



การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ของฟันโม่เครื่องโม่ถ่านหิน

Hardfacing of 3.5 % Cr Steel for Coal Crusher

บันเทิง ศรีคะรัน

Buntoeng Srikarun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ของพื้นไม้เครื่องไม้ถ่านหิน
 ผู้เขียน นายบันเทิง ศรีคะรัน
 สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)
กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
กรรมการ
	(ดร.สมใจ จันทร์อุดม)
กรรมการ
	(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นายบัณฑิต ศรีกระรัน)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายบันเทิง ศรีคะรัน)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ของพิน โม่เครื่อง โม่ถ่านหิน
ผู้เขียน	นายบันเทิง ศรีคะรัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานสำหรับพิน โม่ของเครื่องโม่ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยศึกษาระบบวิธีการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมของพิน โม่เครื่องโม่ถ่านหินชนิดโม่เดี่ยวด้วยการเชื่อมพอกแข็งในสภาวะการให้ความร้อนก่อนเชื่อมต่างๆ ซึ่งการวิเคราะห์หลักได้แก่ โครงสร้างมหภาค/จุลภาค การทดสอบความแข็งและการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมรองพินและการเชื่อมพอกแข็ง ในการทดลองจะมีลวดเชื่อม 2 ชนิดคือ ลวดเชื่อมสเตนเลสอสเทนนิคและลวดเชื่อมมาร์เทนซิติก ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นชั้นรองพินและชั้นพอกแข็งตามลำดับ การเชื่อมทั้งหมดมี 15 เงื่อนไข การให้ความร้อนชิ้นงานก่อนเชื่อมที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ประกอบด้วย ไม่อุ่นชิ้นงาน อุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 250 °C 300 °C และ 350 °C ถูกใช้ในการศึกษานี้ ลักษณะของโครงสร้างมหภาค/จุลภาคและผิวที่เกิดการสึกหรอของชิ้นพอกแข็งตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 จากผลการทดลองปรากฏว่า การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขที่ไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและเงื่อนไขที่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมนั้น ไม่พบรอยแตกร้าวหรือจุดบกพร่องให้เห็นในบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนและในบริเวณอื่น เนื้อเชื่อมชั้นพอกแข็งมีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติก ที่มีความแข็งสูงและความต้านทานการสึกหรอที่ดี ความต้านทานการสึกหรอมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอ คือ โครงจุลภาคของชั้นพอกแข็ง ซึ่ง โครงสร้างมาร์เทนซิติกที่สมบูรณ์จะช่วยต้านการกัดสีจากอนุภาคที่มาขัดสีได้ จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การเชื่อมซ่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมของพิน โม่เครื่องโม่ถ่านหิน ควรอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมอย่างน้อย 250 °C จากนั้นเชื่อมชั้นรองพิน 1 ชั้น โดยเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น บริเวณพื้นที่ 1 พื้นที่ 2 พื้นที่ 5 และพื้นที่ 6 ส่วนพื้นที่ 3 และพื้นที่ 4 ใช้การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

Thesis Title	Hardfacing of 3.5 % Cr Steel for Coal Crusher
Author	Mr. Buntoeng Srikarun
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

This research is a study of investigation of proper welding hardfacing for wear protection and life extending of Mae Moh coal crusher using shielded metal arc welding (SMAW) process. This work was study welding procedure of 3.5 % Cr steel, welding hardfacing in different preheating conditions were studied. After hardfacing, macro/micro structure, hardness test and abrasive wear resistance test were studied. The samples were hardfaced with buffer layer and different layers of hardfacing. For 3.5 % Cr steel, austenitic stainless steel and martensitic hardfacing electrodes were selected as buffer and hardfacing, respectively. Fifteen types of welding procedures were investigated. Four different preheatings include without preheating, 250 °C, 300 °C and 350 °C preheating were applied in this study. Characteristic of the macro, microstructure and worn surface deposits was investigated by optical microscope. The hardfacing deposits were also determined by a dry sand rubber wheel machine according to procedure A of the ASTM G65 standard. The results indicated that the multilayer hardfacing with and without preheating revealed no crack or defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and other regions. Hardfacing deposits show martensitic microstructure with high hardness and good abrasive wear resistance. Abrasive wear resistance was higher when three layers were applied. The results showed that the most important variable to improve abrasion resistance is the microstructure of hardfacing deposits, where the fully martensitic act as barriers to abrasive particle cutting. The advice procedure for repair 3.5 % Cr steel of coal crusher is welding by minimum preheating at 250 °C with 1 buffer layer and then welding 2 hardfacing layers at crusher teeth No. 1, 2, 5 and 6. For crusher teeth No. 3 and 4 were welding 3 hardfacing layers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทวิชาความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนบัณฑิตศึกษาและคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาส เมืองจันทร์บุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความแข็ง และขอขอบคุณทีมงานและผู้ทำวิจัย การศึกษารรวิธีเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานสำหรับฟันไม้ของเครื่องไม้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะทุกท่าน ที่ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

บันเทิง ศรีคะรัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(20)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 เป้าหมายของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎี	4
2.1.1 การสึกหรอ	4
2.1.2 การควบคุมการสึกหรอ	9
2.1.3 การเชื่อมพอกแข็ง	10
2.1.4 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง	12
2.1.5 กระบวนการทางความร้อนในการเชื่อม	12
2.1.6 เหล็กกล้าทนการสึกหรอ	23
2.1.7 การทดสอบการสึกหรอ	27
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย	34
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	44
3.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อม	44
3.4 กรรมวิธีการเชื่อม	45
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค	50
3.6 การตรวจสอบค่าความแข็ง	52
3.7 การตรวจสอบการสึกหรอ	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การวิเคราะห์การสึกหรอ	54
4.2 โลหะฐาน	55
4.3 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขไม่เชื่อมชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1H) RT (2H) RT และ (3H) RT]	57
4.4 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1B-1H) RT (1B-2H) RT และ (1B-3H) RT]	62
4.5 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุ่นชิ้นงาน 250 °C [(1B-1H) 250 (1B-2H) 250 และ (1B-3H) 250]	68
4.6 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุ่นชิ้นงาน 300 °C [(1B-1H) 300 (1B-2H) 300 และ (1B-3H) 300]	73
4.7 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุ่นชิ้นงาน 350 °C [(1B-1H) 350 (1B-2H) 350 และ (1B-3H) 350]	81
4.8 ผลการตรวจสอบความแข็ง	86
4.9 ผลการตรวจสอบการสึกหรอ	89
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก	
ก ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของโลหะฐานและลวดเชื่อม	102
ข ผลการทดสอบลักษณะและปริมาณธาตุบริเวณเนื้อเชื่อมและโลหะฐาน	105
ค ค่าความแข็งของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข	131
ง บทความวารสาร	147
ประวัติผู้เขียน	153

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กลุ่มของเหล็กกล้าตามปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า	14
2.2 ตัวอย่างของโลหะฐาน โลหะรองพื้น และโลหะพอกแข็ง	16
2.3 โลหะพอกแข็ง	18
2.4 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม (ในสภาพนอร์มัลไรซิง-อบคลาย)	24
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมโครเมียมต่ำ (% น้ำหนัก)	35
3.2 ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	46
3.3 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	47
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม (% น้ำหนัก)	56
4.2 ผลทดสอบการสึกหรอของการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	90
ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม (% น้ำหนัก)	103
ก.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8556: E 18 8 Mn R 26	103
ก.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555: E 6-UM-60	104
ค.1 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1H) RT	132
ค.2 ค่าความแข็งของการเชื่อม (2H) RT	133
ค.3 ค่าความแข็งของการเชื่อม (3H) RT	134
ค.4 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) RT	134
ค.5 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) RT	136
ค.6 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) RT	137
ค.7 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 250	138
ค.8 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 250	139
ค.9 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 250	140
ค.10 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 300	141
ค.11 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 300	142
ค.12 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 300	143
ค.13 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 350	144
ค.14 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 350	145

