได้เกิดการสลายตัวเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์เดิมก่อนเข้าสู่การเกิดเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งลำดับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละตำแหน่ง แตกต่างกันเพียงขนาดของเกรนและระยะเวลาในการเกิดโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างเดิมของวัสดุและการได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อมที่ทำให้แต่ละตำแหน่งได้รับอุณหภูมิและมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน โดยผลการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) จากปริมาณโครเมียมที่แตกต่างกัน ทำให้ความแข็งบริเวณกระแทบร้อนทางด้านวัสดุ T22 (Soft Zone) มีค่าน้อยกว่าด้านโลหะเชื่อม เมื่อเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT Time) นานขึ้น ความแข็งทั้ง 2 บริเวณมีค่าลดลง

คำหลัก: การให้ความร้อนหลังการเชื่อม, บริเวณกระแทบร้อน, การสลายตัวของมาเทนไซด์, LEEM, in-situ

Abstract

The objective of this research was to study the decomposition of martensite at heat affect zone (HAZ) by direct observation of weld interface in 2.25Cr-0.5Mo steel using Low-energy Electron Microscopy (LEEM) technique at elevated temperatures. This is a simulation of PWHT on Cr-Mo steel grade T22. The welds were performed using GTAW process and ER90S-B9 was used as a filler metal. The mechanical properties of dissimilar joining 2.25Cr-1Mo steel at PWHT 760°C for various time of 0.5, 1 and 3 hours were studied in terms of hardness of the welds. The result of in-situ recording by using LEEM mode. Considered from grain characteristics and phase transformation compared to the time at various locations showed that when heating PWHT near the eutectoid temperature of approx. 690-700 °C for 14 hours. The martensite structure in T22 (T22-HAZ) started to decomposed by the prior austenite structure before entering into a larger ferrite structure. The sequence of phase transformation is similar in each position. The difference in grain size and duration of structure. This is due to the original structure of the material and the heat affected by the welding that gives each location a different temperature and cooling rate. The effect of post weld heat treatment form activity gradient of Cr cause the hardness of heat affect zone on T22 side (Soft Zone) is lower than weld metal zone (Hard zone). The longer PWHT duration, the hardness of soft and hard zone is decreased

Keywords: PWHT, Heat affect Zone(HAZ), martensite decomposes, LEEM, in-situ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตงานวิจัย	3
แผนการดำเนินงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
โรงไฟฟ้าระบบความร้อนร่วม.....	6
โลหะวิทยางานเชื่อม	8
เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM).....	13
การให้ความร้อนหลังการเชื่อม.....	15
โครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระแทบร้อน.....	16
การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
การศึกษาการสลายตัวของมาเทนไซด์ บริเวณกระแทบร้อนทางเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยเทคนิค LEEM.....	24
3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1.2 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1.3 การเตรียมผิวชิ้นงานเชื่อม	31
3.1.4 การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานเชื่อม.....	33

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.1.5 การสังเกตการสลายตัวของมาเทนไฮด์บริเวณกระทะร้อนทางด้าน T22.....	35
ศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T22 ที่อุณหภูมิ 760°C.....	37
3.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2.2 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแก๊สขึ้นงาน	38
3.2.4 การทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์	39
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	41
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	41
ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	51
สรุปผลการวิจัย.....	51
ข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	56
ภาคผนวก ข.	61
ประวัตินักวิจัย	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมเกรด 2.25Cr-1Mo.....	9
2.2 ตารางส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9 ตามมาตรฐาน AWS A5.28.....	10
2.3 ตารางการเลือกใช้ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน.....	12
2.4 ช่วงอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่แนะนำสำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม- โมลิตินัม 2.25Cr-1Mo	15
2.5 ค่าความแข็งโดยประมาณของเกรนเหล็กกล้า.....	19
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อมที่ใช้.....	26
3.2 ค่า emissivity ของโครเมียม.....	31
3.3 เวลาในการอบชิ้นงานแต่ละชิ้น.....	39
4.1 ช่วงของการให้อุณหภูมิกับชิ้นงานของเทคนิค LEEM.....	41
4.2 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.ช่วงที่ 1.....	43
4.3 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.ช่วงที่ 2.....	45
4.4 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.ช่วงที่ 3.....	46
4.5 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.ช่วงที่ 4.....	48
5.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณกระทบร้อนทางด้านวัสดุ T22	51
ก.1 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.....	57
ข.1 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 760°C.....	64
ข.2 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C	68
ข.3 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C	72

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม..... 6
2.2	พื้นผิวที่รับความร้อนเช่น แผงท่อรับความร้อน ซูเปอร์ฮีทเตอร์ และรีฮีทเตอร์..... 7
2.3	ผังแสดงการไหลของเครื่องกำเนิดไอน้ำ..... 7
2.4	แผนภูมิ CCT Diagram สำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo..... 10
2.5	แผนภาพแสดงลักษณะการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก..... 11
2.6	ค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมระหว่างเกรด 2.25Cr- 1Mo กับเกรด 9Cr-1Mo-V เมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 760°C เป็น เวลา 2 ชั่วโมง..... 12
2.7	ตัวอย่างภาพที่ได้จาก LEEM Intensity-voltage..... 14
2.8	หลักการทํางานของ LEEM..... 14
2.9	ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ..... 15
2.10	ภาพตัดขวางบริเวณผลกระทบร้อน HAZ..... 16
2.11	โครงสร้างเนื้อเชื่อม และบริเวณผลกระทบร้อน HAZ..... 17
2.12	การกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส..... 18
2.13	แนวโน้มการเคลื่อนที่ของคาร์บอน..... 22
3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 24
3.2	ท่อเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด T22 ที่ผ่านการเชื่อมทิกด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9..... 25
3.3	เครื่อง Wire Cut..... 26
3.4	ลวดตัดทำด้วยโลหะทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร..... 27
3.5	เครื่องขัดกระดาษทรายจานหมุน..... 27
3.6	เครื่องขัดชิ้นงานละเอียดแบบจานหมุน..... 28
3.7	เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์..... 28
3.8	เครื่องอัลตราโซนิค รุ่น GT SONIC..... 29
3.9	ระบบ LEEM..... 29
3.10	กรดไนตริก (HNO ₃)..... 30
3.11	สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)..... 30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	สารละลายเอทิลเอทานอลและสารละลายอะซิโตน..... 31
3.13	การตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire Cut32
3.14	ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัด32
3.15	ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านขัดหยาบและละเอียด.....33
3.16	การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์.....34
3.17	รอยกดบนตำแหน่งชิ้นงานแต่ละจุดเท่ากับ 300 ไมครอน.....34
3.18	การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย35
3.19	การติดตั้งชิ้นงานใน Sample Holder ของเครื่องทดสอบระบบ LEEM.....36
3.20	ค่าความดันบนหน้าจอเครื่องควบคุมความดันภายในระบบ.....36
3.21	จอแสดงผลขณะทำการลอง LEEM.....36
3.22	ค่าความดันบนหน้าจอเครื่องควบคุมความดันภายในระบบ.....37
3.23	เครื่องทำตัวเรือนและ Phenolic hot mounting resin38
3.24	การนำชิ้นงานเข้าเตาอบ.....38
3.25	การสร้างตัวเรือนแบบร้อน.....39
3.26	การกดทดสอบชิ้นงาน40
3.27	ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง.....40
3.28	ตัวอย่างค่าความแข็ง และ ระยะ d1 และ d2.....40
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิให้ความร้อนหลังการเชื่อม.....41
4.2	ตำแหน่งของชิ้นงานเชื่อมในแต่ละบริเวณ.....42
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะห่างจากขอบเขตหลอมละลาย ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง.....49
ข.1	ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 0.5 ชั่วโมง.....62
ข.2	ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง.....62
ข.3	ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 3 ชั่วโมง.....62
ข.4	ชิ้นงานทดสอบความแข็งหลังผ่านการให้ความร้อน.....63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุปกรณ์ในระบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุของกลุ่มเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม (Cr-Mo steels) เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ถูกออกแบบให้มีความสามารถในการใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงได้ดี โดยการเลือกวัสดุสำหรับการสร้างอุปกรณ์ในแต่ละส่วนของโรงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการใช้งานจริงของอุปกรณ์แต่ละส่วน โดยวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 9Cr-1Mo (SA213 grade T91) ได้ถูกนำมาพัฒนาขึ้น ให้มีความสามารถรับอุณหภูมิ ความดันได้สูงกว่าวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25 Cr-1Mo (SA213 grade T22) เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้มากกว่า ดังนั้นการเชื่อมต่อของวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Joining) ของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในระบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ เมื่อวัสดุเชื่อมเหล่านี้มีการใช้งานไปในระยะหนึ่งภายใต้อุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุลดลง ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณแนวเชื่อมระหว่างการใช้งาน

ปัญหาดังกล่าวที่พบในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกันของวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกิดจากการเคลื่อนที่ของธาตุคาร์บอน (Carbon Migration) ในระหว่างการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจากบริเวณที่มีอัลลอยด์ต่ำกว่าเข้าสู่บริเวณที่มีอัลลอยด์สูงกว่า ส่งผลให้บริเวณที่มีอัลลอยด์ต่ำกว่ากลายเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำ (Soft Zone) ส่วนบริเวณที่มีอัลลอยด์สูงเกิดการตกผลึกของธาตุ (Precipitation) เกิดขึ้น กลายเป็นบริเวณที่มีความแข็งและเปราะ (Hard Zone) (N. Sae-teaw, 2010)

ปัจจุบันมีงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในการเกิด Soft Zone ของชิ้นงานบริเวณรอยต่อรอยเชื่อม (Weld Interface) (C.Sudha, 2002) และศึกษาคุณสมบัติทางกลของงานเชื่อมวัสดุต่างชนิด (M. Rutash, 2014) พบว่าเมื่อชิ้นงานเชื่อมไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบเฟสมาเทนไซต์ ในบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 อยู่ใกล้กับขอบเขตหลอมละลาย (Fusion Boundary) แต่เมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม พบว่าเฟสมาเทนไซต์ในบริเวณดังกล่าวเกิดการสลายตัวเป็นเฟสเฟอร์ไรท์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของธาตุคาร์บอน ดังนั้นบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 จึงไม่มีปริมาณคาร์บอนเพียงพอสำหรับการเกิดคาร์ไบด์ ทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงลดลง เกิดเป็นบริเวณ Soft Zone ขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดที่ปรากฏแน่ชัดเกี่ยวกับกลไกการเกิดบริเวณ Soft Zone ที่แท้จริงจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 ในระหว่างการให้ความร้อนหลังการเชื่อม และมีงานวิจัยบางส่วนทางโลหะวิทยาที่ได้ศึกษาและตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในลักษณะการมองเห็นพื้นผิวของโครงสร้างระหว่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ ซึ่งถือเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคขั้นสูง เนื่องจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาทั่วไป สามารถตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง แต่เครื่องมือทางด้านจุลทรรศน์เหล่านี้มีข้อจำกัดและศักยภาพในการศึกษาไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในงานวิจัย โดยไม่สามารถให้ความร้อนขณะการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้

ดังนั้นด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากลไกการเกิดบริเวณ Soft Zone จากการสลายตัวของเฟสมาเทนไซต์ โดยใช้วิธีการสังเกตโดยตรง (Direct Observation) ด้วยเทคนิค Low-energy Electron Microscopy (LEEM) ที่อุณหภูมิ 760C° ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะการให้ความร้อนหลังการเชื่อมบนชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม SA213 Grade T22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ในกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในขณะที่เกิดขึ้นในลักษณะ In-situ และศึกษาคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยกระบวนการเชื่อมทิก ในบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 ที่อยู่ใกล้กับขอบเขตหลอมละลาย

จากการศึกษาการสลายตัวของเฟสมาเทนไซต์และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 ด้วยเทคนิค LEEM และการศึกษาคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo ของงานวิจัยนี้ จะช่วยให้เข้าใจกลไกการเกิดบริเวณ Soft Zone ได้ดียิ่งขึ้น ถือเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการเข้าใจจุดบกพร่อง (Defect) ของวัสดุงานเชื่อม ซึ่งสามารถหาแนวทางป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย เพื่อลดความเสียหายต่อชิ้นส่วนอุปกรณ์ในระหว่างการใช้งานได้ นำไปเป็นองค์ความรู้และความรู้พื้นฐานในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในกลุ่มเดียวกันและวัสดุอื่นๆทางวัสดุศาสตร์ในลักษณะ in-situ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บริเวณกระทบร้อนด้วยเทคนิค LEEM ในการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยกระบวนการเชื่อมทิก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาและทดลองตามมาตรฐาน ASME คือ วัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25 Cr-1Mo (SA213 grade T22)
2. ลวดเชื่อมที่ใช้ในการศึกษาและทดลอง คือ AWS ER90S-B9
3. ทำการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมโดยกระบวนการเชื่อมทิก (GTAW/TIG)
4. ทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 760°C ด้วยเทคนิค LEEM
5. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสังเกตการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ทางด้าน T22 ในแต่ละตำแหน่งเมื่อเทียบกับเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการบันทึกภาพแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM
6. ศึกษาคุณสมบัติทางกลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อการเกิด Soft Zone ในบริเวณกระทบร้อนทางด้าน T22 ที่อุณหภูมิ 760°C ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและแนวทางการวิจัยของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม
2. ออกแบบวางแผนการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
3. เตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 สำหรับการเชื่อม
4. ทำการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 โดยกระบวนการเชื่อมทิก
5. เตรียมผิวชิ้นงานเชื่อมสำหรับการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน
6. กำหนดตำแหน่งชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค LEEM
7. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสังเกตการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ทางด้าน T22 ด้วยเทคนิค LEEM ที่อุณหภูมิ 760°C
8. ทดสอบความแข็งบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ทางด้าน T22 ที่อุณหภูมิ 760°C ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์
9. เก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

สถานที่ทำการวิจัย

1. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นองค์ความรู้และความรู้พื้นฐานในการทราบถึงกลไกการสลายตัวของมาเทนไฮไดรต์ในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม
2. เพื่อเป็นองค์ความรู้และความรู้พื้นฐานในการทราบถึงคุณสมบัติทางกลของบริเวณ Soft Zone ในการเชื่อมต่อวัสดุของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม
3. เป็นแนวทางในการป้องกันความเสียหายต่อการเกิดรอยแตกร้าวในระหว่างการใช้งาน
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคนิค LEEM ในวัสดุที่เกิด Precipitation Reaction
5. เป็นแนวทางในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในกลุ่มเดียวกันและวัสดุอื่นๆโดยใช้เทคนิค LEEM ในลักษณะ in-situ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บริเวณกระทบบร้อนด้วยเทคนิค LEEM และการศึกษาคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก ได้มีการนำทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย โดยประกอบด้วย 7 ส่วน ดังหัวข้อต่อไปนี้คือ

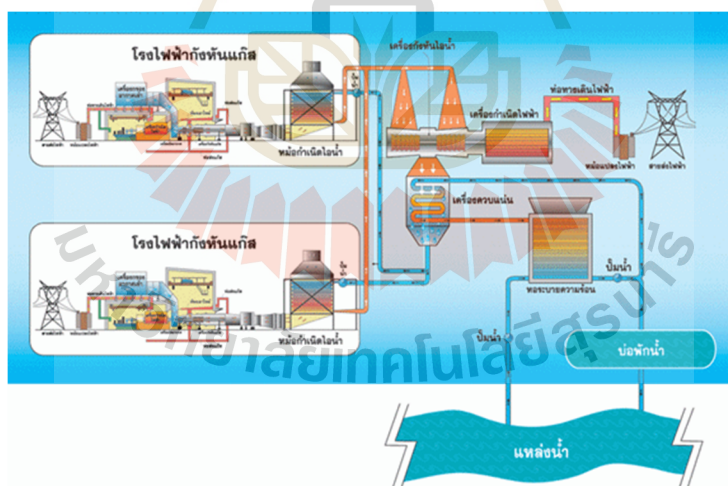
- 2.1 โรงไฟฟ้าระบบความร้อนร่วม
 - 2.1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำโรงไฟฟ้า
- 2.2 โลหะวิทยางานเชื่อม
 - 2.2.1 โลหะผสม
 - 2.2.2 วัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo
 - 2.2.3 ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม
 - 2.2.4 กระบวนการเชื่อมทิก(GTAW)
 - 2.2.5 การเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน
- 2.3 เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)
 - 2.3.1 หลักการทำงานของ LEEM
- 2.4 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม
- 2.5 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบบร้อน
- 2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)
 - 2.6.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงไฟฟ้าระบบความร้อนร่วม

โรงไฟฟ้าระบบความร้อนร่วม เป็นโรงไฟฟ้าที่ประกอบด้วยโรงไฟฟ้า 2 ระบบร่วมกัน คือ โรงไฟฟ้ากังหันแก๊สและโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ โดยความร้อนจากไอเสียที่ออกจากเครื่องกังหันแก๊ส ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 550°C มาใช้แทนเชื้อเพลิงในการต้มของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ เพื่อใช้ไอเสียให้เกิดประโยชน์ ส่วนประกอบที่สำคัญของโรงไฟฟ้าระบบความร้อนร่วม ประกอบด้วย เครื่องกังหันแก๊ส หม้อกำเนิดไอน้ำ และเครื่องกังหันไอน้ำ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. นำไอเสียจากเครื่องกังหันแก๊สหลาย ๆ เครื่อง มาใช้ต้มน้ำในโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ
2. ไอน้ำที่ได้จากการต้มน้ำจะไปดันเครื่องกังหันไอน้ำ ทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน ผลิตไฟฟ้าออกมาได้เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนทั่วไป
3. กำลังผลิตที่ได้จากโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ จะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังผลิตรวมของโรงไฟฟ้ากังหันแก๊สที่เดินเครื่องอยู่

การผลิตไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้าระบบความร้อนร่วมนี้จะทำการผลิตร่วมกัน หากเกิดเหตุขัดข้องที่โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ ก็ยังเดินเครื่องกังหันแก๊สได้ตามปกติ โดยการเปิดให้ไอเสียออกสู่อากาศโดยตรง แต่หากเกิดเหตุขัดข้องกับเครื่องกังหันแก๊สเครื่องใดเครื่องหนึ่ง กำลังผลิตที่ได้ก็จะลดลงตามส่วน และถ้ากังหันแก๊สทุกตัวหยุดเดินเครื่อง โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำที่ใช้ร่วมกันก็ต้องหยุดเดินเครื่องด้วย

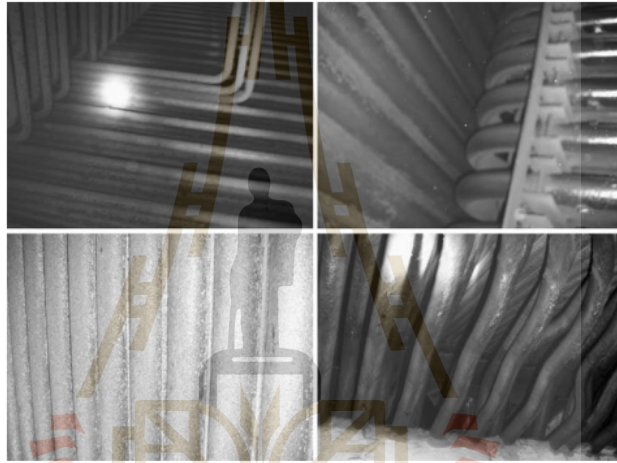


รูปที่ 2.1 โครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม
(Powerplant, วันที่สืบค้น 1 สิงหาคม 60)

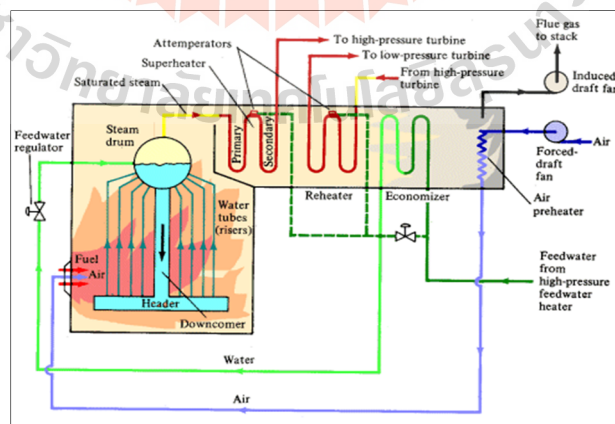
2.1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำโรงไฟฟ้า

หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งทำให้ส่วนต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำจะต้องสามารถทนสภาวะดังกล่าวได้ ส่วนมากทำจากเหล็กหล่อและเหล็กกล้า

ภายนอกมักทำเป็นรูปทรงกระบอก ภายในทรงกระบอกนั้นประกอบด้วยท่อทนความร้อนขนาดเล็กเรียงกันอยู่เป็นจำนวนมาก ในการทำงานน้ำจะถูกบีบให้ไหลไปตามท่อโดยเชื้อเพลิงเผาไหม้อยู่ด้านนอกซึ่งอยู่ในเตา ความร้อนจากการเผาไหม้สามารถมีอุณหภูมิได้สูงถึง $1,371^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สัมผัสกับความความร้อนเช่น แผงท่อรับความร้อน (economizer) ท่อผนัง (water wall tube) ซูเปอร์ฮีตเตอร์ (superheater) และรีฮีตเตอร์ (reheater) เป็นต้น (รูปที่ 2.2 – 2.3) ต้องทนต่อความร้อนสูงได้ดี น้ำภายในท่อจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจนกลายเป็นของผสมระหว่างไอน้ำและน้ำ โดยไอน้ำจะไหลผ่านท่อซูเปอร์ฮีตเตอร์จนมีอุณหภูมิสูง 538°C ความดันไอระดับนี้จะสามารถขับเคลื่อนกังหันเทอร์ไบน์ให้ทำงานได้ จะเห็นได้ว่าหมอน้ำมีส่วนที่ต้องสัมผัสกับความความร้อนตลอดเวลา โดยเฉพาะท่อทนความร้อน



รูปที่ 2.2 พื้นผิวที่รับความร้อนเช่น แผงท่อรับความร้อน ซูเปอร์ฮีตเตอร์ และรีฮีตเตอร์ (ธนกร ณ พัทลุง, 2552)



รูปที่ 2.3 ผังแสดงการไหลของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (สมาน เสนางาม, 2543)

ระบบท่อไอน้ำเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องกำเนิดไอน้ำ หรือหม้อไอน้ำ และอุปกรณ์ที่ต้องการไอน้ำ ท่อไอน้ำไม่ได้ทำงานที่ความดันหรืออุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาจึงทำให้ท่อยืด-หดตัว จึงต้องติดตั้งชุดรับการขยายตัวเพื่อป้องกันท่อแตกร้าวหรืออุปกรณ์ในระบบท่อเสียหาย ดังนั้นการเลือกวัสดุออกแบบหรือกำหนดขนาดท่อไอน้ำอย่างเหมาะสมนั้นสำคัญอย่างยิ่งกับการสูญเสียความดัน การสูญเสียความร้อน และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการบำรุงรักษา โดยวัสดุที่ใช้ทำองค์ประกอบและชิ้นส่วนต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำนิยมเป็นวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เนื่องจากมีความต้านทานที่อุณหภูมิสูงและการกัดกร่อนที่ดี อย่างไรก็ตามความซับซ้อนในการสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน อันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละส่วน โดยวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo นิยมนำมาใช้ในสภาวะความดันและอุณหภูมิที่อุณหภูมิปานกลางถึงสูง ได้แก่ ส่วน ซูเปอร์ฮีทเตอร์และบริเวณรีฮีทเตอร์ที่ในปัจจุบันทำงานที่ประมาณ 1000F° จึงต้องเลือกใช้เหล็กกล้าอัลลอย เพื่อความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อน

2.2 โลหะวิทยางานเชื่อม

2.2.1 โลหะผสม

คือ เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมอื่น ๆ นอกเหนือไปจากธาตุผสมปกติที่มีอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอน (plain carbon steels) ธาตุผสมต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลทำให้เหล็กกล้าผสมมีสมบัติบางอย่างที่เหนือกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านสมบัติทางกล และด้านสมบัติการกัดกร่อน เพื่อเป็นการตอบสนองต่อการนำไปใช้งาน โดยธาตุต่าง ๆ ที่นำมาผสมจะต้องอยู่ในพิสัยที่กำหนด เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) เหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steel) คือเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่รวมแล้วไม่เกิน 10% มีโครงสร้างคล้ายคลึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำธรรมดา
- 2) เหล็กกล้าผสมสูง (high alloy steel) คือเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่รวมแล้วเกิน 10% มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อน และทนการสึกหรอได้ดี

หน้าที่ของธาตุต่าง ๆ ในโลหะผสม

- 1) นิกเกิล (Ni) จะเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงของเหล็ก มีความเหนียว ต้านทานไฟฟ้า คงทน ความร้อน และทนการกัดกร่อน
- 2) โครเมียม (Cr) เป็นธาตุผสมหลักในเหล็กกล้าทนความร้อน มีหน้าที่ต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อน ต้านทานการเกิดสนิม มีความแข็งแรงขึ้น แต่โครเมียมนั้นเป็นตัวทำให้เกิดเฟอร์ไรท์ ถ้าเหล็กกล้าเหล่านี้ถูกเผาให้ร้อนกว่าอุณหภูมิหนึ่ง เกรนจะเริ่มโตขึ้นเนื่องจากการร้อนจัดเกินไปและไม่

สามารถเล็กลงเมื่อเย็นตัว ทั้งนี้ก็เพราะไม่มีการเปลี่ยนรูปลูกเกิดขึ้น ดังนั้นเกรนของเฟอร์ไรท์จึงยังคงหยาบและโลหะจะเริ่มเปราะทำให้เหล็กโครเมียมอัลลอยด์เปราะในช่วงโครเมียม 12-13%

3) โมลิบดีนัม (Mo) มีความต้านทานต่อความร้อนสูง สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงมาก มีอุณหภูมิหลอมละลายสูง เป็นตัวนำความร้อนและทนการสึกหรอได้ดี

4) คาร์บอน (C) เป็นตัวที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่ซับซ้อนต่าง ๆ กันในเหล็กโครเมียมผสม ซึ่งจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก และเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงขึ้น

5) แมงกานีส (Mn) รับแรงกระแทกได้ดี เพิ่มความเหนียวและทนการสึกหรอ

6) ซิลิกอน (Si) ซิลิกอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิกอนผสมด้วยเสมอ ซิลิกอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ มีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มขึ้น ทนต่อการกัดกร่อน ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น

7) วานาเดียม (V) มีคุณสมบัติเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว และคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดี

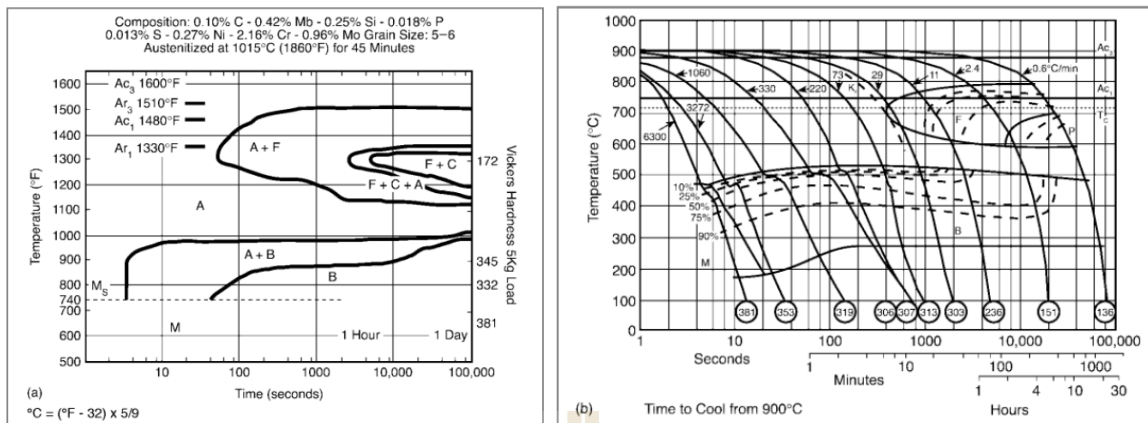
2.2.2 วัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo

วัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo หรือ T22 ได้ถูกนำมาใช้งานที่สภาวะความดันและอุณหภูมิต่ำที่ไม่เกิน 560°C ในโรงไฟฟ้า มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo

Type of Steel	Chemical Requirements (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
2.25Cr-1Mo (SA213-T22)	0.05- 0.15	0.30- 0.60	0.025	0.025	0.50	1.90- 2.60	0.87- 1.13

สำหรับวัสดุ T22 ประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเบนไนท์ อันขึ้นอยู่กับการวิธีทางความร้อนและอัตราการเย็นตัว จากแผนภูมิการแปลงเฟสระหว่างการเย็นตัวต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram; CCT) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในระหว่างการเชื่อมอุณหภูมิที่เฟอร์ไรท์เริ่มเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ (AC_1) มีค่าอยู่ในช่วง 799-821°C ในขณะที่อุณหภูมิที่เฟอร์ไรท์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด (AC_3) มีค่าประมาณ 871°C นอกจากนี้อุณหภูมิเริ่ม (Ms) และสิ้นสุดการเกิดมาเทนไซต์ (Mf) มีค่าประมาณ 393°C และ 204°C ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 แผนภูมิ CCT Diagram วัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมเกรด 2.25Cr-1Mo (D. Gandy, 2005)

2.2.3 ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม

สำหรับการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมต่างชนิดกัน ลวดเชื่อมที่ใช้ควรมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุโลหะผสมต่ำ วัสดุโลหะผสมสูง หรือมีส่วนผสมอยู่ตรงกลางระหว่างวัสดุสองชนิด โดยขึ้นอยู่กับการใช้งาน

1. ลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9

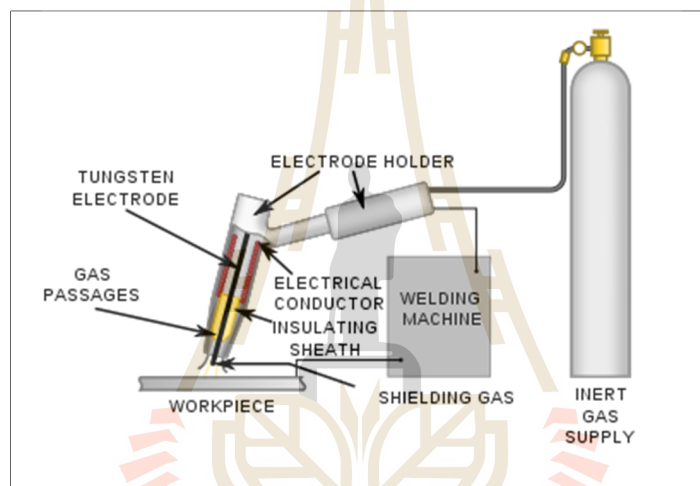
ลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9 เป็นลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม ที่มีส่วนผสมทางเคมีคล้ายกับวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัมเกรด 9Cr-1Mo-V โดยตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9 ตามมาตรฐาน AWS A5.28 (Weld wire, 2017 วันที่สืบค้น 1 สิงหาคม 61)

AWS Class.	Chemical Requirements (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Fe
ER90S-B9	0.07-0.13	1.20	0.01	0.01	0.15-0.50	0.80	8.00-10.50	0.85-1.20	0.15-0.30	0.02-0.10	Bal.

2.2.4 กระบวนการเชื่อมทิก(GTAW)

กระบวนการเชื่อมทิกเป็นกระบวนการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลายที่ได้รับความร้อนจากการอาร์ค ระหว่างลวดทั้งสแตนกับชิ้นงานเชื่อม โดยที่มีก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซผสมปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อป้องกันอากาศภายนอกทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว และในระหว่างการเชื่อมบริเวณอาร์คมีความร้อนสูง ความร้อนจากการอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงานในบริเวณดังกล่าว จนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย ดังนั้นเมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใด ๆ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นหลอมติดกัน แต่เนื่องจากแท่งทั้งสแตนอิลเลคโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือไม่สิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วย

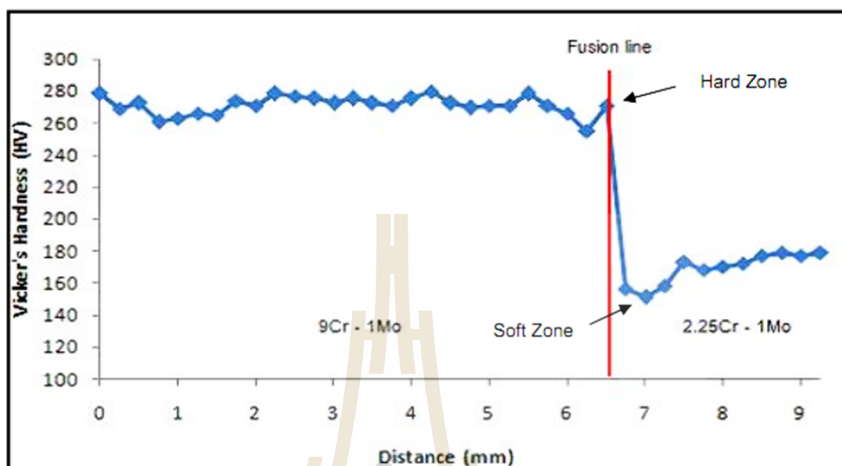


รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงลักษณะการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก
(The Welding Master, 2017 วันที่สืบค้น 1 สิงหาคม 61)

2.2.5 การเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน (DISSIMILAR WELDING)

การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน เช่นวัสดุ Low alloy ที่มี alloy แตกต่างกัน เมื่อนำมาเชื่อมต่อกัน จะเกิดการแพร่กระจายของคาร์บอนบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นปัญหาทางโลหะวิทยาที่พบในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม โดยคาร์บอนจะกระจายตัวไปจับกับโครเมียมเป็นสาเหตุของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ การหลีกเลี่ยงอาจใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสม Nickel-Base แทนการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ N. Sae-teaw et al. (2010) ได้รายงานว่าการเชื่อมระหว่างวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo กับ 9Cr-1Mo-V ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 760°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบการเคลื่อนที่ของคาร์บอนจาก

วัสดุที่มีโครเมียมต่ำสู่วัสดุที่มีโครเมียมสูงผ่านทางขอบเขตหลอมละลาย (Fusion Boundary; FB) ซึ่งก่อให้เกิดบริเวณ Soft Zone ในวัสดุด้านที่มีโครเมียมต่ำ และบริเวณ Hard Zone ในวัสดุด้านที่มีโครเมียมสูง เนื่องจากมีค่าคาร์บอนแอกติวิตี (Carbon Activity; a_c) ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 ค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมระหว่างเกรด 2.25Cr- 1Mo กับเกรด 9Cr-1Mo-V PWHT ที่อุณหภูมิ 760°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ซึ่งความไม่ต่อเนื่องทางโลหะวิทยาเหล่านี้ ส่งผลให้บริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมมีค่าความแข็งที่แตกต่างกันอย่างมากระบุแสดงในรูปที่ 2.6 ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุลดลง และเนื่องด้วยปัจจัยเหล่านี้การเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเคลื่อนที่ของคาร์บอนได้ โดยการใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเลือกใช้ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (พิเชษฐ์ สุขโต, 2561)

P(T)	11	22	23	91	92
11	B2	B2	B2	B2	B2
22	B2	B3	B3,G	B3	B3,G
23	B2	B3,G	W,B3,G,Ni	G,Ni	B,W,G,B9
91	B2	B3	G,Ni	B9	W,G,B9
92	B2	B3,G	B,W,G,B9	B,W,B9,G	B,W,G

G = Nonstandard composition

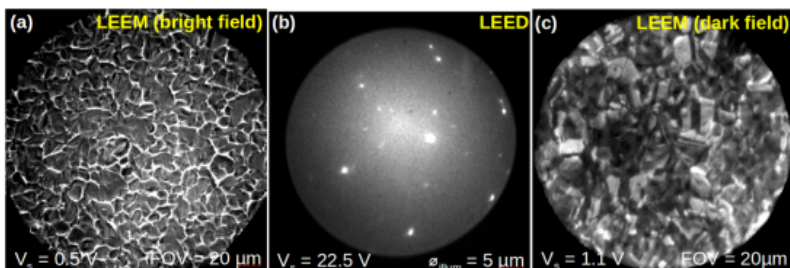
B2	=	1- $\frac{1}{4}$ Cr $\frac{1}{2}$ Mo
B3	=	2- $\frac{1}{4}$ Cr 1 Mo
B9	=	9 Cr 1 Mo V
W	=	Tungsten Modified
B	=	Boron Modified, etc.
Ni	=	Nikel Base
P	=	Pipe
T	=	Tube