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.15 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 350	146

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	เครื่องโม่ถ่านหินที่ใช้งานในเหมืองแม่เมาะ	1
1.2	ฟันโม่เครื่องโม่ถ่านหิน	2
2.1	พื้นฐานการเสียดทาน	4
2.2	การสัมผัสกันโดยตรง 2 วัตถุ	5
2.3	การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง	5
2.4	การเกิดรอยไถ	6
2.5	การเกิดรอยตัด	7
2.6	การเกิดรอยแตก	7
2.7	การสึกหรอแบบครูดของฟัน โม่เครื่องโม่ถ่านหิน	8
2.8	การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	11
2.9	ลักษณะโครงสร้างบริเวณต่างๆของการเชื่อม	12
2.10	ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	13
2.11	เฟสไดอะแกรมของเหล็กกล้าผสม โครเมียม	15
2.12	โครงสร้างแบบออสเทนิติก	16
2.13	เซฟเลอร์ไดอะแกรม	17
2.14	ลักษณะโครงสร้างแบบมาร์เทนซิติก	19
2.15	ความแข็งที่แตกต่างกันของเนื้อเชื่อมแต่ละชั้น	20
2.16	การเจือจางเนื้อเชื่อมของการเชื่อมหลายชั้น	21
2.17	อิทธิพลของการเจือจางจากการเชื่อม	22
2.18	แผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าโครเมียม	24
2.19	ไดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65	27
2.20	กลไกการสึกหรอแบบขัดสี	28
2.21	เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม	29
2.22	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม	30
3.1	เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	34
3.2	เครื่องเชื่อม	35
3.3	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	36

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	แผ่นให้ความร้อนเซรามิก	36
3.5	เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	37
3.6	เครื่องตัดไฟเบอร์	37
3.7	เครื่องทำเรือนชิ้นงานแบบร้อน	38
3.8	เครื่องกัดแนวตั้ง	38
3.9	เครื่องขัดชิ้นงาน	39
3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 4-28 เท่า	40
3.11	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 25-500 เท่า	40
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
3.13	เครื่องทดสอบความแข็ง	41
3.14	อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอ	42
3.15	เครื่องชั่งน้ำหนัก	42
3.16	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	44
3.17	เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	45
3.18	การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม	46
3.19	ตัวทำความร้อนเซรามิกแผ่น	46
3.20	การเชื่อมเงื่อนไขไม่มีชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม	47
3.21	การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม	48
3.22	การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C	48
3.23	การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300 °C	48
3.24	การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 350 °C	49
3.25	ชิ้นงานหลังการเชื่อม	49
3.26	ชิ้นงานหลังการตัด	50
3.27	ชิ้นงานที่ทำเรือนแบบร้อน	50
3.28	การขัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา	51
3.29	การวัดค่าความแข็ง	52
3.30	ชิ้นทดสอบการสึกหรอ	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	โมเดี่ยวที่ผลิตจากเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	54
4.2	รูปแบบการสึกหรอของโมเดี่ยว	55
4.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม กำลังขยาย 500 เท่า	55
4.4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม กำลังขยาย 3000 เท่า	56
4.5	ลักษณะผิวที่สึกหรอของโลหะฐาน	57
4.6	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT	58
4.7	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (2H) RT	59
4.8	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (3H) RT	61
4.9	ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน	61
4.10	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) RT	63
4.11	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) RT	65
4.12	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT	67
4.13	ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับชั้นรองพื้น	68
4.14	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 250	69
4.15	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 250	71
4.16	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 250	73
4.17	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 300	74
4.18	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 300	76
4.19	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 300	78
4.20	โครงสร้างมาร์เทนซิติกของชั้นพอกแข็ง	78
4.21	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม	79
4.22	โครงสร้างมาร์เทนไซด์บริเวณได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	79
4.23	ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับชั้นรองพื้น	80
4.24	ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นรองพื้นแข็งกับโลหะฐาน	80
4.25	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 350	82
4.26	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 350	84
4.27	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 350	86

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.28	กราฟค่าความแข็งแกร่งการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น	87
4.29	กราฟค่าความแข็งแกร่งของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น	87
4.30	กราฟค่าความแข็งแกร่งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น	88
4.31	น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ	91
4.32	ชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอ	92
4.33	ผิวที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้น	92
4.34	ผิวที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมที่มีชั้นรองพื้น	93
5.1	วิธีเชื่อมซ่อมพื้นโม้เครื่องโม้ถ่านหินแบบโม้เดี่ยว	96
ข.1	โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่	106
ข.2	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3	106
ข.3	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3	107
ข.4	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3	107
ข.5	โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2	108
ข.6	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2	108
ข.7	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2	109
ข.8	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2	109
ข.9	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 4 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2	109
ข.10	โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1	110
ข.11	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1	111
ข.12	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1	111
ข.13	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1	112
ข.14	โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น	112
ข.15	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น	113
ข.16	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น	113
ข.17	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น	114
ข.18	โครงสร้างบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	114
ข.19	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	115

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.20	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	115
ข.21	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	116
ข.22	โครงสร้างบริเวณโลหะฐาน	116
ข.23	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของโลหะฐาน	117
ข.24	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของโลหะฐาน	117
ข.25	ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของโลหะฐาน	118
ข.26	การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	118
ข.27	การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	119
ข.28	การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	119
ข.29	การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	119
ข.30	การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	120
ข.31	การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	120
ข.32	การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	120
ข.33	ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน	121
ข.34	การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	121
ข.35	การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	122
ข.36	การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	122
ข.37	การกระจายตัวของซิลิกอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	122
ข.38	การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	123
ข.39	การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	123
ข.40	การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	123
ข.41	การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	124
ข.42	ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	124
ข.43	การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	125
ข.44	การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	125
ข.45	การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	126
ข.46	การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	126

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.47	การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	126
ข.48	การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	127
ข.49	การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	127
ข.50	ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น	127
ข.51	การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	128
ข.52	การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	128
ข.53	การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	128
ข.54	การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	129
ข.55	การกระจายตัวของซิลิกอนบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	129
ข.56	การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	129
ข.57	การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	130
ข.58	การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	130
ข.59	ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน	130
ค.1	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1H) RT	131
ค.2	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (2H) RT	133
ค.3	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (3H) RT	134
ค.4	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) RT	135
ค.5	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) RT	136
ค.6	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) RT	137
ค.7	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 250	138
ค.8	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 250	139
ค.9	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 250	140
ค.10	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 300	141
ค.11	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 300	142
ค.12	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 300	143
ค.13	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 350	144
ค.14	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 350	145

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค.15	กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 350	146

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	Ampere
AC	Alternating Current
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
B	Buffer layer
BM	Base Metal
°C	Degree Celsius
C	Carbon
CE	Carbon Equivalent
Cr	Chromium
DC	Direct Current
DIN	Deutsches Institut Für Normung
H	Hardfacing layer
HAZ	Heat Affected Zone
HB	Hardness (Brinell)
HRC	Hardness (Rockwell scale C)
HV	Hardness (Vickers)
kgf	Kilogram force
MMA	Manual Metal Arc Welding
Mo	Molybdenum
Ni	Nickel
P	Phosphorus
RT	Room Temperature
S	Welding Speed
Si	Silicon
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
V	Volt

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีภารกิจในการส่งผ่านให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะวันละประมาณ 50,000 ตัน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 2,100 MW การผลิตถ่านจำเป็นต้องใช้เครื่องโม่ถ่านหิน (รูปที่ 1.1) เป็นอุปกรณ์ที่ย่อยถ่านหินให้มีขนาดเล็กลง ก่อนที่จะส่งผ่านสายพานไปจัดเก็บเพื่อรอใช้งานต่อไป