2.3 เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

สถานีทดลอง 3.2b ของห้องปฏิบัติการแสงสยามได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งสามารถถ่ายภาพตัวอย่างที่มีความละเอียดในระดับนาโนเมตร เรียกว่าเทคนิค low-energy electron microscopy (LEEM) ซึ่งใช้อิเล็กตรอนกระตุ้นผิวหน้าของสารตัวอย่าง ภาพถ่ายจากเทคนิค LEEM สามารถใช้ในการศึกษาทางด้านวัสดุศาสตร์ (Material Sciences) และวิทยาการด้านพื้นผิว (Surface Science) วิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของสารตัวอย่างได้ ด้วยอาศัยหลักการเลี้ยวเบน (diffraction) จากโครงสร้างที่เป็นผลึกของตัวอย่าง เมื่อนำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนมาขยายเป็นภาพหรือที่เรียกว่า dark-field imaging ภาพที่ได้จะมีความแตกต่างระหว่างวัตถุหรือพื้นผิวบนตัวอย่างที่มีโครงสร้างอะตอมขนาดแตกต่างหรือมีทิศทางแตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสหรือโครงสร้างของโลหะในขณะที่สามารถให้ความร้อนกับตัวอย่างควบคู่ไปด้วยกัน โดยที่มีโหมดในการวิเคราะห์สองโหมดหลัก (รูปที่ 2.7) ดังนี้คือ

1. Imaging mode คือ การดูภาพเหมือนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนปกติทั่วไปปกติสามารถวิเคราะห์โดยใช้ mode ต่าง ๆ ดังนี้คือ Mirror-imaging, Intensity-voltage spectroscopy
2. Diffraction mode คือ การดูโครงสร้างที่เป็นผลึกของสารตัวอย่าง แบ่งได้เป็น Lateral diffraction คือ การศึกษาความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง สามารถเลือกจุดที่เกิด LEED pattern (Low energy electron diffraction) ใช้ศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือขนาดที่แตกต่างกัน

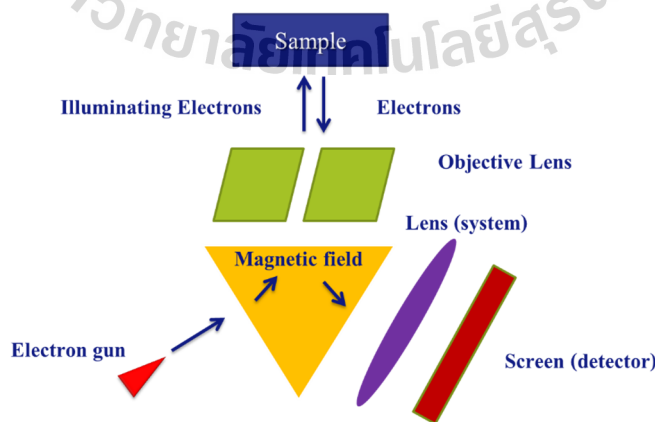
Vertical diffraction, phase contrast ใช้สำหรับศึกษาระดับบนผิวของสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่น (อิเล็กตรอน) ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (เส้นมืดทึบ) บริเวณรอยต่อของสองบริเวณที่มีความสูงหรือระดับต่างกัน



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างภาพที่ได้จาก LEEM (bright field)(a), LEED(b) และ LEEM (dark field)(c) (Calvin K. Chan, 2014)

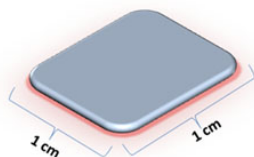
2.3.1 หลักการทำงานของ LEEM

การทำงานของเทคนิค LEEM ประกอบด้วยการใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจากปืนยิงอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็ก จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการสร้างภาพด้วยระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนนี้จะถูกบันทึก นำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้ทันที ทั้งนี้เนื่องด้วยระบบ LEEM ต้องอาศัยการทำงานภายใต้สุญญากาศระดับยิ่งยวด การศึกษาตัวอย่างจึงต้องอาศัยกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ค่อนข้างยุ่งยากหลายขั้นตอน ที่สำคัญคือการทำใหตัวอย่างแห้ง เพื่อป้องกันการเกิด charging effect



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของ LEEM (E.Bauer, 1985)

ข้อจำกัดของลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบด้วย LEEM คือ ชิ้นงานตัวอย่างต้องนำไฟฟ้าได้ เล็กน้อย มีลักษณะเป็นแผ่น มีผิวเรียบ ขนาดประมาณ 1x1 ซม.หนาไม่เกิน 3-4 มม.



รูปที่ 2.9 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

2.4 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม

การให้ความร้อนหลังการเชื่อมถือว่าการอบอ่อน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเค้นตกค้าง และเพิ่มความแข็งแรงให้กับแนวเชื่อม โดยปกติแล้วการให้ความร้อนหลังการเชื่อมควรดำเนินการหลังการเชื่อมทันที การให้ความร้อนหลังการเชื่อมสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนเฉพาะแนวเชื่อมหรือทั่วทั้งชิ้นงาน เชื่อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น AC_1 ซึ่งหนึ่งในสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิเส้น AC_1 สามารถหาได้จากสมการ Brandis ที่นิยมใช้สำหรับการศึกษาอุณหภูมิการเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ ในโลหะผสมดังนี้ (P Schulze, 2016)

$$AC_1 (°C) = 739 - 22C - 7Mn + 2Si + 14Cr + 13Mo - 13Ni + 20V$$

โดยตารางที่ 2.4 แสดงช่วงอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่แนะนำสำหรับวัสดุ เหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม ตามมาตรฐาน ASME B31.1

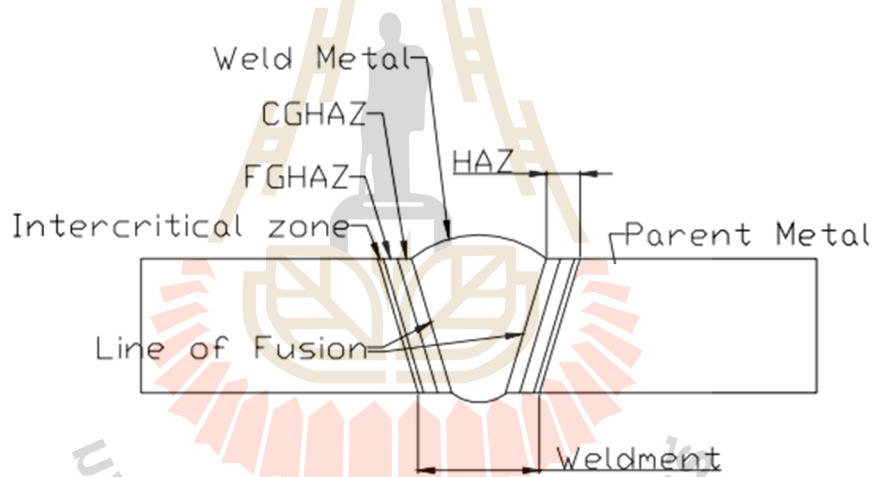
ตารางที่ 2.4 ช่วงอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่แนะนำสำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo (ASME SECTION I, วันที่สืบค้น 1 สิงหาคม 60)

Type of Steel	Holding Temperature Range (°C)	Minimum Holding Time at Temperature for Control Thickness	
		≤ 50 mm	> 50 mm
2.25Cr-1Mo	675-760	1 hour per 25 mm (15 min minimum)	2 hours plus 15 min for each additional 25 mm over 50 mm
9Cr-1Mo-V	730-775	1 hour per 25 mm (30 min minimum)	1 hour per 25 mm up to 125 mm plus 15 min for each additional 25 mm over 125 mm

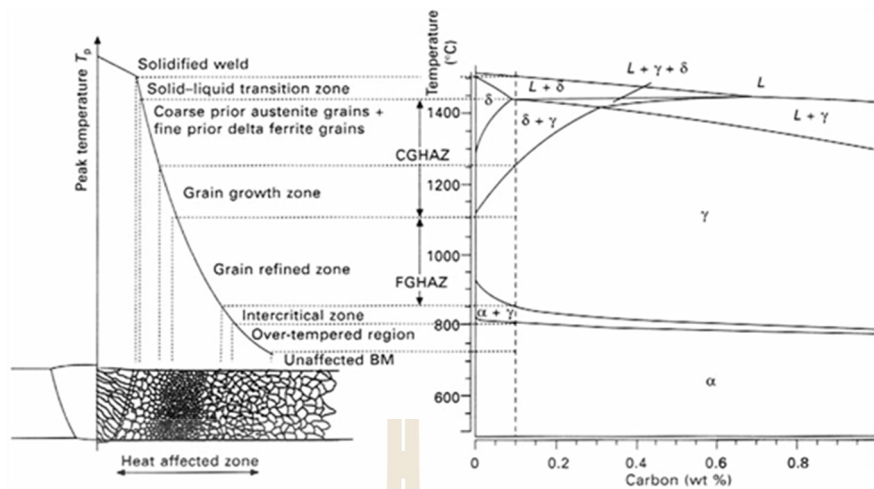
2.5 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อน

การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเนื่องจากผลของความร้อนจากการเชื่อม จะเกิดที่บริเวณเนื้อโลหะที่ติดใกล้กับเนื้อเชื่อมเรียกว่า บริเวณกระทบร้อนการเชื่อม นิยมเรียกกันทั่วไปว่า HAZ ซึ่งจะกินบริเวณกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนเข้าจากกระบวนการเชื่อม ความหนาและค่าสมบัตินำความร้อนของโลหะงาน โลหะที่มีค่านำความร้อนสูงจะมีบริเวณผลกระทบร้อนกว้าง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมอย่างมาก โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เวลาในการเชื่อม อัตราการเย็นตัว และการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยบริเวณกระทบร้อนแบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลัก ดังรูปที่ 2.10-2.11

- 1) บริเวณกระทบร้อนเกรนหยาบ (Coarse-grained Heat Affected Zone; CGHAZ)
- 2) บริเวณกระทบร้อนเกรนละเอียด (Fine-grained Heat Affected Zone; FGHAZ)
- 3) บริเวณกระทบร้อนวิกฤต (Intercritical Heat Affected Zone; ICHAZ)



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางบริเวณผลกระทบร้อน HAZ (Benjamin King, 2005)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างเนื้อเชื่อม และบริเวณผลกระทบร้อน HAZ (Cerjak, 2008)

1. บริเวณกระทบร้อนเกรนหยาบ

คือบริเวณผลกระทบร้อนที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อมเนื้อเส้น AC_3 ซึ่งสูงกว่าจุดวิกฤติมากเกินไป จึงเกิดการขยายตัวมากและมีอัตราการเย็นตัวสูง ทำให้เกรนของโครงสร้างที่ขยายตัวเนื่องจากได้รับความร้อนสูงขณะเชื่อมไม่มีโอกาสกลับคืนโครงสร้างจุลภาคเดิม เกรนโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนส่วนนี้จึงหยาบมาก

2. บริเวณกระทบร้อนเกรนละเอียด

คือบริเวณผลกระทบร้อนที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อมเนื้อเส้น AC_3 เล็กน้อย ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าตามปกติในกรรมวิธีการอบอ่อน แต่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ มีอัตราการเย็นตัวช้าลงกว่าบริเวณกระทบร้อนเกรนหยาบจึงทำให้เกรนมีโอกาสเรียงตัวกลับคืนสภาพเดิม แต่ไม่ถึงขนาดกลับคืนโครงสร้างเดิม เกรนโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนส่วนนี้จึงละเอียดขึ้น

3. บริเวณกระทบร้อนวิกฤติ

คือบริเวณผลกระทบร้อนที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับผลกระทบร้อนจากการเชื่อมในช่วงระหว่างเส้น AC_1 และ AC_3 และมีอัตราการเย็นตัวไม่สูงพอ โครงสร้างจุลภาคจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงบางส่วน จึงส่งผลให้เฟอร์ไรต์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์เพียงบางส่วนเท่านั้น โดยบริเวณนี้มีเกรนขนาดเล็กและมีความแข็งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับบริเวณกระทบร้อนอื่น ๆ และพื้นที่นอกเหนือบริเวณกระทบร้อนคือ โครงสร้างจุลภาคเดิมของโลหะงาน (Base Metal) เป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบของความร้อนจากการเชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในด้านวิศวกรรม ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแข็งแรงของวัสดุ สามารถกำหนดขนาดของชิ้นงานให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลในแต่ละคุณสมบัติล้วนมีวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น ต้องการทราบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ควรใช้วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นต้น

2.6.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ถือว่าเป็นการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งนอกจากจะบอกค่าความแข็งของวัสดุยังสามารถที่จะบอกคุณสมบัติของค่าความต้านทานการสึกหรอ ค่าความต้านทานแรงดึง การทนต่อการเสียดสี และความเหนียวของวัสดุ ค่าความแข็งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค การขึ้นรูป และกรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ในการวัดความแข็งจะมีหลายวิธี ที่นิยมกันมากคือ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell) แบบวิกเกอร์ส (Vickers) และแบบรอกเวลล์ (Rockwell) ในงานวิจัยจะใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

2.6.1.1 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การทดสอบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) จะใช้หลักการเดียวกับการทดสอบ แบบบริเนลล์ เปลี่ยนจากหัวกดลูกบอลชุบแข็งเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรเจียรไนเป็นทรงพีระมิดทำมุม 136 องศา กดด้วยแรง F ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ รอยกดที่ได้จะนำไปวัดเส้นทแยงมุม d ทั้งสองด้าน ซึ่งความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของชิ้นงาน (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 การกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส
(Vickers Hardness Test, วันที่สืบค้น 1 สิงหาคม 61)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}}$$

$$HV = \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2}$$

$$HV = \frac{0.189F}{d^2}$$

F = แรงที่ทำการกดขึ้นงาน (N)

d = เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm.)

ค่าความแข็งของของโครงสร้างของเหล็กกล้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าความแข็งโดยประมาณของเกรนเหล็กกล้า

ชนิดของเกรน	ความแข็งโดยประมาณ (HV)
เฟอร์ไรต์ (Ferrite)	80
ออสเตไนต์ (Austenite)	250
เพอร์ไลต์, กลม (Pearlite, granular)	200
เพอร์ไลต์, แฉก (Pearlite, lamellar)	300
ซอร์ไบต์ (Sorbite)	350
ทรูสไตต์ (Troostite)	400
ซีเมนไตต์ (Cementite)	600- 650
มาร์เตนไซต์ (Martensite)	400- 900

ข้อควรระวังในการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการทดสอบถูกต้องและมีโอกาสผิดพลาดน้อยลง จึงมีข้อควรระวังในการทดสอบดังนี้

1. ต้องวางชิ้นทดสอบบนแท่นรองรับที่มั่นคงแข็งแรง เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างทดสอบและชิ้นทดสอบที่วางบนแท่นรองรับนั้นต้องตั้งได้ฉากกับปลายกดทดสอบ
2. การกดทดสอบจะต้องไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้น หรือการสั่นสะเทือน เพราะจะมีผลต่อเส้นทแยงมุมของรอยบุ่มได้
3. การทดสอบไม่ควรให้เกิดรอยบุ่มที่มีลักษณะโค้งเว้าหรือโค้งนูน เพราะจะทำให้ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ่มผิดไปดังรูป

ข้อจำกัดในการใช้งาน

1. ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
2. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกดควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด
3. ค่าความแข็งจากการทดสอบหนึ่ง ๆ นั้น สามารถเปรียบเทียบกับค่าความแข็งในหน่วยอื่น ๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบค่าความแข็งในกรณีที่ชิ้นงานผ่านการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบที่ต่างกัน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ ณรงค์ศักดิ์ แซ่เตียว และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุ 2.25Cr-1Mo กับ 9Cr-1Mo ทำการเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 โดยผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 760°C เป็นระยะเวลา 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบการเกิด Decarburized Zone (Soft Zone) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ในบริเวณกระทบร้อน(HAZ) ของวัสดุ 2.25Cr-1Mo และพบการเกิด Carburized Zone (Hard Zone) ที่ประกอบไปด้วยผลึกคาร์ไบด์ในบริเวณโลหะเชื่อมที่อยู่ใกล้กับขอบเขตหลอมละลาย(Fusion Boundary) ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของธาตุคาร์บอนจากบริเวณกระทบร้อนซึ่งมีโครเมียมน้อยกว่าเข้าสู่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมซึ่งมีโครเมียมมากกว่า และเมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลานานขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของบริเวณการเกิด Soft Zone มีขนาดเพิ่มมากขึ้น

เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sudha et al. (2002) ได้ทำการศึกษาการเกิดบริเวณ Soft Zone และ Hard Zone ในบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมต่างชนิดกันระหว่างวัสดุเกรด 2.25Cr- 1Mo กับ 9Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม 9Cr-1Mo ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 1, 2, 5, 10 และ 15 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า พบการเกิดบริเวณ Soft Zone ในบริเวณกระทบร้อนทางด้านวัสดุ 2.25Cr-1Mo และ Hard Zone ในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เนื่องจากการเคลื่อนที่ของธาตุคาร์บอน โดยเมื่อให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของบริเวณดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งมีค่าลดลง

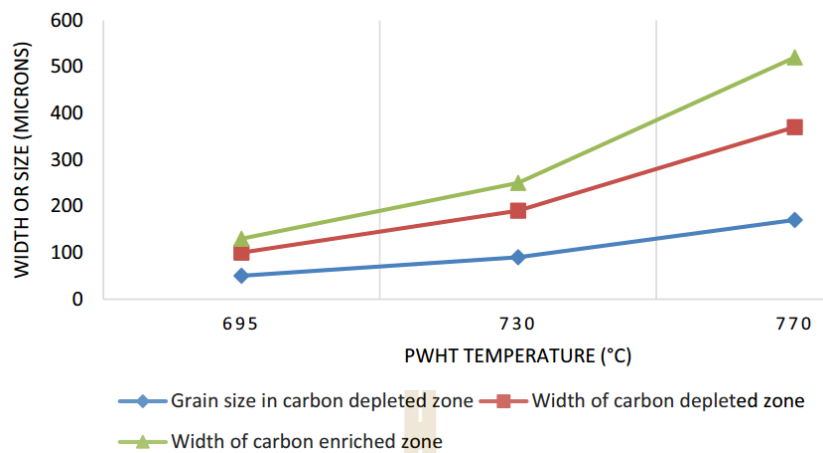
สลิตา เพชรสังข์ และ อิศรทัต พึ่งอัน (2556) ได้ทำการศึกษาผลของเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่มีผลต่อบริเวณ Soft Zone และ Hard Zone ของรอยเชื่อมในวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 760°C เป็นระยะเวลา 0.5, 1, 2, และ 4 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.K.ALBERT และคณะ (1997) ที่ศึกษา

เกี่ยวกับการเกิด Soft Zone และ Hard Zone เมื่อทำการเชื่อมวัสดุ 2.25Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม 9Cr-1Mo โดยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิระหว่าง 700°C ถึง 750°C ที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่านอกจากพบบริเวณการเกิด Soft Zone และ Hard Zone ในบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปริมาณโครเมียมที่แตกต่างกันแล้ว การให้ความร้อนหลังการเชื่อมในระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของบริเวณ Soft Zone เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการค่าคาร์บอนแอคทีวิตี้ที่แตกต่างกัน

R. ANAND et al. (2010) ได้ทำการศึกษารูปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมด้วยวัสดุของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T22 ด้วยลวดเชื่อมรองพื้น Nickel- base (ENiCrFe-3) รอยเชื่อมหนา 0.1 มม. และลวดเชื่อมชนิดเกรด 91 ASTM A387 ตามลำดับ ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม SMAW โดยให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 1 และ 15 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่าลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ Nickel- base สามารถหลีกเลี่ยงการแพร่กระจายของคาร์บอนบริเวณแนวเชื่อมของวัสดุต่างชนิดกันได้ แม้ยังพบการเกิด Soft zone ทางด้าน T22 อยู่ แต่ความกว้างของบริเวณ Soft zone ดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมโดยตรงกับลวดเชื่อม ER90S-B9

YUH-YING YOU et al. (2001) ศึกษาการเคลื่อนที่ของคาร์บอนในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T91 กับลวดเชื่อม 5 ชนิดที่แตกต่างกันได้แก่ E9016-B3, TS-308L, TS-309L, 5Cr-0.5Mo และ ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ Ni base (TNC- 70C) ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 720°C เป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 16, 34 และ 72 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่าพบการเกิดบริเวณ Soft Zone ขึ้นในชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมทุกชิ้น และมีความกว้างมากขึ้นตามเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่นานขึ้น โดยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเคลื่อนที่ของคาร์บอนกับเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T91 ได้ดี สามารถลดอัตราการขยายตัวของ Soft Zone ได้อย่างมาก

Abdur Rahman Sultan et al. (2017) ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo และ 9Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม E9018-B9 ในบริเวณแตกต่างกัน โดยให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิ 690, 730 และ 770°C เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีผลต่อความกว้างของบริเวณการเคลื่อนที่ของคาร์บอนและขนาดของเกรน โดยความกว้างของบริเวณการเคลื่อนที่ของคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับขนาดของเกรนที่มีขนาดโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นการให้ความร้อนและเวลาที่แตกต่างกันมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะ



รูปที่ 2.13 แนวโน้มการเคลื่อนที่ของคาร์บอน

Sudha et al. (2006) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและเคมีจุลภาคของบริเวณ Hard zone ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างวัสดุ 2.25Cr-1Mo กับ 9Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม 9Cr-1Mo ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นระยะเวลา 1 และ 15 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่าบริเวณ Hard zone พบคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ โดยเมื่อเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น ขนาดของคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นด้วย

J.G. NAWROCKI et al. (2001) ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของบริเวณกระแทกร้อนเกรนหยาบในกลุ่มโลหะเฟอร์ริติก วัสดุโครเมียม-โมลิตินัม 2.25Cr- 1Mo และวัสดุ HCM2S ที่อุณหภูมิ 575, 625, 675 และ 725°C เป็นระยะเวลา 0.5, 1, 5 และ 10 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งในบริเวณกระแทกร้อนเกรนหยาบของวัสดุ HCM2S มีเสถียรภาพมากกว่าวัสดุโครเมียม-โมลิตินัมเกรด 2.25Cr- 1Mo เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นและระยะเวลามากขึ้น

Rutash et al. (2014) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของงานเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างวัสดุโครเมียม-โมลิตินัม 2.25Cr- 1Mo กับ 9Cr-1Mo ด้วยลวดเชื่อม Super-CR5 ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก จากผลการศึกษาพบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในบริเวณกระแทกร้อนทางด้านวัสดุ 9Cr-1Mo และพบโครงสร้างเบนไนท์ในบริเวณกระแทกร้อนทางด้านวัสดุ 2.25Cr- 1Mo ที่ติดกับโลหะเชื่อม พบผลึกของคาร์ไบด์ $(Cr, Fe)_3C_3$ และ Cr_3C_3 ในบริเวณกระแทกร้อนวิกฤตที่ติดกับบริเวณเนื้อโลหะเดิม ซึ่งการเกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม อุณหภูมิของความร้อนในกระบวนการที่แต่ละตำแหน่งได้รับแตกต่างกัน ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม ในคุณสมบัติทางกลพบว่าค่าความแข็งในบริเวณกระแทกร้อนของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีค่ามากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุดังกล่าว

บทที่ 3

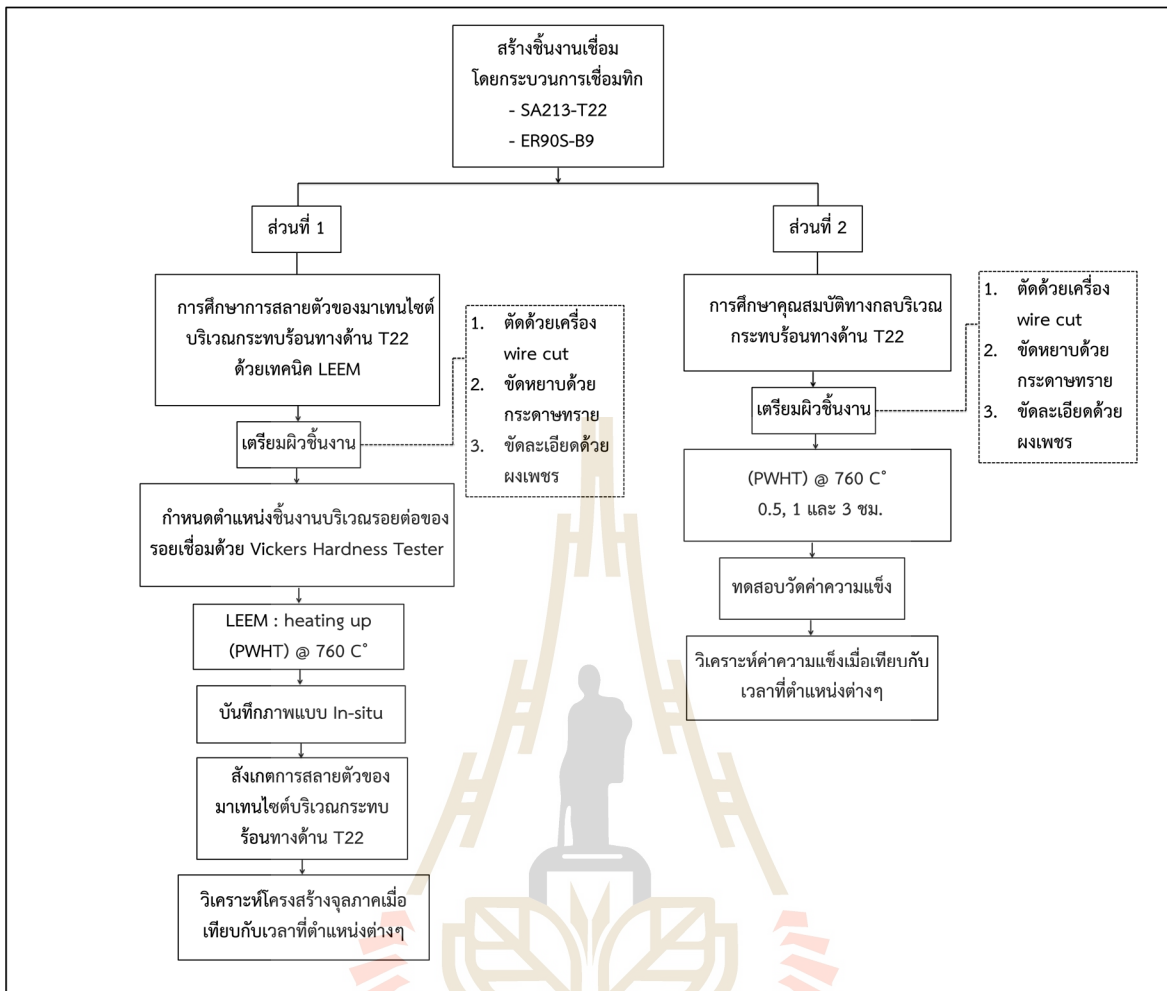
วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการสลายตัวของมาเทนไฮด์บริเวณกระทบบร้อนและศึกษาคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 มีแนวทางการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักได้แก่

3.1 การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาการสลายตัวของมาเทนไฮด์ บริเวณกระทบบร้อนทางเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

3.2 การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด SA213-T22 ที่อุณหภูมิ 760°C

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนผังโดยรวมของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสำหรับการศึกษาการสลายตัวของมาเทนไฮด์บริเวณกระทบบร้อนและศึกษาคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาการสลายตัวของมาเทนไซด์ บริเวณกระหนบร้อนทางเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลและออกแบบการทดลอง
2. วางแผนเตรียมชิ้นงาน
3. ทำการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก
4. ทำการเตรียมผิวชิ้นงานเชื่อม สำหรับการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

5. กำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

6. ศึกษาการสลายตัวของมาเทนไซด์ บริเวณกระทบบร้อนทางเหล็กกล้าโครเมียม-โม

ลิบดินัม เกรด SA213-T22

3.1.2 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

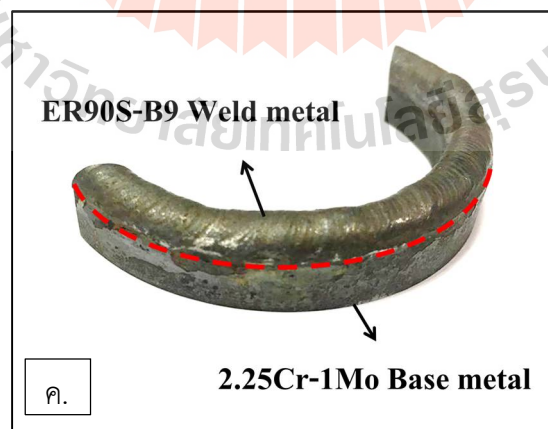
1. วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดินัม เกรด SA213-T22 ชนิดท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 65 มิลลิเมตร ความหนา 6.5 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ดังรูปที่ 3.2 โดยมีส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไป ดังตารางที่ 3.1



(ก) Top view side

(ข) Bottom view side



(ค) แสดงรายละเอียดชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 3.2 ท่อเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดินัม เกรด T22 ที่ผ่านการเชื่อมทิกด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อมที่ใช้

ชนิดของวัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (wt-%)					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
2.25Cr-1Mo	0.15	0.30-0.60	0.50	0.25	1.90-2.60	0.87-1.13
ER90S-B9	0.07-0.13	1.25	0.15-0.30	1.00	8.00-9.50	0.80-1.10

2. เครื่อง Wire Cut

เป็นเครื่องที่ใช้ลวดตัดให้ได้รูปร่างในแนวตั้ง สามารถตัดงานได้เที่ยงตรงสูง และตัดได้ขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ซึ่งสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องตัดโลหะประเภท EDW WIRECUT รุ่น CHARMILLS TECHNOLOGIES ROBOFIL 190 พร้อมด้วยลวดตัดทำด้วยโลหะทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3- 3.4



รูปที่ 3.3 เครื่อง Wire Cut



รูปที่ 3.4 ลวดตัดทำด้วยโลหะทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร

3. เครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุน

เป็นเครื่องขัดที่สามารถเปลี่ยนกระดาษทรายได้และหมุนตลอดเวลา สามารถเพิ่มอัตราเร็วในการหมุนช่วยในการขัดผิวหน้าโลหะให้มีความหยาบผิวต่างกัน ซึ่งเครื่องขัดมีระบบการไหลเวียนของน้ำเพื่อกำจัดเศษโลหะที่หลุดออกในระหว่างการขัด จึงทำให้ชิ้นงานตัวอย่างมีความสะอาดก่อนนำไปทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องขัดกระดาษทรายจานหมุน

4. เครื่องขัดชิ้นงานละเอียดแบบจานหมุน

เป็นเครื่องขัดที่ใช้สำหรับการขัดควบคู่กับสารละลายผงเพชรขนาด 1 ไมครอน เพื่อลบรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทรายและให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอมากขึ้น มีระบบไหลเวียนของน้ำเพื่อกำจัดเศษโลหะและช่วยหล่อลื่นระหว่างกระบวนการขัดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดชิ้นงานละเอียดแบบจานหมุน

5. เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (รูปที่ 3.7)

เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งระดับจุลภาค ใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม (Square-Based Diamond Pyramid) ในการกด กำหนดตำแหน่งลงบนผิวชิ้นงาน สามารถเลือกน้ำหนักกดทดสอบได้ตั้งแต่ 5-2,000 gf. เหมาะสำหรับการใช้งานในวัสดุอ่อนจนกระทั่งแข็งมาก ข้อจำกัดคือต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานที่ดี



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

6. เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น GT SONIC

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก รุ่น GT SONIC เป็นเครื่องที่สามารถปรับค่าความถี่ได้หลายช่วง ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดต้องมีของเหลวเป็นตัวกลางในการทำมาสะอาด เช่น น้ำ สารละลายเอทิลเอทานอล อะซิโตน ฯลฯ สำหรับงานวิจัยนี้สารละลายตัวกลางที่ใช้ร่วมกับเครื่อง

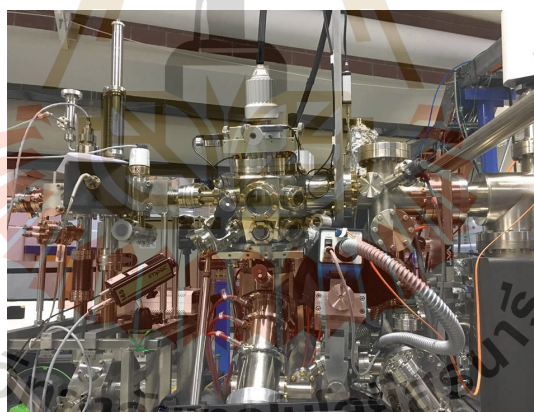
อัลตราโซนิกคือ สารละลายเอทิลเอทานอลและสารละลายอะซิโตน นอกจากนี้ตัวเครื่องมีการติดตั้งตัวให้ความร้อนเพื่อกำจัดสารมลทินที่เกาะอยู่บนชิ้นงาน ดังนั้นจึงเหมาะสมต่อการนำมาใช้ทำความสะอาดชิ้นงานในงานวิจัยที่ต้องการความสะอาดสูง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น GT SONIC

7. ระบบ LEEM

ระบบ LEEM เป็นเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยขั้นสูง โดยนำมาใช้ในงานวิจัยที่สถานีทดลอง BL 3.2b ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ดังรูปที่ 3.9



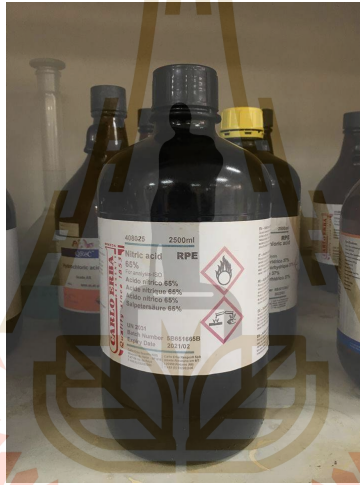
รูปที่ 3.9 ระบบ LEEM

8. กรดไนตริก (HNO_3), สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และน้ำกลั่น

การกัดกร่อนในชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้สารเคมีที่มีสภาพเป็นกรด โดยใช้กรดไนตริก สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่น เพื่อทำให้พื้นผิวโลหะที่ผ่านการขัดเงาสามารถเห็นรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคขณะทำการกำหนดตำแหน่งให้มีความชัดเจนขึ้น (รูปที่ 3.10-3.11)



รูปที่ 3.10 กรดไนตริก (HNO_3)



รูปที่ 3.11 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

9. สารละลายเอทิลเอทานอลและสารละลายอะซิโตน

สารเคมีเหล่านี้ใช้เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกคราบไขมันให้หลุดออกจากชิ้นงาน ซึ่งมักจะ

ใช้ควบคู่กับเครื่องอัลตราโซนิก ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สารละลายเอทิลเอทานอลและสารละลายอะซิโตน

10. ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง

ในการวัดอุณหภูมิของการทดลองควรกำหนดค่า emissivity ของวัสดุที่ใช้ เพราะว่าวัสดุแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ลักษณะพื้นผิวของวัสดุและอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิด้วยไพโรมิเตอร์ เพื่อให้ค่าอุณหภูมิของวัตถุที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง ดังตารางที่ 3.2 แสดงค่า emissivity ของโครเมียม

ตารางที่ 3.2 ค่า emissivity ของโครเมียม

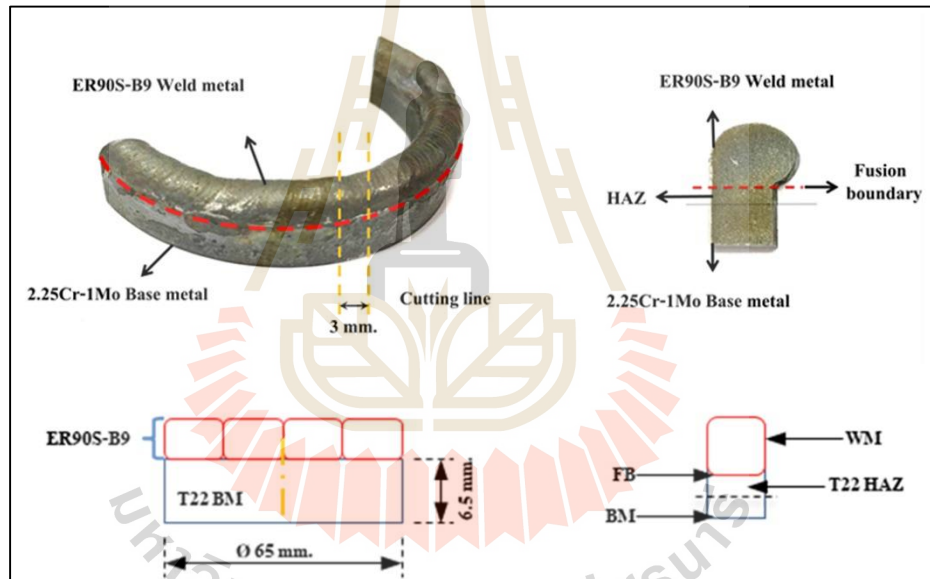
MATERIAL	TEMP °F (°C)	e-EMISSIVITY
Chromium	100 (38)	0.08
Chromium	1000 (538)	0.26
Chromium, Polished	302 (150)	0.06

3.1.3 การเตรียมผิวชิ้นงานเชื่อม

1. นำท่อเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยลวดเชื่อม AWS ER90S-B9 ทำการตัดด้วยเครื่องตัด Wire Cut เพื่อเตรียมผิวสำหรับการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.13 ให้ชิ้นงานมีความหนา 3 มิลลิเมตร ความยาว 15 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.14