รูปที่ 1.1 เครื่องโม่ถ่านหินที่ใช้งานในเหมืองแม่เมาะ

เครื่องโม่ถ่าน (Crusher) ประกอบด้วยฟันโม่ (Crush roll) (รูปที่ 1.2 ก) ทำหน้าที่กระแทกถ่านหินให้แตกออก จนขนาดเล็กลงตามที่กำหนด ซึ่งมีการทำงานต่อเนื่องวันละไม่ต่ำกว่า 15 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อทำงานไปได้ระยะหนึ่ง พบว่ามีกรสิกหรือของฟันโม่ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยลดลง และเมื่อถึงระยะหนึ่งจะไม่สามารถโม่ถ่านหินได้ (รูปที่ 1.2 ข) ปัญหาที่พบในเครื่องโม่โดยส่วนใหญ่เป็นปัญหาเนื่องมาจากการสึกหรอ ซึ่งเกิดจากการที่ผิวและฟันโม่ได้ผ่านการกระทบและเสียดสีกับถ่านหิน โดยผิวโม่และฟันโม่ทำมาจากเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม



(ก)

(ข)

รูปที่ 1.2 ฟันโม่เครื่องโม่ถ่านหิน (ก) ฟันโม่ปกติ (ข) ฟันโม่ที่สึกหรอ

เนื่องจากราคาของชุดโม่ค่อนข้างสูง กรณีที่เกิดการสึกหรอในปัจจุบัน ทำการซ่อมโดยการจ้างซ่อมโดยผู้รับจ้างภายนอก ซึ่งพบปัญหาคือผู้รับจ้างภายนอกไม่เข้าใจถึงพฤติกรรมการสึกหรอที่เพียงพอ โดยที่ผู้รับจ้างภายนอกใช้กรรมวิธีที่ได้จากผู้ผลิตลวดเชื่อมเป็นหลัก ซึ่งจะทำให้การสึกหรอและอายุการใช้งานประสบปัญหาแบบเดิม และทำให้บุคลากรของการไฟฟ้าขาดองค์ความรู้ในการเชื่อมซ่อมเครื่องโม่ อย่างไรก็ตาม เหมือนแม่เมาะมีแผนใช้งานเครื่องโม่อีก 30 ปี หาก กฟผ. มีองค์ความรู้ที่ถูกต้องและเพียงพอ ก็สามารถวางแผนบริหารจัดการงานซ่อมบำรุงรักษาเครื่องโม่ให้มีอายุจนกระทั่งเหมือนหมดอายุ และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง อีกทั้งยังใช้องค์ความรู้นี้ไปใช้แก้ปัญหาหน้างานได้อีกด้วย

จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดแนวคิดในการเติมเนื้อโลหะของฟันโม่ที่สึกหรอหายไป ด้วยกรรมวิธีการเชื่อม โดยใช้ลวดเชื่อม 2 ชนิด คือลวดเชื่อมที่มีความเหนียว ด้านทานการแตกหักเป็นชั้นรองพื้น (Buffer) และใช้ลวดเชื่อมที่มีความแข็ง ด้านทานการสึกหรอเป็นชั้นพอกแข็ง (Hardfacing) การเชื่อมจำเป็นต้องมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheating) เพื่อป้องกันการแตกหลังการเชื่อม สำหรับตัวแปรที่ต้องศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิอุ่นชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม และจำนวนชั้นพอกแข็งที่เหมาะสมกับการสึกหรอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอในการทำงานของฟันโม่ของเครื่องโม่ถ่านหิน และพฤติกรรมการต้านการสึกหรอของเนื้อโลหะพอกแข็งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องโม่ถ่านหิน ลิกไนต์เหมือนแม่เมาะ

1.2.2 เพื่อศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งพื้นไม้ แบบ ไม้เดี่ยว (Single roll) ที่ใช้งานสำหรับเหมืองแม่เมาะ

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติด้านทานการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

1.3 เป้าหมายของการวิจัย

1.3.1 ได้วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม

1.3.2 ได้กรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่ถูกต้องและเหมาะสม

1.3.3 ได้วิธีการและรูปแบบการบำรุงรักษาผิวเชื่อมพอกแข็ง

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ทำให้เข้าใจพฤติกรรมการสึกหรอของพื้นไม้ถ่านหิน

1.4.2 ได้กรรมวิธีและตัวแปรการเชื่อมพอกแข็งพื้นไม้ชนิดไม้เดี่ยว

1.4.3 ได้ข้อมูลการต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็งแบบต่างๆ

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการเชื่อมพอกแข็งเพื่อป้องกันสึกหรอของพื้นไม้ชนิดไม้เดี่ยวของเครื่องไม้ถ่าน เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ตามขั้นตอนการเชื่อม (Welding procedure) ที่กำหนด หลังจากนั้นทำการศึกษาด้านโลหะวิทยาเพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางโครงสร้างมหภาค/จุลภาค (Macro/microstructure) และในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบความแข็ง (Hardness) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance)

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 สืบหาเอกสาร ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.6.2 ออกแบบการทดลอง

1.6.3 จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

1.6.4 ปฏิบัติการทดลองและศึกษาค้นคว้าเอกสารวิจัยเพิ่มเติม

1.6.5 ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล

1.6.6 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง

1.6.7 จัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

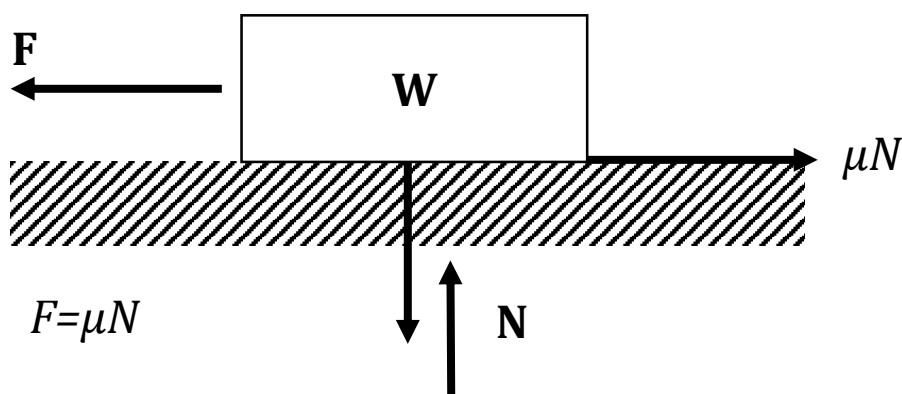
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตมีการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 แบบ คือ โม่เดี่ยว และ โม่คู่ ทำให้พฤติกรรมการสึกหรอแตกต่างกันและในแต่ละส่วนของฟันโม่มีการสึกหรอไม่เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นการเชื่อมเติมเนื้อโลหะเข้าไปก็จะทำให้เกิดการสึกหรอในรูปแบบเดิมอีก แต่หากมีการใช้ความรู้ทางด้านการเชื่อมพอกแข็ง เข้ามาช่วยแก้ปัญหา นี้ ก็จะทำให้สามารถควบคุมการสึกหรอให้เท่ากันทั้งชิ้นส่วน ทำให้สามารถยืดระยะเวลาในการบำรุงรักษา ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของโม่สูงขึ้น

2.1 ทฤษฎี

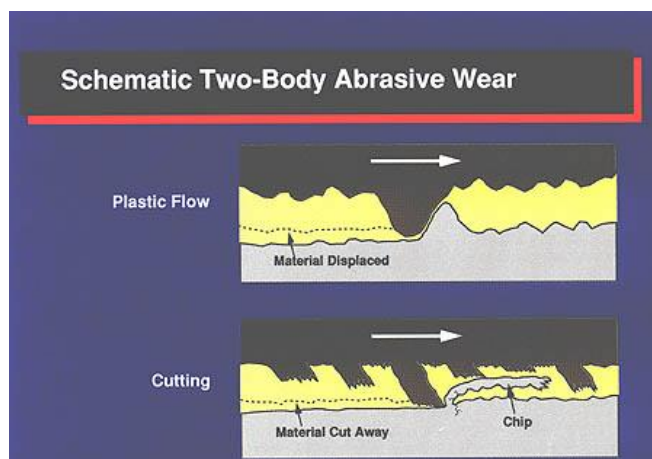
2.1.1 การสึกหรอ (Wear) [1] หมายถึงกลไกการสูญหายของเนื้อวัสดุบริเวณผิว โดยกลไกทางกล (Mechanical mechanism) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสกันของผิววัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พื้นฐานการเสียดทาน [1]

การสัมผัสกันของจำนวนวัสดุกับการสึกหรอ โดยการทำงานของชิ้นส่วนที่สัมผัสกันระหว่าง โลหะกับโลหะหรือ โลหะกับวัสดุอื่นๆ เช่น หิน ทราาย แร่ ถ่านหิน ดิน หรือเศษโลหะ ซึ่งสามารถแยกตามความสัมพันธ์ได้ดังนี้

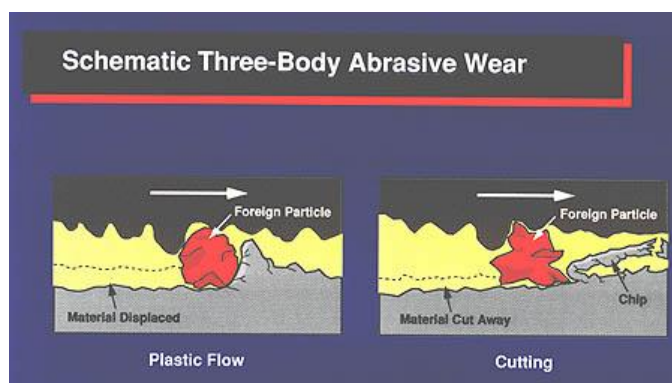
1. การสัมผัส 2 วัตถุ (Two-body) เป็นการสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนกับวัตถุโดยตรง เช่น ทราวยกับราง ทราวยกับพื้นรถตัก โม่กับถ่านหิน หรือหินกับพื้นรถตัก ปู่ก็ ี่ี่เข้ากับราง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสัมผัสกันโดยตรง 2 วัตถุ

(ที่มา: <http://www.stle.org/resources/lubelearn/wear/> สืบค้นเมื่อ 1/11/2556)

2. การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง (Three-body) เป็นการสัมผัสกันของชิ้นงานกับวัตถุ โดยที่ชิ้นงานจะมี 2 ชิ้นและวัตถุจะอยู่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานทั้ง 2 เช่น โม่บดหิน โม่บดถ่าน ซิลที่มีเศษโลหะฝังอยู่กับเพลลา เพลากับร่องลื่นที่มีเศษวัสดุปนอยู่กับ จาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่น แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง

(ที่มา: <http://www.stle.org/resources/lubelearn/wear/> สืบค้นเมื่อ 1/11/2556)

เฟิร์สบอดี (First body) โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงชิ้นส่วนที่สึกหรอจากวัตถุอื่นๆ

เซคันด์บอดี (Second body) หมายถึงวัตถุตัวที่มากระทบ กระแทก เสียขดลีหรือครูดกับเฟิร์สบอดี โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงชิ้นส่วนอีกชิ้นหนึ่ง หิน แร่ ทราย ดิน ฝุ่น

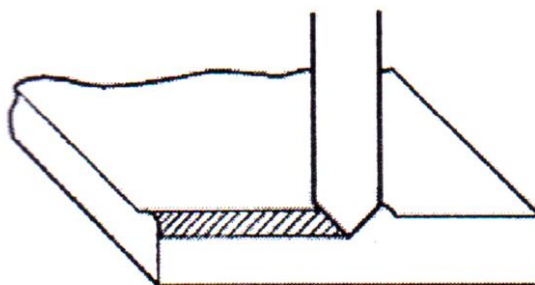
เทิร์ดบอดี (Third body) หมายถึงวัตถุตัวที่ 3 ซึ่งเคลื่อนที่เข้ามาในระบบ อยู่ระหว่างเฟิร์สบอดีและเซคันด์บอดีหรือสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการให้แทรกเข้ามาในระบบ

ชนิดของการสึกหรอ (Type of wear) เนื่องจากการสึกหรอ มีลักษณะแตกต่างกันตามกลไกการเกิด ซึ่งสามารถแบ่งชนิดการสึกหรอได้ดังนี้

1. การสึกหรอแบบเสียดสี (Abrasive wear)
2. การสึกกร่อน (Erosion)
3. การสึกหรอแบบโลหะสัมผัสโลหะ (Metal to metal contact wear)
4. การสึกหรอจากการกระแทก (Impact wear)

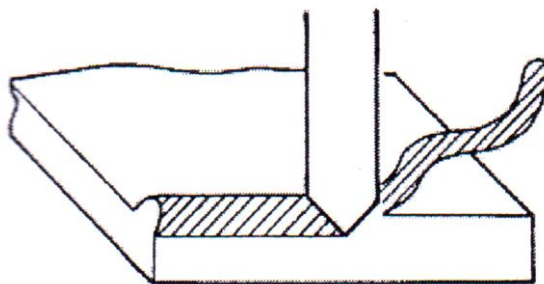
การสึกหรอแบบเสียดสี เป็นการสึกหรอที่เกิดจากวัตถุที่แข็งกว่า (Abrasive particle) เคลื่อนที่แบบไหลผ่านผิวอวัยวะหนึ่ง ภายใต้ภาระ (Load) ทำให้เกิดการขูดขีด ขัดถู ไถ หรือ ไถล เป็นผลให้เนื้อวัสดุหลุดหายเป็นหลุม ร่อง ซึ่งเป็นการชำรุด 55-60 % ของการชำรุดจากการสึกหรอทุกแบบมีกลไกการสึกหรอดังนี้

(1) รอยไถ (Microploughing) เป็นการเกิดร่องที่ผิวจากการเสียดรูปพลาสติก ซึ่งเกิดการไถของวัตถุที่มาเสียดสี แสดงดังรูปที่ 2.4



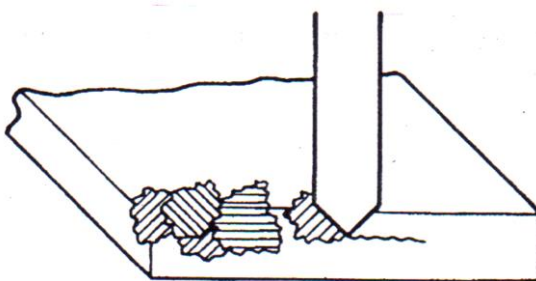
รูปที่ 2.4 การเกิดรอยไถ [1]

(2) รอยตัด (Microcutting) เป็นการเกิดการสูญหายของเนื้อ ซึ่งเกิดร่องจากการตัดหรือขูดขีดเนื้อให้หลุดออกจากขอบของวัตถุที่มีความคม แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดรอยตัด [1]

(3) รอยแตก (Microfracture) เกิดร่องโดยการแตกออกเป็นชิ้นๆ เมื่อเกิดการขูดขีดกับวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดรอยแตก [1]

สมการการสึกหรอจากการเสียดสี แสดงดังสมการที่ 2.1

$$V = K \frac{WL}{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ V = เป็นอัตราปริมาตรการสูญหายของเนื้อวัสดุต่อหน่วยความยาวของการไถล