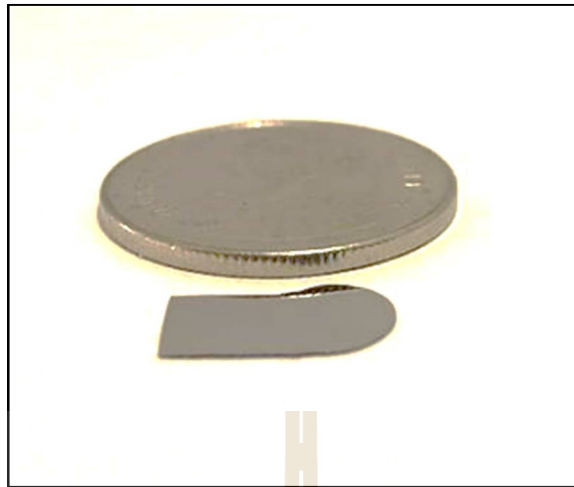


รูปที่ 3.13 การตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire Cut



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัด

2. นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัดเรียบร้อยแล้ว มาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100 320 400 600 800 1000 และ 1200 ด้วยเครื่องขัดชิ้นงานหยาบแบบจานหมุนให้มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตรและทำการขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอน เพื่อลบรอยจากการขัดกระดาษทรายให้มีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยขีดข่วนที่ผิวหน้าชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านขัดหยาบและละเอียด

3. ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานเชื่อม (Etching) ด้วยกรด 10ml HNO_3 + 20ml HCl + 30ml water เป็นเวลา 60 วินาที เพื่อแสดงโครงสร้างจุลภาคขณะทำการกำหนดตำแหน่ง

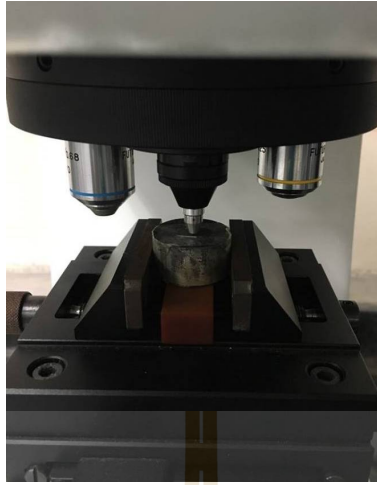
3.1.4 การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานเชื่อม

การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมบนชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

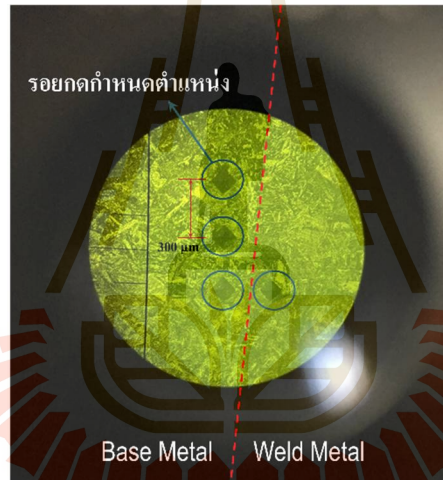
1. การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานจาก Photo hard mask หรือหน้ากากจากสารไวแสง
2. การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานจากเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

การใช้เทคนิค LEEM ในการศึกษาการสลายตัวของมาเทนไซด์ มีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยชิ้นงานทดสอบต้องผ่านการทำความสะอาดขั้นสูงด้วยสารละลายเอทิลเอทานอลและสารละลายอะซิโตน ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานด้วยวิธี Photo hard mask หรือหน้ากากจากสารไวแสงจึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานจากเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ในการกำหนดตำแหน่ง ประกอบด้วยการดำเนินงานดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ที่น้ำหนัก 1 kgf. ด้วยระยะห่างแต่ละจุดเท่ากับ 300 ไมครอนดังรูปที่ 3.16-3.17



รูปที่ 3.16 การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์



รูปที่ 3.17 รอยกดตำแหน่งแต่ละจุดเท่ากับ 300 ไมครอน

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการกำหนดตำแหน่ง ไปทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000, 1200 และทำการขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอนอีกครั้งดังรูปที่ 3.18

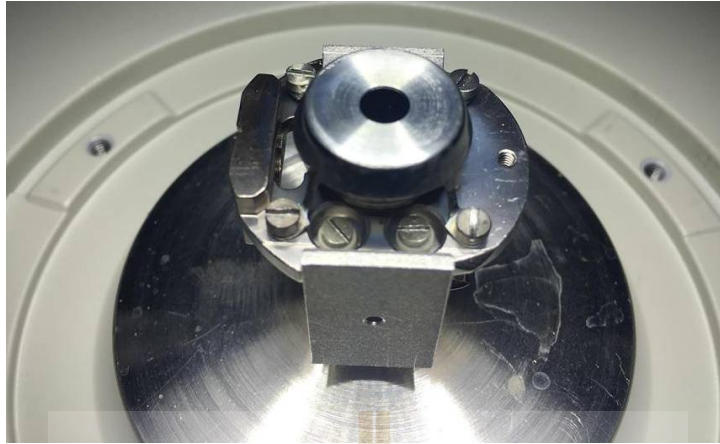


รูปที่ 3.18 การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

3.1.5 การสังเกตการสลายตัวของมาเทนไซด์บริเวณกระทบบร้อนทางด้าน T22

เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการกำหนดตำแหน่งแล้วทั้งหมดไปทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตนด้วยเครื่องทำความสะอาดคลื่นอุลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที แล้วใช้สารละลายเอทานอลทำความสะอาดอีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที ตามลำดับ เพื่อเป็นการขจัดไขมันที่ติดบนชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความสะอาดมากขึ้น จากนั้นทำการติดตั้งชิ้นงานใน Sample Holder ดังรูปที่ 3.19 แล้วทำการสปัตเตอร์อีกครั้งก่อนโหลดเข้าเครื่องเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแก๊สจากชิ้นงาน ต่อไปทำการเลื่อนหาตำแหน่งบริเวณกระทบบร้อนทางด้าน T22 โดยอ้างอิงจากเส้นแบ่งเขตของรอยเชื่อมจากการกำหนดตำแหน่งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ให้มีระยะห่างไม่เกิน 200 หรือ 250 ไมครอน เมื่อพบตำแหน่งที่ต้องการ เริ่มทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงาน จนถึง 770°C ทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูง (High vacuum) โดยควบคุมความดันไม่ให้มากกว่า 3×10^{-9} มิลลิบาร์ เพื่อป้องกันการเกิดการอาร์คกับชิ้นงานดังรูปที่ 3.20 และกำหนดให้ค่า emissivity ของวัสดุ Cr-Mo มีค่าเท่ากับ 0.28

ทำการบันทึกภาพแบบ in-situ โดยใช้โหมด LEEM ในการสังเกตการสลายตัวของมาเทนไซด์บริเวณกระทบบร้อนทางด้าน T22 ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.19 การติดตั้งชิ้นงานใน Sample Holder ของเครื่องทดสอบระบบ LEEM



รูปที่ 3.20 ค่าความดันบนหน้าจอเครื่องควบคุมความดันภายในระบบ



รูปที่ 3.21 จอแสดงผลขณะทำการลอง LEEM

นำผลที่ได้จากการทดลองของการบันทึกภาพแบบ in-situ แต่ละตำแหน่งเทียบกับเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด T22 มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในรูปแบบของภาพถ่าย ดังแสดงไว้ในบทที่ 4

3.2 ศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด SA213-T22 ที่อุณหภูมิ 760°C

3.2.1 มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลและออกแบบการทดลอง
2. ทำการเตรียมผิวชิ้นงานเชื่อม
3. ให้ความร้อนหลังการเชื่อม 760°C เป็นระยะเวลา 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง
4. ทดสอบค่าความแข็ง

3.2.2 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

1. เตายอบไฟฟ้า

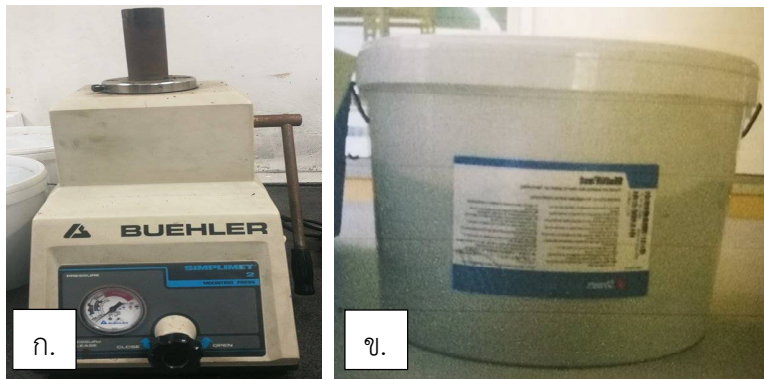
ใช้ไฟฟ้าในการสร้างความร้อน มีฉนวนป้องกันความร้อน เป็นเตาขนาดเล็กที่นิยมใช้ในการอบชิ้นงานที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เตายอบไฟฟ้า

2. เครื่องทำตัวเรือนและ Phenolic hot mounting resin

เป็นเครื่องทำตัวเรือนด้วยความร้อน จะให้ความร้อนละลายผงเรซินเพื่อยึดเกาะชิ้นงาน เมื่อเย็นตัวจะเกิดเป็นรูปทรงทรงกระบอก นิยมใช้ในกรณีชิ้นงานมีขนาดเล็กมากเพื่อให้สะดวกต่อการจับยึดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 (ก.) เครื่องทำตัวเรเนียน และ (ข.) Phenolic hot mounting resin

3.2.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแก๊สชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง wire cut ในขั้นตอนที่ 3.1.3 จำนวน 3 ชิ้นมาทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 760°C แสดงดังรูปที่ 3.24 และความสัมพันธ์ของชิ้นงานแต่ละชิ้นกับเวลาในการให้ความร้อนแสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.24 การนำชิ้นงานเข้าเตาอบ

ตารางที่ 3.3 เวลาในการอบชิ้นงานแต่ละชั้น

ชั้นที่	เวลาในการอบ (ชั่วโมง)
1	0
2	0.5
3	1
4	3

3.2.4 การทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์

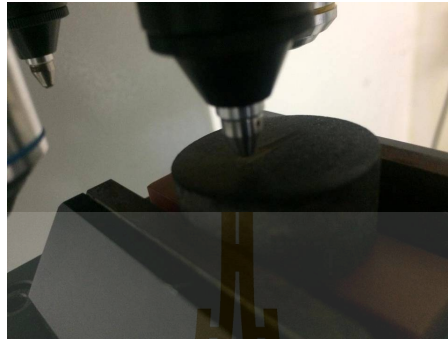
1. นำชิ้นงานที่ 1-4 หลังผ่านการให้ความร้อน มาสร้างตัวเรือนแบบร้อน (Hot mounting) ดังรูปที่ 3.25



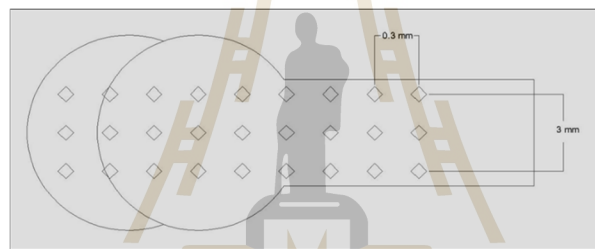
รูปที่ 3.25 การสร้างตัวเรือนแบบร้อน ก) การตรวจวัดขนาดความสูงชิ้นงาน ข) การทำงานของเครื่อง Mounting และ ค) ชิ้นงานที่ผ่านการ Mounting

2. ปรับระนาบและการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1.3
 3. ทดสอบค่าความแข็ง โดยกำหนดแรงกดในการทดสอบที่ 1,000 กรัม ตั้งค่าการทดสอบความแข็งหน่วยเป็น HV กดปุ่มstart หัวกดทดสอบจะเริ่มเคลื่อนที่ลงกดผิวชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ

ดังรูปที่ 3.26 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระแทกขณะกด และปล่อยให้เป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยแต่ละตำแหน่งของการทดสอบความแข็งมีระยะห่าง 300 ไมครอน (0.30 มิลลิเมตร) การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น จะทำการทดสอบดังตำแหน่งการทดสอบดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.26 การกดทดสอบชิ้นงาน



รูปที่ 3.27 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

4. อ่านค่าและบันทึกผลการทดสอบความแข็ง โดยวัดขนาดของเส้นทแยงมุมของรอยกดทั้ง d1 และ d2 ที่ปรากฏเลนส์ขยาย จากนั้นเครื่อง Micro Vickers จะทำการอ่านค่าความแข็งที่ทดสอบออกมาอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ตัวอย่างค่าความแข็ง และ ระยะ d1 และ d2

5. วิเคราะห์ค่าความแข็งเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ

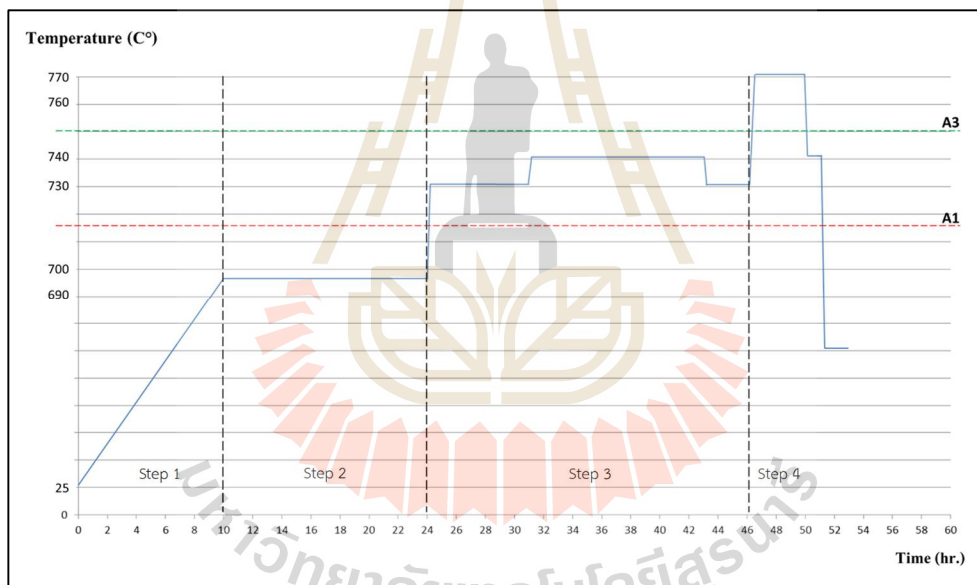
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T22 โดยใช้การเติมลวดเชื่อม ER90S-B9 ในกระบวนการเชื่อมทิก ผ่านเทคนิค LEEM

จากเทคนิค LEEM ในการศึกษาการสลายตัวของมาเทนไซต์ในบริเวณกระทบร้อนทางด้านวัสดุ T22 สำหรับชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยแบ่งช่วงการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ช่วงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

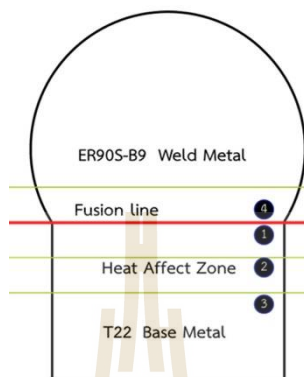


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ตารางที่ 4.1 ช่วงของการให้อุณหภูมิกับชิ้นงานของเทคนิค LEEM

ช่วงที่ (Step)	การให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงาน
1	อุณหภูมิห้อง 25-690°C
2	690-700°C
3	700-740°C
4	740-770°C

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมวัสดุเหล็กกล้า T22 2.25Cr-0.5Mo ด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 ผู้วิจัยได้พิจารณาจากลักษณะของเกรนและโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยแบ่งบริเวณการวิเคราะห์ออกเป็น 4 บริเวณหลัก (รูปที่ 4.2) ได้แก่



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของชิ้นงานเชื่อมในแต่ละบริเวณ

1. ตำแหน่งที่ 1 บริเวณกระแทกร้อนเกรนหยาบด้านวัสดุ T22
2. ตำแหน่งที่ 2 บริเวณกระแทกร้อนเกรนละเอียดด้านวัสดุ T22 ห่างจากแนวแบ่งเขตการหลอมเหลว 250 ไมครอน
3. ตำแหน่งที่ 3 บริเวณเนื้อโลหะเดิม T22 (Base Metal) ห่างจากแนวแบ่งเขตการหลอมเหลว 500 ไมครอน
4. ตำแหน่งที่ 4 บริเวณกระแทกร้อนด้านโลหะเชื่อมที่ติดกับแนวแบ่งเขตการหลอมเหลวระหว่างเนื้อเชื่อมกับเนื้อโลหะงาน (Weld Metal Heat Affect Zone -Interface)

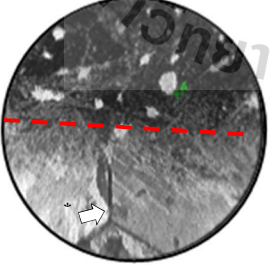

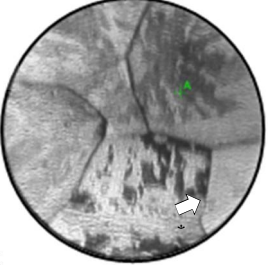
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ณ อุณหภูมิห้อง ของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า T22 2.25Cr-0.5Mo ประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ลโลอิต และผลึกคาร์ไบด์ทั้งภายในเกรนและขอบเกรน (Sae-teaw et al., 2010) เมื่อทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER90S-B9 เกิดการกระจายความร้อนในแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ ทำให้แต่ละจุดได้รับอุณหภูมิและมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน

ตำแหน่งที่ 1 บริเวณกระแทกร้อนเกรนหยาบใต้แนวแบ่งเขตการหลอมเหลวติดฝั่งด้านวัสดุ T22 เป็นบริเวณที่โลหะงานไม่หลอมเหลว แต่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของการเชื่อมสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ถูกเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อันประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซด์ ถัดเข้ามาที่ตำแหน่งที่ 2 บริเวณกระแทกร้อนเกรนละเอียดที่โลหะงานไม่หลอมเหลว แต่ได้รับผลกระแทกร้อน

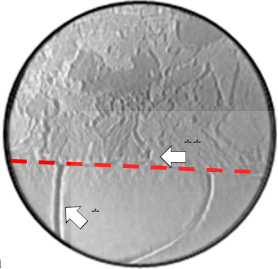
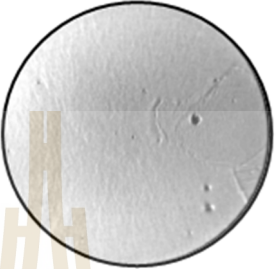
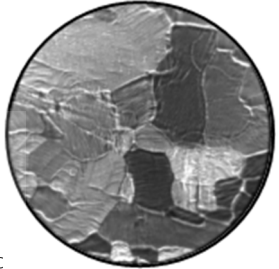
จากการเชื่อมระหว่างอุณหภูมิเส้น AC_1 และ AC_3 และมีอัตราการเย็นตัวช้ากว่าตำแหน่งที่ 1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนส่วนนี้จึงละเอียดขึ้น ดังนั้นในช่วงการเย็นตัวของวัสดุประกอบไปด้วยเกรนของโครงสร้างมาเทนไซต์ และตำแหน่งที่ 4 บริเวณกระทบร้อนด้านโลหะเชื่อมที่ติดกับแนวแบ่งเขตการหลอมเหลว เป็นส่วนที่เนื้อโลหะงานบางส่วนหลอมเหลวเข้ามารวมตัวกับลวดเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน และจุดนี้ได้รับอุณหภูมิขณะเชื่อมสูง ในช่วงของการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้วัสดุที่มีโครเมียมสูง (9-12%) ประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซต์