L = ระยะของการไถล

W = ภาระที่กระทำโดยวัสดุ

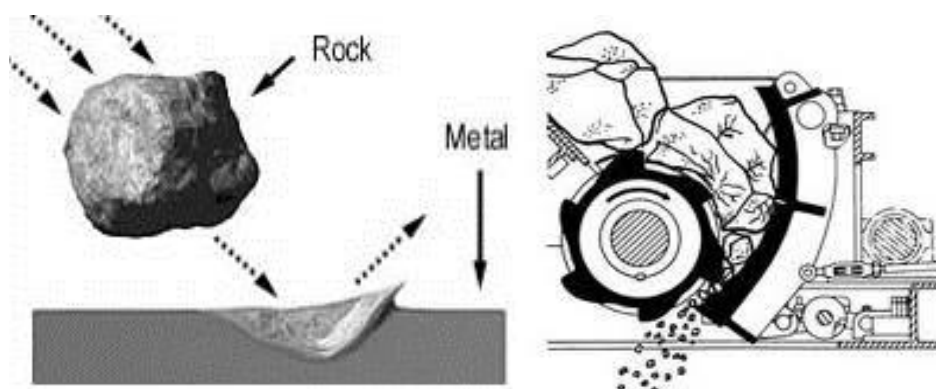
H = ความแข็งของผิววัสดุ

K = สัมประสิทธิ์การสึกหรอ (Wear coefficient)

ชนิดของการสึกหรอแบบเสียดสี สามารถแบ่งได้ดังนี้

- ก. การสึกหรอแบบครูด (Gouging abrasion)
- ข. การเสียดสีความเค้นต่ำ (Low stress abrasion)
- ค. การเสียดสีความเค้นสูง (High stress abrasion)

การสึกหรอแบบครูด เป็นการสัมผัส 2 วัตถุ เกิดจากมุม ขอบ หรือคมของวัสดุ (ค่อนข้างใหญ่) ที่แข็งกว่าเคลื่อนที่ครูด ขีด บนผิวของชิ้นงาน ด้วยภาระที่สูงทำให้จุดที่เกิดการขีดขีดมีความเค้นสูง เช่น ฟันขูด ฟันบด ฟันโม้ และหัวเจาะ เป็นต้น กรณีการสึกหรอของฟัน โม้เหมืองแม่เมาะ เกิดการสึกหรออยู่ในกลุ่มของการเสียดสีแบบครูด แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การสึกหรอแบบครูดของฟัน โม้เครื่องโม่ถ่านหิน [1]

การเสียดสีความเค้นต่ำ เกิดจากวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุและมุมหรือขอบ คม ของวัตถุค่อยๆ ขูด ขีด ให้เนื้อวัสดุค่อยๆ หลุดหายอย่างช้าๆ อัตราการสูญเสียเนื้อขึ้นอยู่กับ อัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นกับแรงต่งแร่ กระบะรถบรรทุก ปุ้งกี้อัดกัทรายเล็ก ปุ้งดูดทราย และท่อลำเลียงทราย เป็นต้น

การเสียดสีความเค้นสูง

การสัมผัส 2 วัตถุ เกิดจากมุม ขอบ หรือคมของวัสดุ ขนาดเล็กๆ ที่แข็งกว่าเคลื่อนที่ ครูด ขีด ไถ บนผิวของชิ้นงานด้วยความเค้นกด เช่น ผนังปั๊นท์ ใบบิดตัน ไบกวาด เป็นต้น

การสัมผัสที่มีตัวคั่น ระหว่างกลาง เกิดจากเซคันด์บอดีเกาะเกี่ยวและพาวัตถุขนาดเล็กๆ (เดิร์คบอดี) เช่น ฝุ่น เม็ดทราย และผงโลหะ เป็นต้น ที่มีขนาดโตกว่าช่องว่าง (Clearance) ของ

ชั้นส่วนที่ออกแบบไว้ หรือโตกว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น (Lubrication film thickness) วัสดุแลกเปลี่ยนเหล่านั้น เคลื่อนที่ในการทำงานระหว่างการลื่นไถลของผิว ทำให้เกิดการ ขูด ขีด ครูด กับเฟิร์สพอดี้ภายใต้ความเค้นสูง จะทำให้เกิดความเค้นเฉพาะจุด สูงมากพอที่จะทำให้ เกิดการแตกหลุดเฉพาะจุดโดยเฉพาะวัสดุที่เปราะ เช่น บริเวณร่องซี่ล บริเวณ โอรัง บุษกับเพลลา ลูกสูบกับเสื่อสูบ หรือการทำงานแบบ โมบด เช่น เครื่องบดบอลมิลล์ และเครื่องบดแบบแฮมเมอร์มิลล์

2.1.2 การควบคุมการสึกหรอ (Wear control)

ตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้อัตราการสึกหรอสูงคือ แรงที่กระทำบนเนื้อวัสดุและความแข็งของเนื้อวัสดุ [1]

แรงที่กระทำต่อวัสดุ เป็นตัวแปรที่คุมได้ยากมากเพราะขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องจักร

ความแข็งของวัสดุ เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุม ปรับปรุง เปลี่ยนแปลงและเป็นจุดสำคัญที่กระบวนการเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นส่วนถูกนำมาเป็นเครื่องมือในการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงาน ในการปรับปรุงความแข็งของผิวให้มีความแข็งแรงสูง เพื่อให้ทนต่อการสึกหรอ สามารถทำได้หลายวิธี เรียกว่ากรรมวิธีเพิ่มความแข็งของผิววัสดุ (Surface treatment and coating for wear control) สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment process)
2. การเคลือบผิว (Surface coating)
3. กระบวนการเชื่อม (Welding process)

กระบวนการเชื่อม (Welding process) ใช้กระบวนการเชื่อมเพื่อซ่อมผิว ที่เกิดการชำรุดจากการสึกหรอหรือเพื่อป้องกันการสึกหรอ โดยการเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับลักษณะการชำรุด การสึกหรอและการกัดกร่อน สำหรับลวดเชื่อมพอกแข็ง มีความแข็งตั้งแต่ 250-400 HB (45-65 HRC) คุณสมบัติที่เด่นของการเชื่อม คือ

1. สามารถเลือกใช้การเชื่อมได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมมิก/แมก การเชื่อมทิก การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ และการเชื่อมใต้ฟลักซ์
2. ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องใช้เทคนิคขั้นสูงมาก สามารถทำที่หน้างานได้
3. ค่าใช้จ่ายการเชื่อมพอกแข็งถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่นๆ
4. สามารถทำซ้ำได้เมื่อชิ้นงานเดิมสึกหรอ
5. ลวดเชื่อมมีหลายชนิด สามารถเลือกให้เหมาะสมกับงานได้หลากหลาย

6. มีความแข็งแรง (Strength) ของผิวมากกว่ากรรมวิธีอื่นๆ
7. สามารถสร้างชั้นเชื่อมให้มีความหนาหลายๆได้

2.1.3 การเชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing)

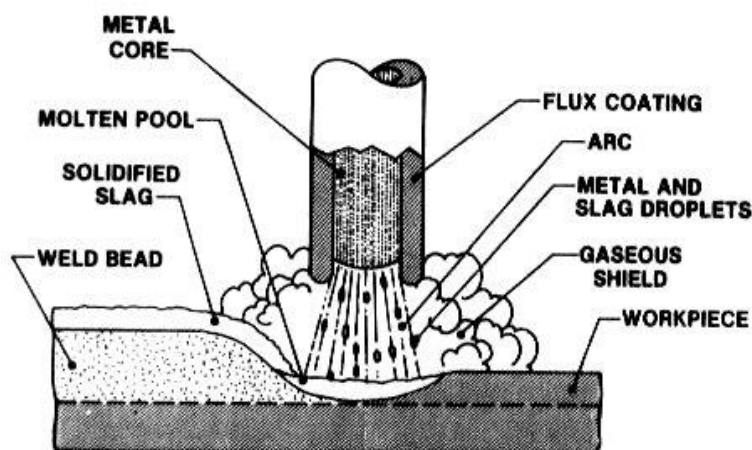
การเชื่อมพอกแข็ง คือ การประยุกต์ใช้วิธีการเชื่อมวัสดุที่มีความแข็งสูง ทนทานต่อการสึกหรอ ลงบนชิ้นส่วนที่ต้องการ เพื่อให้ชิ้นส่วนดังกล่าวมีความต้านทานต่อการสูญเสียเนื้อโดยที่เนื้อโลหะของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเดิมไม่เกิดการสึกหรอ จากผลของการทำงานที่ทำให้เกิดการสึกหรอ เช่น การสึกหรอจากการเสียดสี การสึกหรอแบบเชื่อมติด การสึกหรอจากการกระแทก [2]

วัตถุประสงค์ของการเชื่อมพอกแข็ง

1. เพื่อให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการสึกหรอ
2. เพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
3. เพื่อทำให้เป็นบริเวณที่สึกหรอ ซึ่งยอมให้บริเวณดังกล่าวสึกหรอแทนบริเวณที่สำคัญที่ไม่ต้องการให้สึกหรอ
4. ทำให้ชิ้นส่วนมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับขนาดเดิมมากที่สุด
5. รักษาชิ้นส่วนที่สำคัญของระบบไว้เพื่อให้ระบบใหญ่คงสภาพอยู่ได้
6. สามารถซ่อม บำรุงรักษาชิ้นส่วนที่สึกหรอได้ง่าย ทำได้ที่หน้างาน
7. ทำให้ประสิทธิภาพของระบบในเชิงการผลิต คู่แข่งทางเศรษฐศาสตร์

การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Manual Metal Arc Welding, MMA หรือ Shielded Metal Arc Welding, SMAW) เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลาย ลวดเชื่อมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแกนโลหะ (Core) หุ้มด้วยสารพอกหุ้ม (Coating) ขนาดความโตของลวดเชื่อมจะวัดตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะ การเชื่อมจะเริ่มขึ้นด้วยการจุดอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ความร้อนที่ได้จากการอาร์คก็จะทำให้โลหะและลวดเชื่อมหลอมละลาย นอกจากนี้สารพอกหุ้มก็จะทำให้เกิดสแลก (Slag) ปกคลุมแนวเชื่อม

การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (รูปที่ 2.8) เหมาะกับงานทั่วไปเช่น งานสร้างประกอบ หรืองานติดตั้ง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานภาคสนาม อย่างไรก็ตามการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะเชื่อมได้ช้าเพราะต้องเสียเวลาเปลี่ยนลวดเชื่อมและเคาะสแลกออก [3]



รูปที่ 2.8 การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [3]

แหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับการเชื่อมเช่น การเชื่อมอาร์ค ความร้อนจะถูกส่งถ่ายจากตัวให้ความร้อน (Heat source) ไปยังผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นความร้อนก็จะเข้าสู่ชิ้นงาน ดังนั้นพลังงานที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Energy input) คือปริมาณของพลังงานความร้อนที่กระทำกับชิ้นงาน หรือวัสดุต่อความยาวแนวเชื่อม

ความร้อนเข้า (Heat Input)

ร้อนเข้ามีความสำคัญมาก จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของเนื้อเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีสมการการหาความร้อนเข้า [3] แสดงดังสมการที่ 2.2

$$H = \frac{E I 60}{1000V} f_1 \quad (2.2)$$

เมื่อ H = ความร้อนเข้า (kJ/mm)

E = แรงดัน (Volt)

I = กระแส (Ampere)

V = ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)

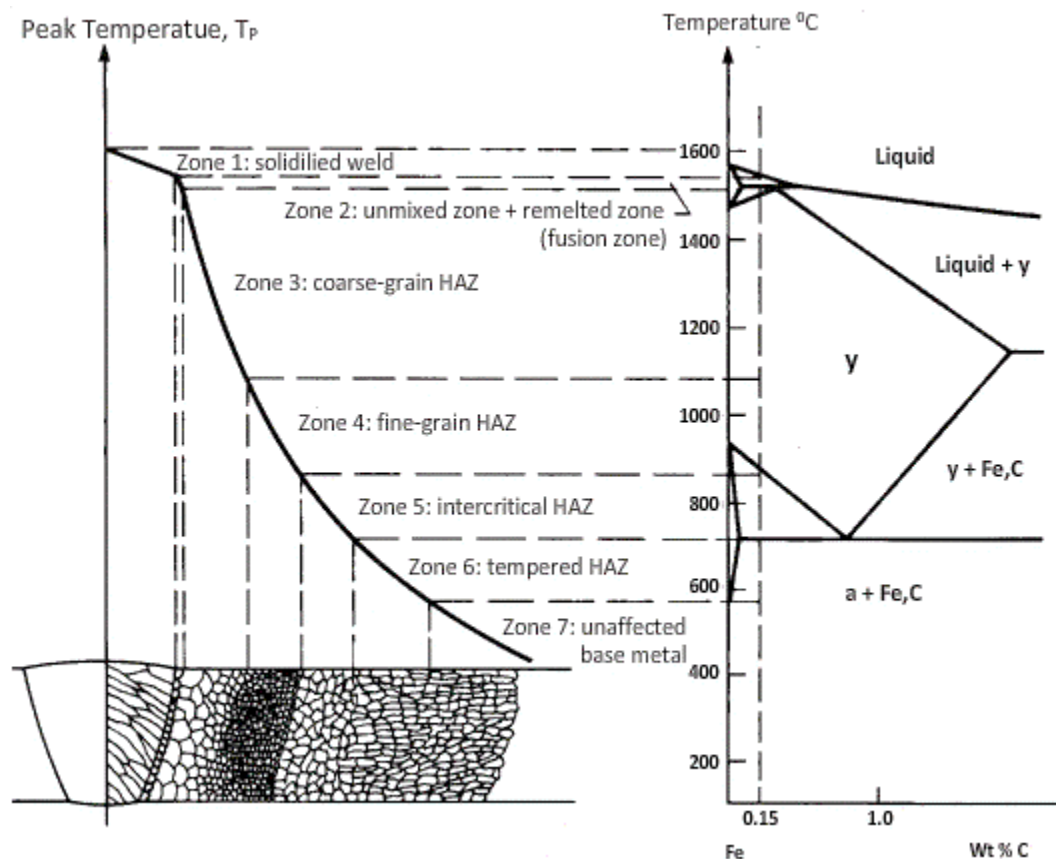
f_1 = ประสิทธิภาพ (*Efficiency)

*MMA: 0.75

2.1.4 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง

2.1.4.1 โลหะวิทยาแนวเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมเกิดการหลอมละลายที่บริเวณแถบหลอมละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิสูง 1600 °C บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) จะมีอุณหภูมิ 1100-1500 °C ทำให้โครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นอยู่ (รูปที่ 2.9) เช่น เทมเปอ์มาเทนไซต์ เฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ (Pearlite and ferrite) เบนไนต์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ที่ขนาดของเกรนโตขึ้น (Grain growth) ความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็ว ทำให้เปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ (Martensite) หรือเบนไนต์ (Bainite) แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสมบัติทางกลของโครงสร้างทางจุลภาคดังกล่าวมีสมบัติแตกต่างกันเช่น ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงประลัยดึง ความเหนียว ความแข็ง การต่อต้านการล้าและความแข็งสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณผลกระทบจากความร้อน [4]



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างบริเวณต่างๆของการเชื่อม [4]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (ก) มาร์เทนไซต์ (ข) เบนไนต์ [5]

ในกรณีที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ (HV_M) และเบนไนต์ (HV_B) ซึ่ง Bailey [3] ได้แสดงในรูปของความสัมพันธ์ของความแข็งสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ดังนี้

$$HV_M = 802C + 305 \quad (2.3)$$

$$HV_B = 350 \left(C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \right) + 101 \quad (2.4)$$

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกร้าวขณะเชื่อม ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า ซึ่งจะเป็นตัวแสดงความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ของวัสดุและแสดงความสามารถในการชุบแข็งของวัสดุ (Hardenability) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนและหลังเชื่อม สถาบันการเชื่อมระหว่างประเทศ (The International Institute of Welding) ได้กำหนดสมการปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าจากส่วนผสมทางเคมีไว้ดังนี้