ช่วงที่ 1 เมื่อทำการเริ่มให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C พบขอบเกรนของ prior austenite ขึ้น โดยลักษณะของเกรน prior austenite ในแต่ละตำแหน่งมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งยืนยันได้ว่าอุณหภูมิดังกล่าวได้เข้าใกล้เส้นอุณหภูมิ AC_1 แล้ว เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ $690-700^\circ\text{C}$ พบว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บนขอบเกรน prior austenite โดยตำแหน่งที่ 1 มีการสลายตัวได้ไวกว่า (ตารางที่ 4.2:2a- bottom) ทำให้พบขอบเกรนของเฟอร์ไรต์ก่อนตำแหน่งที่ 2 ทั้งนี้เริ่มพบความแตกต่างของเกรนในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ที่มีลักษณะเป็นเกรนหยาบกว่าตำแหน่งที่ 3 ในขณะที่ตำแหน่งที่ 4 พบผลึกที่เกิดเป็นแถบยาวพุ่งเข้าหากึ่งกลางรอยเชื่อมได้สลายตัวเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นกลุ่มของเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กละเอียดและมีรูปร่างเป็นเฟอร์ไรต์แบบเข็ม (ตารางที่ 4.2:2a- top)

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายขั้นที่แบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 1

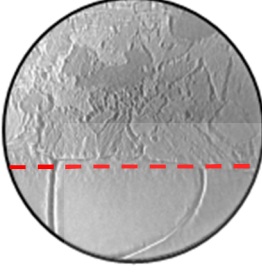
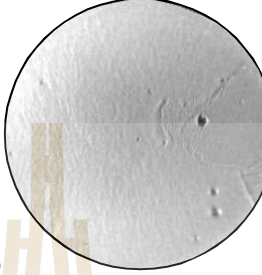
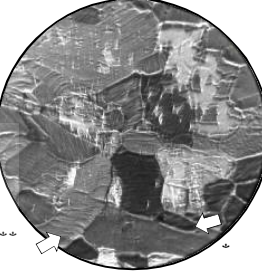
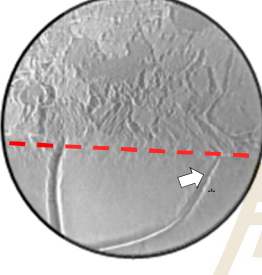
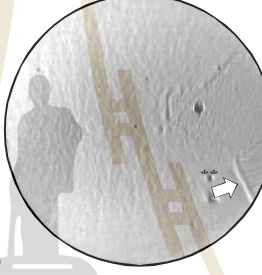
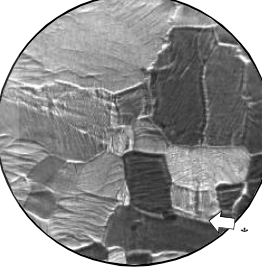
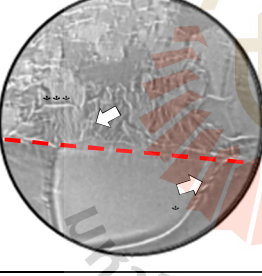
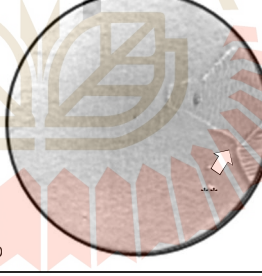
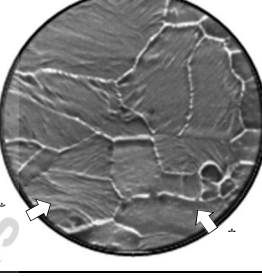
Temp ($^\circ\text{C}$)	LEEM images Zone Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(1) Heating $T < T_{AC1}$ 590°C			
	* prior austenite grain		

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายขั้นที่แบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 1 (ต่อ)

Temp (°C)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(2) Heating $T < T_{AC1}$ $690 - 700^\circ\text{C}$			
	* ferrite, ** กลุ่ม ferrite แบบเข็ม		

ช่วงที่ 2 เมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่ $690-700^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4 ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่งที่ 3 พบเกรนของเฟอร์ไรต์เริ่มเข้ามารวมตัวและเรียงตัวเป็นผลึกของเฟอร์ไรต์ใหม่สลับกับเฟิร์ลไลต์อย่างต่อเนื่อง (ตารางที่ 4.3:3c) โดยเป็นเกรนที่ละเอียดกว่า ซึ่งลักษณะเกรนดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งบริเวณกระทบร้อนเกรนหายาบจริงที่อยู่ใกล้แนวแบ่งเขตการหลอมเหลว ต่อมาทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่ $690-700^\circ\text{C}$ ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 หลังจากเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์โดยสมบูรณ์แล้ว เกรนเริ่มมีการขยายตัวของขอบเกรนเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ตำแหน่งที่ 3 เกรนของเฟอร์ไรต์ยังคงรวมตัวเป็นผลึกของเฟอร์ไรต์ใหม่ (ตารางที่ 4.3:4c) และเมื่อพิจารณาตำแหน่งที่ 4 พบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเกรนละเอียด โดยเกรนที่อยู่ใกล้พื้นที่เส้นแนวแบ่งเขตการหลอมเหลวมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ (ตารางที่ 4.3:4a-top) ทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่ $690-700^\circ\text{C}$ ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมง พบขอบเกรนของเฟอร์ไรต์ในบริเวณตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4 ขยายตัวออกอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกรนของเฟิร์ลไลต์เก่าในตำแหน่งที่ 2 หดลงเล็กน้อย และในส่วนตำแหน่งที่ 3 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างยังคงประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ โดยลักษณะของเกรนมีรูปร่างขนาดสม่ำเสมอ (ตารางที่ 4.3:5c)

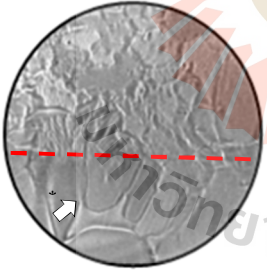

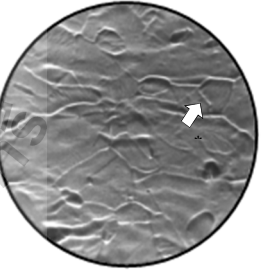
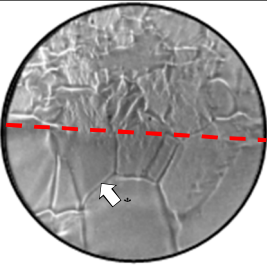
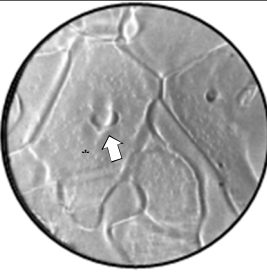
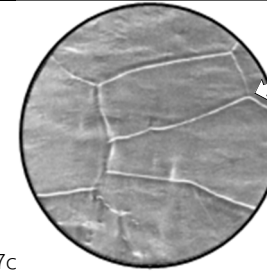
ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 2

Temp (°C)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(3) Heating $T < T_{AC1}$ $690 - 700^\circ\text{C}$ @1 hr.			
(4) Heating $T < T_{AC1}$ $690 - 700^\circ\text{C}$ @6 hrs.			
(5) Heating $T < T_{AC1}$ $690 - 700^\circ\text{C}$ @14 hrs.			
	* ferrite growth, ** Pearlite grain, *** features grain growth		

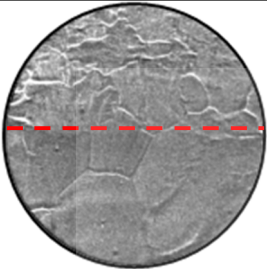
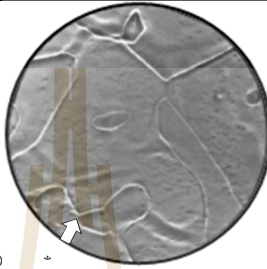
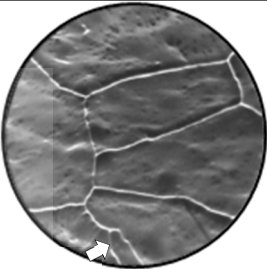
ในช่วงที่ 3 เพื่อยืนยันว่าอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อม $690-700^\circ\text{C}$ ที่ระยะเวลา 14 ชั่วโมงของการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ว่าเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 730°C เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าในตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกรนของเฟอร์ไรต์ได้เริ่มสลายตัวเกิดเป็นนิวเคลียสของออสเทนไนท์ขึ้นตามบริเวณขอบเกรนของเฟอร์ไรต์และกระจายอยู่ทั่วไปในเฟอร์ไรต์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนท์ได้ทันที เมื่อให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง นิวเคลียสของออสเทนไนท์ที่เกิดได้มีการขยายตัวขึ้น (ตารางที่ 4.4:6b-6c) หากพิจารณาลักษณะเกรนในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งมีขนาดเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ หยาบและโตกว่าเกรนในตำแหน่งที่ 3 ทำให้ตำแหน่งดังกล่าวปรากฏปริมาณนิวเคลียสออสเทนไนท์จำนวนน้อยกว่าและมีการเปลี่ยนแปลงจาก

โครงสร้างเฟิร์ลไลท์ไปเป็นออสเทนไนท์ช้า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ 740°C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าตำแหน่งที่ 2 และ 3 ยังคงปรากฏเกรนเฟอร์ไรต์ในขณะที่เกรนเฟิร์ลไลท์ที่เหลือได้ถูกเปลี่ยนเป็นเกรนออสเทนไนท์หมด และปรากฏขนาดของเกรนออสเทนไนท์เพิ่มขึ้นจากขนาดเกรนเล็กไปสู่ขนาดเกรนโตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยผลจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้เกรนของออสเทนไนท์ในตำแหน่งที่ 3 มีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ตำแหน่งที่ 1 ปรากฏเกรนออสเทนไนท์ขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่งที่ 4 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเฟิร์ลไลท์สู่การเกิดนิวเคลียสของออสเทนไนท์เพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากอุณหภูมิเส้น AC_1 ของตำแหน่งนี้มีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น ในทางกลับกันเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงกลับมาที่ 730°C พบว่าตำแหน่งที่ 1 พบปริมาณของออสเทนไนท์ลดลง ในขณะที่ตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกรนของออสเทนไนท์ได้เปลี่ยนเป็นเกรนเฟอร์ไรต์ โดยเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรต์ที่บริเวณขอบเกรนออสเทนไนท์และค่อย ๆ ทำการขยายตัวออก (ตารางที่ 4.4:8b-8c) ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิ 700-740°C นี้สามารถยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ 690-700°C ที่ทำการทดสอบเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตะกอยต์จริง

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 3

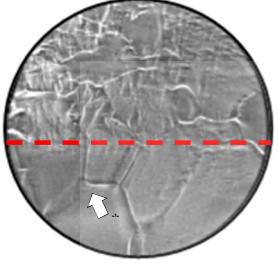
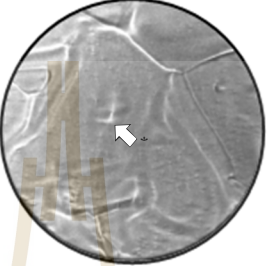
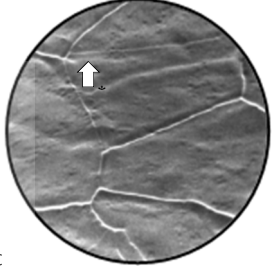
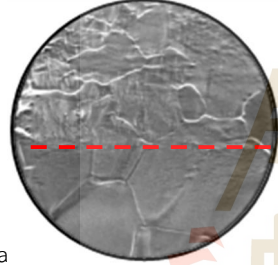
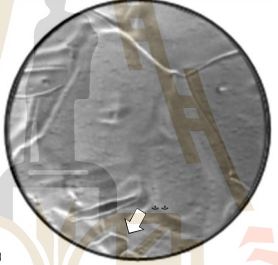
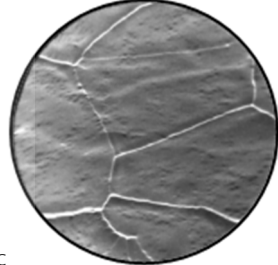
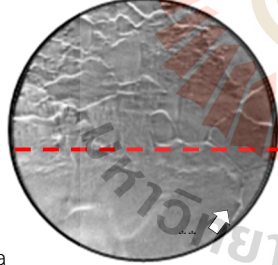
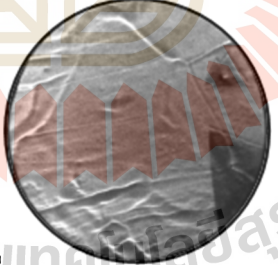
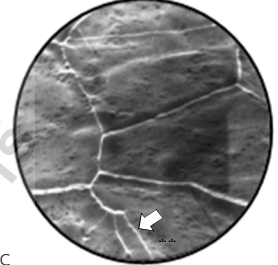
Temp (°C)	LEEM images Zone Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(6) Heating $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ 730 °C @7 hrs.			
	* austenite growth		
(7) Heating $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ 740 °C @12 hrs.			
	* austenite growth		

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 3 (ต่อ)

Temp (°C)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(8) Cooling $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ 730°C	 8a	 8b	 8c
	* ferrite formed		

ในช่วงที่ 4 ผู้วิจัยทำการเย็นอุณหภูมิอีกครั้งด้วยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 770°C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตำแหน่งที่ 1 ปรากฏเกรนออสเทนไนต์ที่มีความสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 2 และ 3 มีปริมาณของเกรนเฟอร์ไรต์ค่อย ๆ ลดลงเปลี่ยนเป็นเกรนออสเทนไนต์ โดยผลจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เกรนของออสเทนไนต์มีการขยายตัวและมีความสม่ำเสมอของเกรนมากขึ้น (ตารางที่ 4.5:9b-9c) แตกต่างกับตำแหน่งที่ 4 ปรากฏเกรนละเอียดของออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นแต่ช้ากว่าบริเวณอื่นซึ่งถือว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ในทางกลับกันเมื่อปล่อยให้เย็นตัวด้วยการลดอุณหภูมิต่ำลงที่ 740°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลงตำแหน่งที่ 1, 3 และ 4 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แตกต่างกับตำแหน่งที่ 2 เกรนออสเทนไนต์ได้เปลี่ยนเป็นเกรนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนต์ โดยผลจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เกรนเฟอร์ไรต์ดังกล่าวขยายตัวออกเล็กน้อยตามขอบเกรน เมื่อปล่อยให้เย็นตัวต่อเนื่องด้วยอุณหภูมิต่ำลงที่ 670°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลงตำแหน่งที่ 1 ไม่ปรากฏเกรนออสเทนไนต์เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 4 เกรนออสเทนไนต์มีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ แต่ตำแหน่งที่ 2 เกรนเฟอร์ไรต์ที่เกิดข้างต้นมีการขยายตัวเป็นเกรนโตขึ้น และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ตำแหน่งที่ 3 เกรนออสเทนไนต์มีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง เกิดนิวเคลียสของเกรนขึ้นตามขอบเกรน ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิ 770°C สามารถยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ $730-740^\circ\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเส้นอุณหภูมิ AC_1-AC_3 และอุณหภูมิ 770°C เป็นอุณหภูมิเหนือเส้น AC_3

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM. ช่วงที่ 4.

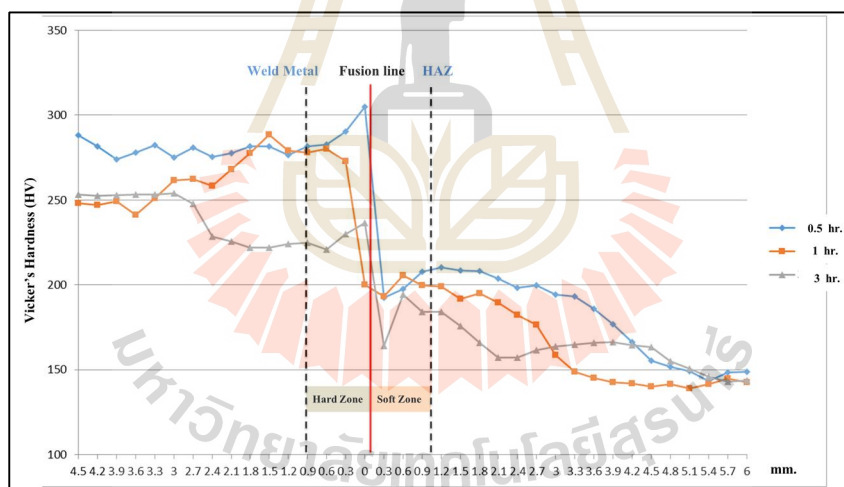
Temp (°C)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
(9) Heating $T_{AC3} < T$ $770 \text{ }^\circ\text{C}$ @3 hrs.			
	* austenite growth		
(10) Cooling $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ $740 \text{ }^\circ\text{C}$ @1 hr.			
(11) Cooling $T < T_{AC1}$ $670 \text{ }^\circ\text{C}$ @2 hrs.			
	** ferrite formed		

ทั้งนี้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค LEEM พบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 4 ตำแหน่ง ลักษณะของลำดับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ได้จะคล้ายคลึงกันกล่าวคือ โครงสร้างมาร์เทนไซต์สลายตัวบนขอบเกรนของออสเทนไนต์เดิมเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ก่อนจะขยายขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งแตกต่างกันเพียงขนาดของเกรนและระยะเวลาในการเกิดโครงสร้าง โดยตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าตำแหน่งที่ 3 ทั้งนี้เกิดจากลักษณะโครงสร้างเดิมของวัสดุและผลจากการได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อมที่ทำให้แต่ละตำแหน่งได้รับอุณหภูมิ

และมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน และจากงานวิจัยนี้พบว่าความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 770 °C นั้น เกิดจากระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อน ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้เกิดลักษณะเฟสที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม 2.25Cr-1Mo เป็นโลหะผสมที่มีธาตุผสมมากกว่า 1 ชนิด จึงทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีมากกว่า 1 เฟสด้วย ทั้งนี้การเพิ่มเวลาและอุณหภูมิของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะทำให้ขนาดของเกรนโตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.K.ALBERT et al. (1997) ได้รายงานไว้ว่าการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่ระยะเวลาแตกต่างกันมีผลต่อความกว้างของโครงสร้างที่เกิดขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abdur Rahman Sultan et al. (2016) ได้รายงานไว้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคาร์บอนและขนาดของเกรน