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \quad (2.5)$$

เหล็กกล้าที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่าต่ำจะให้ความสามารถในการเชื่อมดี เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กน้อยกว่า 0.45 % การแตกร้าวจากการเชื่อมจะไม่เกิดขึ้นและไม่ต้องการกระบวนการทางความร้อน เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.45-0.60 % อาจเกิดรอยแตกและต้องการความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 100-300 °C แต่เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กกล้าสูงกว่า 0.80 % มีโอกาสจะเกิดรอยแตกและต้องการความร้อนก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม ดังนั้นเมื่อปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมเท่ากับ 1.24 ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่เชื่อมยากมาก จากปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) สามารถกำหนดอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานได้ดังต่อไปนี้

1. คาร์บอนเทียบเท่าต่ำกว่า 0.45 อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 100 °C
2. คาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.45-0.60 อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 100-250 °C
3. คาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.6-0.8 อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250-300 °C
4. คาร์บอนเทียบเท่ามากกว่า 0.8 อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300-350 °C

ตารางที่ 2.1 กลุ่มของเหล็กกล้าตามปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า [6]

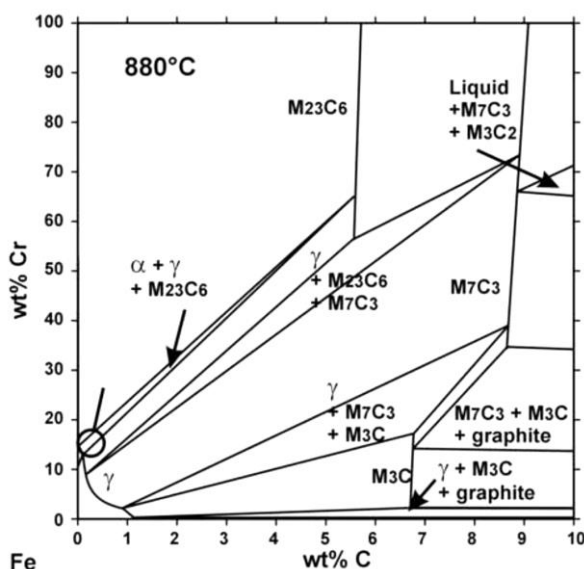
กลุ่มที่	ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า	ความยากในการเชื่อม
1	<0.30	ง่ายมาก
2	0.30-0.35	↓
3	0.35-0.40	
4	0.40-0.45	
5	0.45-0.50	
6	0.50-0.55	
7	0.55-0.60	
8	0.60-0.65	
9	0.65-0.70	
10	0.70-0.75	
11	0.75-0.80	
12	>0.80	ยากมาก

2.1.4.2 โลหะวิทยาเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็งมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของเฟสที่ให้ความแข็ง รูปร่างของเฟสที่ให้ความแข็ง การกระจายตัวของเฟสที่ให้

ความแข็ง (Hardness) ความแกร่ง (Toughness) และสมบัติความต้านทานการเปลี่ยนรูป (Strain hardening) ของโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) เป็นต้น

กระบวนการเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมพอกแข็งมีหลายกระบวนการด้วยกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมมิก/แมก การเชื่อมทิก การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ และการเชื่อมใต้ฟลักซ์ ซึ่งแต่ละกระบวนการมีจุดจุดด้อยต่างกันไป การเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ประสิทธิภาพการเชื่อม (Welding efficiency) การเงาของเนื้อเชื่อมและรากลวดเชื่อม โดยที่ปริมาณคาร์บอนและปริมาณ โครเมียมในลวดเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งของรอยเชื่อม ลวดเชื่อม โครเมียมสูง (Cr-rich electrode) เป็นลวดเชื่อมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีราคาไม่สูงมาก โดยคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเชื่อมจะช่วยเพิ่มสมบัติการทนการสึกหรอ ชนิดของคาร์ไบด์ก็มีผลต่อสมบัติการทนการสึกหรอ หากลวดเชื่อมมีส่วนผสมของทั้งสแตน, โมลิบดีนัม และวานาเดียม ก็จะช่วยเพิ่มสมบัติทนการสึกหรอ นอกจากนี้ คาร์ไบด์ชนิด (M_7C_3) ก็ช่วยป้องกันการเกิดการสึกหรอได้ดี [7]



รูปที่ 2.11 เฟสไดอะแกรมของเหล็กกล้าผสมโครเมียม

(ที่มา: www.springer.com/cda/9783540209638-c1.pdf สืบค้นเมื่อ 13/7/2558)

การสึกหรอแบบเสียดสีหรือขัดถูเนื่องจากความเค้นต่ำ สามารถใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กโครเมียม (Fe-Cr-C) ได้ เนื่องจากมีความแข็งสูง แต่ในกรณีที่รับความเค้นสูง หรือรับแรงกระทำด้วย ลวดเชื่อมชนิดเหล็กโครเมียมจะมีสมบัติเปราะ ซึ่งจะทำให้ผิวเชื่อมแตก สมบัติทนการ

สึกหรอที่รับความเค้นสูง จึงไม่สามารถใช้เฉพาะสมบัติความแข็งของผิวเชื่อมได้ ผิวเชื่อมจะต้องมีโครงสร้างหลักที่เหนียว และมีเฟสที่มีความแข็งสูงแทรกอยู่ เช่น ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเป็นคาร์ไบด์ (Primary carbide) แทรกอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์-คาร์ไบด์ ยูเทคติก เป็นต้น [8]

2.1.4.3 การเลือกลวดเชื่อม

การเลือกสมบัติของลวดเชื่อมรองพื้น

ชั้นรองพื้นทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างโลหะ 2 ชนิดให้ยึดติดกัน การเชื่อมรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกแข็งจึงมีความจำเป็น เช่น ในกรณีที่เนื้อโลหะฐานและชั้นพอกผิวแข็งมีสมบัติที่แตกต่างกันมาก อาจส่งผลทำให้เกิดการแตกหรือการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างชั้นเนื้อโลหะฐานและชั้นพอกแข็ง ดังนั้นจึงต้องมีชั้นระหว่างกลางเพื่อช่วยแก้ปัญหาข้างต้น หลักการการเลือกลวดเชื่อมรองพื้น โดยได้ศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ เช่นงานวิจัย [9] สรุปได้ว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าโครเมียม ลวดเชื่อมรองพื้นที่แนะนำ เช่น เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนไนต์ (Cr-Ni stainless steel) แสดงในตารางที่ 2.2 และลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของโลหะฐาน โลหะรองพื้นและโลหะพอกแข็ง [9]

Type of base metal	Type of underlying filler metal	Type of hardfacing filler metal
Carbon steel	Low-hydrogen mild-steel type	Higher-hardness pearlitic type
Low-alloy steel	Lower-hardness pearlitic type	Martensitic type
	Cr-Ni stainless steel type	High-Mn austenitic type
	Low-C, 16Mn-16Cr type	High-Cr iron type
High-Mn steel	Cr-Ni stainless steel type	13%Mn type
	Low-C, 16Mn-16Cr type	Martensitic type