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล

ค่าความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo เมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 760 °C เป็นระยะเวลา 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะห่างจากขอบเขตหลอมละลาย ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความแข็งสำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง พบว่าบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม (Weld Interface) ทางด้านโลหะเชื่อมมีความแข็งสูงขึ้น และทางด้านบริเวณกระทบร้อนด้านวัสดุ T22 มีความแข็งต่ำลง จากค่าความแข็งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใช้ลวดเชื่อม ER90S-B9 จะมีบริเวณ Soft Zone

และ Hard Zone เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม โดยความแข็งบริเวณกระทันด้านวัสดุ T22 (Soft Zone) มีค่าความแข็งลดลง เป็นผลมาจากเมื่อการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) ปริมาณธาตุคาร์บอนที่อยู่ในบริเวณกระทัน (HAZ) เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณโลหะเชื่อม อันเนื่องมาจากปริมาณธาตุโครเมียมที่แตกต่างกันระหว่างโลหะเชื่อม (9Cr%) กับวัสดุเดิม (2.25Cr%) คาร์บอนจึงเคลื่อนที่จากวัสดุที่มีปริมาณโครเมียมน้อยกว่าเข้าสู่วัสดุที่มีปริมาณโครเมียมมากกว่าในขณะที่ให้ความร้อนหลังการเชื่อม และเมื่อให้เวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น การเคลื่อนที่ของคาร์บอนมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณ Soft Zone และบริเวณ Hard Zone มีค่าน้อยลง

อย่างไรก็ตามความแข็งบริเวณกระทันด้านโลหะเชื่อม (Hard Zone) มีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทันด้านวัสดุ T22 (Soft Zone) เป็นผลมาจากบริเวณ Hard Zone ได้รับธาตุคาร์บอนจากบริเวณ Soft Zone เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เมื่อเวลาในการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น บริเวณ Hard Zone มีค่าความแข็งลดลง เป็นผลมาจากโครงสร้างเกิดเป็นผลึกของคาร์ไบด์ (Carbide Precipitate) โครงสร้างเฟอร์ไรต์เข้ามาแทรกได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาในการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น จึงถือเป็นการอบอ่อน (Annealing) ทำให้ค่าความแข็งบริเวณนี้ลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sae-teaw et al. (2010) และ C.Sudha et al. (2006) ได้รายงานไว้ว่าผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมทำให้ค่าความแข็งในบริเวณ soft zone และ hard zone ลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสลายตัวของมาร์เทนไซต์บริเวณกระทบบร้อนด้วยเทคนิค LEEM ในการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 จากกระบวนการเชื่อมทิก จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า

1. เมื่อขึ้นงานผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบปรากฏการณ์ soft zone ในบริเวณกระทบบร้อนทางด้านวัสดุ T22 ซึ่งสอดคล้องจากงานวิจัยของ สลิตา เพชรสังข์ (2556) และงานวิจัยของ C. Sudha et al. (2002)

2. จากผลการทดลองของเทคนิค LEEM ในงานวิจัยนี้ การให้ความร้อนหลังการเชื่อมได้ อุณหภูมิยูเทคตอยด์บริเวณกระทบบร้อนทางด้านวัสดุ T22 เกิดการสลายตัวของของมาเทนไซต์ เปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ โดยมีลักษณะการสลายตัวเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์เดิม ก่อนเข้าสู่การเกิดเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

3. ผลของระยะเวลาและอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีผลต่อขนาดของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในบริเวณกระทบบร้อนทางด้านวัสดุ T22 หากระยะเวลาและอุณหภูมิการให้ความร้อนมากขึ้น ขนาดของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ยิ่งกว้างขึ้น

4. ขนาดของเกรนที่แตกต่างในแต่ละตำแหน่งเกิดจากการได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อมที่ทำให้แต่ละตำแหน่งได้รับอุณหภูมิและมีอัตราการเย็นตัวที่ต่างกันอย่างชัดเจน

5. การให้ความร้อนหลังการเชื่อมกับขึ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์มาก ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง

ตารางที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณกระทบบร้อนทางด้านวัสดุ T22

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณกระทบบร้อนทางด้านวัสดุ T22
680°C	พบขอบเกรนของ prior austenite
690-700°C	โครงสร้างมาร์เทนไซต์สลายตัวพบโครงสร้างเฟอร์ไรต์
690-700°C 14 ชั่วโมง	พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
730-740°C	พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์
770°C	พบโครงสร้างออสเทนไนต์สมบูรณ์

6. เทคนิค LEEM มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด T22 เมื่อทำการให้ความร้อนกับชิ้นงานสูงถึง 770°C ในลักษณะการมองเห็นแบบ in-situ

และจากการศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo โดยกระบวนการเชื่อมทิก (GTAW) ใช้ลวดเชื่อม ER90S-B9 ซึ่งผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 760°C เป็นเวลา 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น ค่าความแข็งมีค่าลดต่ำลงทั้งบริเวณโลหะเชื่อมและบริเวณวัสดุเดิม T22 ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของธาตุคาร์บอนในวัสดุทั้ง 2 ชนิดที่มีความเป็นโลหะผสม (Alloys) ที่แตกต่างกัน จึงทำให้คาร์บอนจากวัสดุที่มีความเป็นโลหะผสม (Alloys) ต่ำหรือบริเวณ Soft Zone เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เป็นโลหะผสม (Alloys) สูงหรือบริเวณ Hard Zone ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้บริเวณที่เป็น (Alloys) สูงหรือวัสดุที่มีปริมาณโครเมียมมากสามารถจับคาร์บอนได้มากและเกิดเป็นผลึกคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างทางโลหะมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ผสมอยู่ในปริมาณที่มากขึ้นตามการสูญเสียคาร์บอน ทำให้ค่าความแข็งลดลง ยิ่งให้ความร้อนหลังการเชื่อมนานขึ้น ค่าความแข็งยิ่งลดลงมากขึ้น เรียกการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนี้ว่าเป็นการอบอ่อน (Annealing)

ดังนั้นการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันทำให้ค่าความแข็งมีค่าที่แตกต่างกัน เนื่องจากบริเวณกระทันร้อนด้านวัสดุ T22 (Soft Zone) มีส่วนผสมที่เป็นอัลลอยด์ต่ำมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณกระทันร้อนด้านโลหะเชื่อม (Hard Zone) มีส่วนผสมที่เป็นอัลลอยด์สูงมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีสูง จึงทำให้บริเวณที่มีส่วนผสมทางเคมีต่ำผลักดันธาตุคาร์บอนไปสู่บริเวณที่มีส่วนผสมทางเคมีสูง ทำให้บริเวณที่มีอัลลอยด์สูง มีค่าความแข็งมาก

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคการเชื่อมต่อวัสดุที่แตกต่างกันของกลุ่มเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 สามารถเป็นแนวทางศึกษาในกลุ่มวัสดุอื่นๆโดยใช้เทคนิค LEEM ในลักษณะ in-situ ได้ และงานวิจัยต่อไปควรศึกษาคูณสมบัติทางกลอื่นๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

- ธนกร ณ พัทลุง. (2552). สิ่งที่เราควรรู้เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในหม้อไอน้ำ. MTEC. กรกฎาคม – กันยายน. 2552. หน้า 14-18.
- พิเชษฐ์ สุขโต. 2561. การศึกษาสาเหตุการเกิดรอยแตกที่ร้าวท่อ Expander ของ main steam stop valve โรงไฟฟ้าวังน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรากร อาจดำเกิงไกร. 2558. การทดสอบความแข็งของเหล็ก (Online). Available <http://http://engineeringmaterialsproject.blogspot.com/2015/>
- สมาน เสนงาม. 2543. June. ผังแสดงการไหลของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Online). Available http://me.psu.ac.th/Power_Plant_Engineering/
- สลิตา เพชรสังข์ และ อิศรทัต พึ่งอัน. (2556). การศึกษาเกี่ยวกับผลของเวลาการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ที่มีผลต่อบริเวณ Soft Zone และ Hard Zone ของรอยเชื่อมในวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. 16-18 ตุลาคม 2556. พัทยาชลบุรี.
- Abdur Rahman Sultan, R. Ravibharath, and R. Narayanasamy. (2017). Study of dissimilar header welding between 2.25Cr-1Mo steel and 9Cr-1Mo steel with 9018 B9 electrode under various conditions of post weld heat treatment. Transactions of the Indian Institute of Metals. 70(8). 2079 to 2092.
- Calvin K. Chan, Taisuke Ohta, Gary L. Kellogg et al (2014). Direct observation of grain boundary PN junction potentials in CIGS using photoemission and low energy electron microscopy (PELEEM). SAND. 2014. 15525C.
- Cerjak, Horst-Hannes, and Peter Mayr. (2008). Creep strength of welded joints of ferritic steels. Edited by F. Abe, T.U. Kern and R. Viswanathan. Creep resistant steels. pp. 472-503. Woodhead Publishing and Maney Publishing.

- C. Sudha, A. L. E. Terrance, S. K. Albert et al. (2002). Systematic study of formation of soft and hard zones in the dissimilar weldments of Cr–Mo steels. Journal of Nuclear Materials. Vol.302. 193 to 205.
- C. Sudha, V. Thomas Paul, A.L.E. Terrance et al. (2006). Microstructure and microchemistry of hard zone in dissimilar weldments of Cr-Mo steels. Welding Journal Vol.85(4). 71 to 80.
- D. Gandy. (2005), Grade 22 Low Alloy Steel Handbook. Electric Power Research Institute. Final Report. pp. 1-79.
- J. G. Nawrocki, N. DuPont, R. Marder et al. (2001). The postweld heat-treatment response of simulated coarse-grained heat-affected zones in a new ferritic steel. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol 32. Issue.10. pp 2585–2594.
- King, Benjamin. (2005). Welding and post weld heat treatment of 2.25% Cr-1% Mo steel. Australia. pp 9-40.
- Lucia Aballe and Michael Foerster. 2015. Working principles of LEEM-PEEM (Online). Available <http://ndico.cells.es/indico/event/24/session/2/>
- M. Rutash and S.S Buta. (2014). Microstructural and mechanical characterization of the different zones of the T91/T22 weldment. International Journal of Surface Engineering & Materials Technology. Vol.4. No.2. pp.45 to 49
- N. Sae-teaw, B. Poopat, I. Phung-on et al. (2010). Analysis of microstructure in soft zone and precipitation zone of dissimilar Cr-Mo steels weldment. Journal of AIJSTPME. Vol 3. No.2. 57 to 64.
- P Schulze, E Schmidl, T Grund et al. (2016). Prediction of austenite formation temperatures using artificial neural networks. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 118. No. 1. pp. 012029.

R. Anand, C. Sudha, V. Thomas Paul et al. (2010). Microstructural changes in grade 22 ferritic steel clad successively with Ni-based and 9Cr filler metals. Welding Journal. Vol. 89. 65-S to 74-S.

S. K. Albert, T. P. S. Gill, A. K. Tyagi et al. (1997). Soft zone formation in dissimilar welds between two Cr-Mo steels. Welding Journal. Vol. 76. No.3. 135-s to 142-s.

The Welding Master. 2017. GTAW (Online). Available <http://theweldingmaster.com/what-is-tig-welding-process-or-gas-tungsten-arc-welding-gtaw/>

Wballoys. 2017. Weld wire (Online). Available <http://wballoys.co.uk/TIGwire/data-sheets/>

Yuh-Ying You, and Ren-Kae Shiue. (2001). The study of carbon migration in dissimilar welding of the modified 9Cr-1Mo steel. Journal of Metallurgical Science letters. Vol. 20. 1429 to 1432.

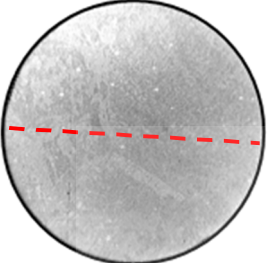
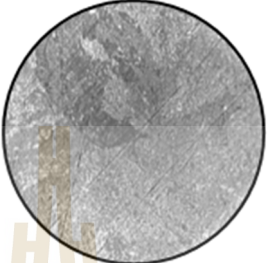
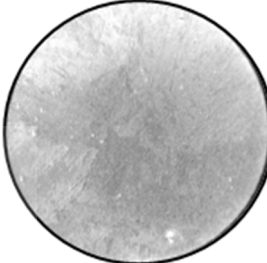
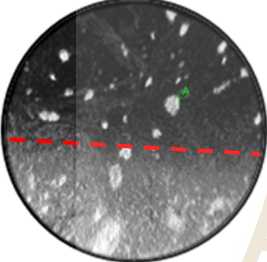
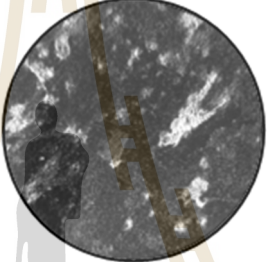
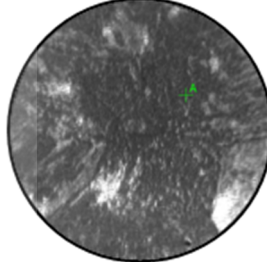
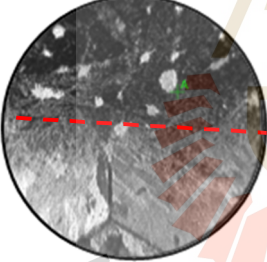


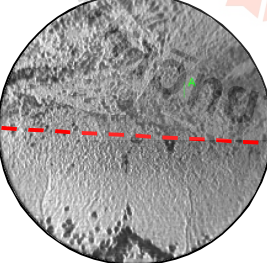
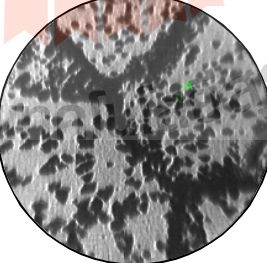
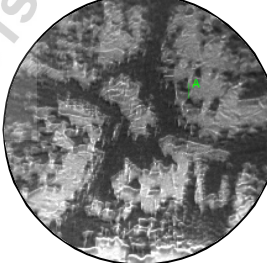
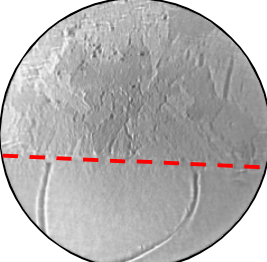
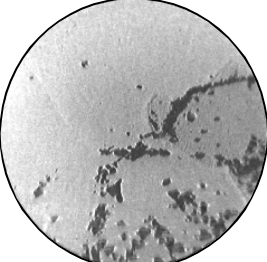
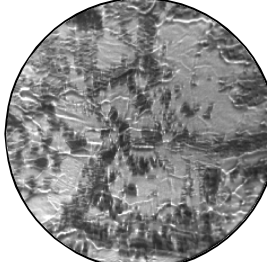




ภาคผนวก ก.

ผลการบันทึกภาพถ่ายแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM

ตารางที่ ก.1 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.

Temp (C°)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
Room temp			
Heating $T < T_{AC1}$ 500 C°			
Heating $T < T_{AC1}$ 590 C°			
Heating $T < T_{AC1}$ 650 C°			
Heating $T < T_{AC1}$ 670 C°			

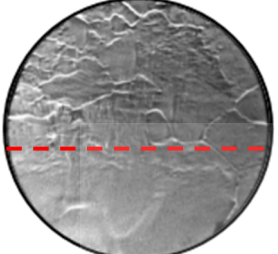
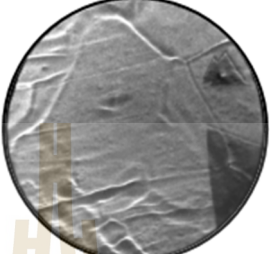
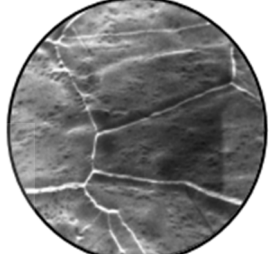
ตารางที่ ก.1 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.(ต่อ)

Temp (C°)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
Heating $T < T_{AC1}$ 690 - 700C°			
Heating $T < T_{AC1}$ 690 - 700 C° @1 hr.			
Heating $T < T_{AC1}$ 690 - 700 C° @6 hrs.			
Heating $T < T_{AC1}$ 690 - 700 C°@14 hrs.			
Heating $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ 730 C° @1 hr.			

ตารางที่ ก.1 ภาพถ่ายบันทึกแบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.(ต่อ)

Temp (C°)	LEEM images Zone		
	Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
Heating $T_{AC1} < T_{AC3}$ 730 C° @7 hrs.			
Heating $T_{AC1} < T_{AC3}$ 740 C° @12 hrs.			
Cooling $T_{AC1} < T_{AC3}$ 730 C°			
Heating $T_{AC3} < T$ 770 C° @3 hrs.			
Cooling $T_{AC1} < T < T_{AC3}$ 740 C° @1 hr.			

ตารางที่ ก.1 ภาพถ่ายชั้นที่แบบ in-situ ด้วยเทคนิค LEEM.(ต่อ)

Temp (C°)	LEEM images Zone Start voltage at ≈ 0.40 V, $75 \mu\text{m}$ field-of-view(FOV)		
	Position 1 CGHAZ (bottom) Position 4: Weld Metal at fusion boundary	Position 2: FGHAZ	Position 3: BM
Cooling $T < T_{AC1}$ 670 C° @2 hrs.			



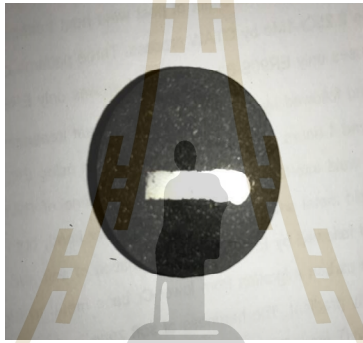
ภาคผนวก ข.

ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อมวัสดุต่างชนิดใน
เหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด SA213-T22 และลวดเชื่อม ER90S-B9

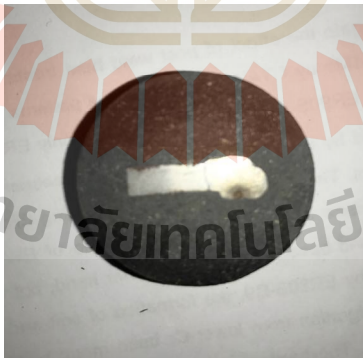
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



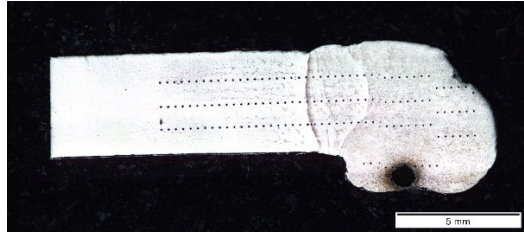
รูปที่ ข.1 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 0.5 ชั่วโมง



รูปที่ ข.2 ชั่วโมงชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง



รูปที่ ข.3 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อน 3 ชั่วโมง



รูปที่ ข.4 ชิ้นงานทดสอบความแข็งหลังผ่านการให้ความร้อน



ตารางที่ ข.1 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 760°C

	ครั้งที่	ตำแหน่ง	อ่าน	อ่าน	อ่าน	average	average รวม
	ที่	การ	ค่า	ค่า	ค่า		
รอยเชื่อม	15	1	287.1	289	292.3	289.53	288.09
		2	280.5	285	283.5	283.07	
		3	304.7	286	284.5	291.67	
	14	1	285	283	283.8	283.83	281.56
		2	272.4	270	271.8	271.30	
		3	289.4	290	289.7	289.53	
	13	1	279.5	279	277.2	278.57	274.03
		2	276.1	277	273.9	275.70	
		3	267	269	267.6	267.83	
	12	1	284.8	284	285.2	284.67	278.10
		2	297	293	289.1	293.13	
		3	256.9	256	256.2	256.50	
	11	1	292.2	291	286	289.70	282.17
		2	280.8	281	281.3	281.10	
		3	276.7	275	275.7	275.70	
	10	1	280.4	284	282.3	282.23	275.03
		2	272.5	275	273.1	273.53	
		3	266.4	270	271.6	269.33	
	9	1	288.7	290	287.6	288.77	280.97
		2	290.8	292	292	291.60	
		3	264.6	262	260.6	262.53	
	8	1	279.4	283	276.9	279.77	275.44
		2	279.6	276	279	278.27	
		3	265.7	270	269.3	268.30	

ตารางที่ ข.1 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ทดสอบ	ตำแหน่งการ	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	average average	average รวม	
รอยเชื่อม	7	1	287.6	282.9	286.6	285.70	277.54	
		2	278	276.4	277.9	277.43		
		3	267.8	269.1	271.6	269.50		
	6	1	288.3	291.3	288	289.20	281.64	
		2	286.7	284.5	282.7	284.63		
		3	270.3	270.2	272.8	271.10		
	5	1	285.1	284.8	284	284.63	281.50	
		2	282.1	283.6	282	282.57		
		3	273.4	277.4	281.1	277.30		
	4	1	276.1	276.8	276.3	276.40	276.38	
		2	275.8	281.4	280	279.07		
		3	272.7	272.5	275.8	273.67		
	3	1	285.6	282.8	286.2	284.87	281.72	
		2	294.9	286.7	289.5	290.37		
		3	270.4	272	267.4	269.93		
	2	1	283.3	283.8	283.1	283.40	282.60	
		2	289.5	288.4	287.9	288.60		
		3	275.5	275.6	276.3	275.80		
	1	1	289	289.5	289.2	289.23	290.31	
		2	299.3	299.5	299.8	299.53		
		3	279.5	284	283	282.17		
	บริเวณเส้น (fusion)		1	306.1	302.9	308	305.67	305.06
			2	311.9	315.4	304.5	310.60	
			3	294.8	301.9	300	298.90	

ตารางที่ ข.1 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่ง การ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	average	average รวม
ชิ้นงาน	1	1	198.1	198.4	198.5	198.33	192.50
		2	189.8	189.6	189.7	189.70	
		3	189.2	189.5	189.7	189.47	
	2	1	197.2	197.5	197.1	197.27	197.56
		2	200.3	199.8	200.1	200.07	
		3	195.2	195.5	195.3	195.33	
	3	1	207.4	206.2	205.4	206.33	207.74
		2	206.1	205.9	207.4	206.47	
		3	210.6	210.5	210.2	210.43	
	4	1	206.7	204.8	207.6	206.37	210.20
		2	211.1	214.5	212.3	212.63	
		3	211.2	212	211.6	211.60	
	5	1	204	203.8	204.8	204.20	208.56
		2	211.5	211.7	210.1	211.10	
		3	209.8	210.8	210.5	210.37	
	6	1	204.6	205.5	205.2	205.10	208.19
		2	208.5	206.4	208.8	207.90	
		3	214	209.5	211.2	211.57	
	7	1	202.6	200.9	203.1	202.20	203.84
		2	206.1	205	204.6	205.23	
		3	204.6	203.6	204.1	204.10	
	8	1	192.2	196.6	191.3	193.37	198.38
		2	198.5	197.8	198.7	198.33	
		3	198.5	206.6	205.2	203.43	
	9	1	198.2	196.7	198	197.63	199.78
		2	200.1	200.6	200.3	200.33	
		3	200.1	202.5	201.5	201.37	
	10	1	190.5	190.5	189.1	190.03	194.21
		2	195.6	198.2	198	197.27	
		3	195.5	196.5	194	195.33	

ตารางที่ ข.1 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

ชิ้นงาน	12	1	183.4	183	184.1	183.47	185.83
		2	186.6	187	188.2	187.20	
		3	186.2	187	187.4	186.83	
	13	1	172.7	172	171.1	171.83	176.80
		2	177.4	180	180.8	179.30	
		3	179.8	179	178.7	179.27	
	14	1	160.3	161	162.1	161.23	166.24
		2	165.1	168	166.7	166.70	
		3	171.2	169	172.3	170.80	
	15	1	152	152	153.4	152.33	155.47
		2	152.9	154	155	154.10	
		3	160.7	158	161	159.97	
	16	1	148.1	146	147.1	147.13	151.86
		2	153.6	153	152.4	153.00	
		3	155.8	155	155.5	155.43	
	17	1	145.3	146	146.1	145.67	149.28
		2	148.4	149	150.1	149.13	
		3	152.7	153	153.5	153.03	
	18	1	143.8	144	142.9	143.40	143.42
		2	140.8	141	140.7	140.67	
		3	147.2	145	146.2	146.20	
	19	1	150.2	149	149.5	149.50	148.29
		2	144.1	145	143.7	144.13	
		3	152.2	150	151.4	151.23	
20	1	150.9	151	149.8	150.40	148.82	
	2	146.9	149	148.3	148.07		
	3	146.9	149	147.9	148.00		

ตารางที่ ข.2 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่ง การ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
รอยเชื่อม	14	1	246.5	246.9	242.7	245.37	247.06
		2	240	253.5	256.9	250.13	
		3	245.7	245.9	245.4	245.67	
	13	1	251.1	251.8	251.1	251.33	249.13
		2	238.3	242.6	247.1	242.67	
		3	252.8	252.8	254.6	253.40	
	12	1	242.8	243.2	240.5	242.17	241.32
		2	247.4	246.3	242.6	245.43	
		3	241.1	236	232	236.37	
	11	1	242.9	243.8	242.1	242.93	251.22
		2	243.6	243.2	245.7	244.17	
		3	269.5	269.5	260.7	266.57	
	10	1	242.1	243.1	246.3	243.83	261.68
		2	261.7	266.8	271.8	266.77	
		3	274	278.1	271.2	274.43	
	9	1	260.7	260.8	264.1	261.87	262.33
		2	259.5	262.2	254.3	258.67	
		3	265.2	266.9	267.3	266.47	
	8	1	265.1	266.2	264.8	265.37	258.37
		2	253.2	257.8	254.1	255.03	
		3	251.6	254.4	258.1	254.70	
	7	1	275.2	276.1	268.5	273.27	268.29
		2	268.3	271.4	270.5	270.07	
		3	260.9	261.7	262	261.53	
6	1	269.1	267.7	267.7	268.17	277.61	
	2	304.1	305.7	291	300.27		
	3	266.3	262.8	264.1	264.40		

ตารางที่ ข.2 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่ง การ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
รอยเชื่อม	5	1	286.1	284.5	282.7	284.43	288.70
		2	297.4	296.3	299.2	297.63	
		3	285.8	283.7	282.6	284.03	
	4	1	283.4	278.2	281.6	281.07	278.94
		2	274.3	275.7	279	276.33	
		3	277.2	281.6	279.5	279.43	
	3	1	281.6	280.6	280.5	280.90	277.79
		2	270.7	270.5	272.8	271.33	
		3	281.9	280.1	281.4	281.13	
	2	1	279.6	278	278.4	278.67	280.09
		2	275.4	274.8	278.5	276.23	
		3	280.2	282.6	293.3	285.37	
1	1	251.3	245.3	249.8	248.80	272.98	
	2	283.9	283.4	282.8	283.37		
	3	287.6	287.1	285.6	286.77		
บริเวณ เส้น (fusion)		1	302.8	304.5	305.6	304.30	308.93
		2	323.3	327.8	336.3	329.13	
		3	290.7	295.1	294.3	293.37	
ชิ้นงาน	1	1	193.3	196.5	193.2	194.33	193.23
		2	187.5	185.7	185.3	186.17	
		3	202.2	199.6	195.8	199.20	
	2	1	209.6	209.6	210.4	209.87	205.64
		2	201.5	199.1	196	198.87	
		3	211.6	207.4	205.6	208.20	

ตารางที่ ข.2 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่ง การ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
ชิ้นงาน	3	1	195.1	191.2	196.1	194.13	199.83
		2	205.4	205.5	205.9	205.60	
		3	199.7	199.9	199.7	199.77	
	4	1	192.9	192.7	193.3	192.97	199.04
		2	200.7	201.9	199	200.53	
		3	202.3	204.9	203.7	203.63	
	5	1	194.9	193.5	193.8	194.07	191.69
		2	197.1	197.8	196.3	197.07	
		3	181.5	186.7	183.6	183.93	
	6	1	197.6	199.5	202.9	200.00	195.02
		2	191.7	193.5	188.7	191.30	
		3	192.8	195.5	193	193.77	
	7	1	189.8	192.5	190.9	191.07	189.60
		2	189.6	189.4	198.3	192.43	
		3	183.9	184.5	187.5	185.30	
	8	1	181.7	181.4	178.7	180.60	182.38
		2	181.5	182.5	184.3	182.77	
		3	183.3	183	185	183.77	
	9	1	175.4	177.5	173.1	175.33	176.36
		2	178.4	176.3	181.1	178.60	
		3	175.1	175.9	174.4	175.13	
	10	1	158.6	157.7	155.7	157.33	158.51
		2	163	163.3	162.6	162.97	
		3	157.7	152.3	155.7	155.23	
	11	1	146.6	149.2	150.1	148.63	148.73
		2	150.8	151.5	151.3	151.20	
		3	146.9	146.4	145.8	146.37	

ตารางที่ ข.2 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่ง การ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
ชิ้นงาน	12	1	145.6	144.7	143.6	144.63	145.21
		2	147.4	149.7	149.5	148.87	
		3	142.6	141.7	142.1	142.13	
	13	1	138.7	140.5	142.3	140.50	142.52
		2	145	145.8	145	145.27	
		3	139.1	142.2	144.1	141.80	
	14	1	141.4	142.3	140.8	141.50	141.79
		2	143.8	144.8	145.2	144.60	
		3	139	139.6	139.2	139.27	
	15	1	139.8	139.1	138.7	139.20	140.04
		2	142.5	142	140.6	141.70	
		3	138	140.5	139.2	139.23	
	16	1	142	140.7	140.7	141.13	141.39
		2	144.3	144	141.6	143.30	
		3	138.1	140	141.1	139.73	
	17	1	137	135.2	133.5	135.23	138.86
		2	140.2	140.7	139.7	140.20	
		3	140	140.2	143.2	141.13	
	18	1	138.8	139.7	141.4	139.97	141.52
		2	141.8	141.9	143.7	142.47	
		3	141.3	143.8	141.3	142.13	
	19	1	143.4	142.4	142.4	142.73	144.81
		2	145.9	147.3	148.1	147.10	
		3	143.5	145.6	144.7	144.60	
20	1	145.4	146.1	147.1	146.20	142.69	
	2	143.6	143.2	142.8	143.20		
	3	139.2	138.4	138.4	138.67		

ตารางที่ ข.3 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิตินัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C

	ครั้งที่ทดสอบ	ตำแหน่งการทดสอบ	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	Average	Average รวม
รอยเชื่อม	13	1	249.3	248.6	250.9	249.60	253.02
		2	251.9	251.7	254.2	252.60	
		3	258.4	257	255.2	256.87	
	12	1	250.9	248.1	251.8	250.27	253.10
		2	256.4	254.9	255.9	255.73	
		3	253.8	255.2	250.9	253.30	
	11	1	250.2	252.6	249.5	250.77	253.08
		2	254.8	255.6	257.1	255.83	
		3	251.8	253.4	252.7	252.63	
	10	1	249.7	251.7	249.3	250.23	253.93
		2	251.7	253.3	254.2	253.07	
		3	259.4	258	258.1	258.50	
	9	1	248.6	249.1	249.1	248.93	247.69
		2	246.3	248.1	248.9	247.77	
		3	244.6	247.9	246.6	246.37	
	8	1	243.9	243.4	244.4	243.90	228.61
		2	219.4	218.7	220.2	219.43	
		3	222.4	223	222.1	222.50	
	7	1	235.4	235.6	235.1	235.37	225.44
		2	221.1	219.2	219.5	219.93	
		3	221	221.4	220.7	221.03	
	6	1	224.7	226.4	225.2	225.43	221.77
		2	219.4	222.7	219.1	220.40	
		3	217.5	220	220.9	219.47	
5	1	224.3	225.2	225.5	225.00	221.94	
	2	220.5	218.6	220.8	219.97		
	3	220.6	221.5	220.5	220.87		

ตารางที่ ข.3 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่งการ ทดสอบ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
รอยเชื่อม	4	1	221.8	222.2	221.6	221.87	224.20
		2	228	229.5	229.6	229.03	
		3	221.6	222.4	221.1	221.70	
	3	1	210.3	212.7	211.7	211.57	224.68
		2	225.5	231.6	230.8	229.30	
		3	234.4	234.7	230.4	233.17	
	2	1	215.5	215	217.2	215.90	220.89
		2	219.9	220.2	219.6	219.90	
		3	227.8	225.6	227.2	226.87	
	1	1	240.7	237.7	239.3	239.23	229.89
		2	228.2	230.5	230.1	229.60	
		3	220.7	220.3	221.5	220.83	
บริเวณ เส้น (fusion)		1	237.8	236.6	238.4	237.60	236.66
		2	236.7	236.9	236.5	236.70	
		3	235.4	235.9	235.7	235.67	
ชิ้นงาน	1	1	194.5	195.5	194.1	194.70	164.27
		2	145.3	145.1	145.2	145.20	
		3	153.8	151.9	153	152.90	
	2	1	193.1	193.1	194.8	193.67	194.21
		2	195.9	196.6	194.9	195.80	
		3	191.4	194.1	194	193.17	
	3	1	185.6	184.2	184.5	184.77	184.09
		2	186	187.3	186.3	186.53	
		3	181.4	180.8	180.7	180.97	
	4	1	186.6	189.4	189.4	188.47	184.02
		2	178.5	179.7	179.9	179.37	
		3	185.2	183.2	184.3	184.23	

ตารางที่ ข.3 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่งการ ทดสอบ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
ชั้นงาน	5	1	179.5	180.8	180.2	180.17	175.77
		2	172.3	171.8	172.5	172.20	
		3	176.9	173.9	174	174.93	
	6	1	174.3	174.3	172.7	173.77	165.87
		2	159.1	157.6	159.7	158.80	
		3	163.7	165.3	166.1	165.03	
	7	1	161.5	162.4	161.9	161.93	157.11
		2	155	154.7	155.4	155.03	
		3	154.6	153.7	154.8	154.37	
	8	1	159.6	159.5	160.4	159.83	157.17
		2	158	156.3	156.8	157.03	
		3	155	154.2	154.7	154.63	
	9	1	169.1	166.5	166.2	167.27	161.38
		2	159.9	159.2	159.7	159.60	
		3	157.9	156	157.9	157.27	
	10	1	166.3	165.7	165.2	165.73	163.86
		2	164.4	163.9	165.8	164.70	
		3	162	160.4	161	161.13	
	11	1	166	167.6	164.5	166.03	164.87
		2	165.9	164.2	164.7	164.93	
		3	163	164.5	163.4	163.63	
	12	1	165.1	167.8	166.6	166.50	165.88
		2	166.2	166	164.5	165.57	
		3	165.7	165.3	165.7	165.57	

ตารางที่ ข.3 การบันทึกผลการทดลองการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม เกรด 2.25Cr-1Mo ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 760°C (ต่อ)

	ครั้งที่ ทดสอบ	ตำแหน่งการ ทดสอบ	อ่านค่า ครั้งที่1	อ่านค่า ครั้งที่2	อ่านค่า ครั้งที่3	Average	Average รวม
ชิ้นงาน	13	1	167.7	166.8	168.1	167.53	166.23
		2	165.8	165.5	165.9	165.73	
		3	165.8	164.6	165.9	165.43	
	14	1	165.8	164.9	167	165.90	164.44
		2	165.5	164	165.1	164.87	
		3	162.4	162.6	162.7	162.57	
	15	1	166.7	165.9	165.3	165.97	163.33
		2	164.4	164.9	163.9	164.40	
		3	158.9	161.5	158.5	159.63	
	16	1	156.7	158.3	159.3	158.10	154.83
		2	157	156.9	156.2	156.70	
		3	148.9	150.4	149.8	149.70	
	17	1	149.7	150.1	149.8	149.87	150.58
		2	150.5	151.4	151.2	151.03	
		3	149.9	151.3	151.3	150.83	
	18	1	142.9	143.5	144	143.47	146.01
		2	144.3	144.6	142.9	143.93	
		3	150.8	150.1	151	150.63	
	19	1	145.8	145.4	145.4	145.53	142.94
		2	142.8	141.1	142.4	142.10	
		3	142.5	140.2	140.9	141.20	
	20	1	149.3	147.8	148.6	148.57	143.88
		2	144.7	142.4	144.7	143.93	
		3	140.2	138.4	138.8	139.13	

ประวัตินักวิจัย

จنگล ศรีธร เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดปทุมธานี ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเมื่อปีพ.ศ. 2542 และจบการศึกษาระดับปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2544 หลังจากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำห้องปฏิบัติการยานยนต์ ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สวทช. และได้รับทุนรัฐบาลไปศึกษาต่อระดับปริญญาเอก ที่ประเทศอังกฤษ ณ University of Nottingham เมื่อปีพ.ศ. 2548 ในสาขา Manufacturing Engineering and Operations Management โดยสำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2552 และกลับมาทำงานในตำแหน่ง นักวิจัย ห้องปฏิบัติการระบบอัตโนมัติและแมคคาทรอนิกส์ที่ MTEC เป็นเวลา 4 ปีก่อนจะย้ายมาเป็น อาจารย์ที่ มทส. เมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2556 จนถึงปัจจุบัน