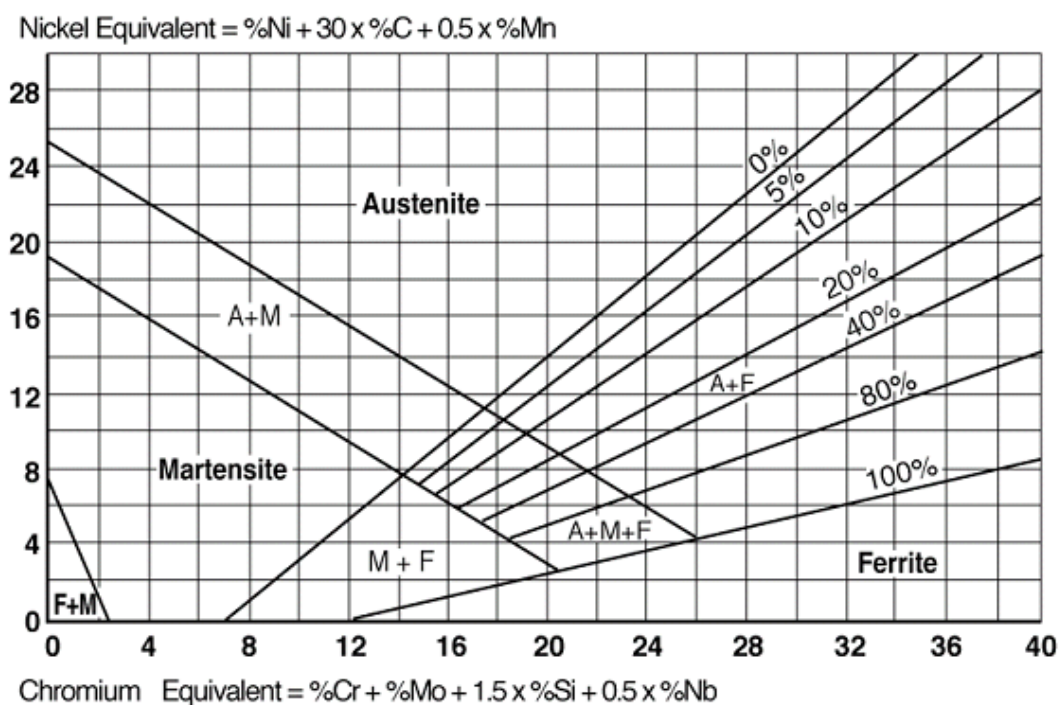
Austenitic type

50 μ

รูปที่ 2.12 โครงสร้างแบบออสเทนนิค [9]

นอกจากนี้ เอกสารอ้างอิงจาก [10] ได้สรุปว่าลวดเชื่อมในตระกูล E 18 8 Mn R26 มีความเหมาะสมใช้เป็นลวดเชื่อมรองพื้น เนื่องจากให้สมบัติที่เหนียวแกร่งระหว่างชั้นเชื่อมสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง นอกจากนี้ยังต้านทานการแตก (Crack resistance) ที่ดีมาก ดังนั้นผลจากการวิจัยและคำแนะนำของผู้ผลิตสามารถสรุปวิธีการตัดสินใจในการเลือกชนิดของลวดเชื่อมรองพื้นได้ดังนี้

1. ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคเดิมของโลหะฐาน
2. ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของลวดเชื่อมรองพื้น
3. การเข้ากันได้ของโครงสร้างจุลภาคทั้งโลหะฐานและชั้นรองพื้น ซึ่งเมื่อเชื่อมแล้วโครงสร้างที่ได้ของชั้นรองพื้นต้องไม่เกิดการแตกเย็น (Cold cracking) ตามโครงสร้างในเซฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler's diagram) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เซฟเลอร์ไดอะแกรม [11]

4. สมบัติของชั้นรองพื้นต้องสามารถทนต่อการกระแทกที่ชั้นพอกแข็งได้ โดยไม่มีการแตกร้าวขณะใช้งาน

5. โลหะชั้นรองพื้นต้องมีสมบัติด้านทานการเปลี่ยนรูปแบบเปราะ (Fracture toughness) และมีความเหนียว (Ductility) สูงที่จะสามารถหยุดรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวพอกแข็ง (ไม่ให้ขยายตัวไปที่โลหะฐานได้)

6. ซึ่งจากเอกสารงานวิจัยต่างๆ แนะนำให้เลือกใช้ลวดเชื่อมออสเทนิติกที่สมบูรณ์ (Fully austenitic) ก่อนเป็นอันดับแรก

การเลือกสมบัติของลวดเชื่อมพอกแข็ง

การเลือกใช้ลวดพอกแข็งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานแสดงในตารางที่ 2.3 อย่างไรก็ตามการเชื่อมพอกแข็งไม่ควรจะเกิน 2-3 ชั้น เพราะจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำอาจเป็นสาเหตุให้ชั้นพอกแข็งหลุดร่อนแตกได้ จากเหตุผลดังกล่าวควรเชื่อมชั้นรองพื้นด้วยโลหะที่มีความแข็งที่น้อยกว่าชั้นพอกแข็ง [11]

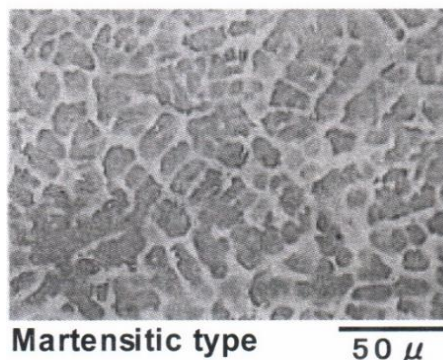
ตารางที่ 2.3 โลหะพอกแข็ง [11]

ชนิดของโลหะพอกแข็ง	คุณสมบัติ	การนำไปใช้งาน
เหล็กกล้าผสมต่ำและคาร์บอนต่ำ	เหนียวทน	สร้างเนื้อ/ทนต่อการสึกหรอ
เหล็กกล้าผสม 14 % แมงกานีส	เหนียวทนและสามารถเพิ่มความแข็งได้	ทนต่อแรงกระแทก
มาร์เทนซิติค	เหนียวทนและแข็ง	ทนต่อแรงกระแทกและการขัดถู
โครเมียมคาร์ไบด์ ทั้งสะเตนคาร์ไบด์	แข็งและเปราะ	ทนต่อการขัดถู
โคบอลต์และนิกเกิล	แข็งที่อุณหภูมิสูง	เหล็กกล้าเครื่องมือ ทนต่อการกัดกร่อน งานที่อุณหภูมิสูง

หลักการเลือกลวดเชื่อมพอกแข็ง โดยทั่วไปลวดเชื่อมพอกแข็งสามารถแบ่งกลุ่มดังตัวอย่างพอสังเขป เช่น

ก. มาร์เทนซิติค เหนียวทนและแข็ง ทนต่อแรงกระแทกและการขัดถู ลวดเชื่อมในกลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมที่เพียงพอที่ทำให้โครงสร้างผิวพอกแข็งเป็นมาร์เทนซิติคในสภาพภายหลังการเชื่อมที่เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.14 โครงสร้างมาร์เทนซิติคให้ค่าความ

แข็งที่สูง สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี แต่ในทางกลับกัน โลหะชนิดนี้ทนต่อแรงกระแทกได้ไม่ดี ดันักเพราะมีความเหนียวต่ำ [11]



รูปที่ 2.14 ลักษณะ โครงสร้างแบบมาร์เทนซิติค [11]

ข. กลุ่มโครเมียมคาร์ไบด์มีสมบัติแข็งและเปราะทนต่อการขัดถูได้ดี มีการแบ่งลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 [12] ตามลักษณะกลุ่มโลหะผสม ยกตัวอย่างบางกลุ่มเช่น

โลหะผสมกลุ่ม 6 (Alloy group 6) มีธาตุผสมมากกว่า 5 % โครเมียม และมีคาร์บอนสูง (ประมาณ 0.2 ถึง 2.0%) ความแข็งมีค่ามากกว่า 500 HB เนื้อเชื่อมจะเกิดการแข็งจากการเย็นตัวในอากาศ (Air-hardening) กลุ่มนี้ใกล้เคียงกับ (หรือเป็นกลุ่มเดียวกัน) กลุ่มมาร์เทนซิติคผสมต่ำคาร์บอนสูง (Low alloy, high carbon-martensitic) ซึ่งมีความเหมาะสมกับการขัดถูผสมกับการกระแทก

โลหะผสมกลุ่ม 7 (Alloy group 7) มีส่วนผสมแมงกานีสประมาณ 11-18 % เนื้อเชื่อมพอกแข็งมีความเหมาะสมกับชิ้นส่วนที่สามารถเพิ่มความแข็ง (Work hardening) โดยแรงกระแทกหรือถูหุบ ค่าความแข็งสามารถขึ้นไปได้จาก 180 HB จนถึง 550 HB เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื้อเชื่อมไม่มีความเหมาะสมกับภาวะที่เกิดการขัดถูอย่างเดียว

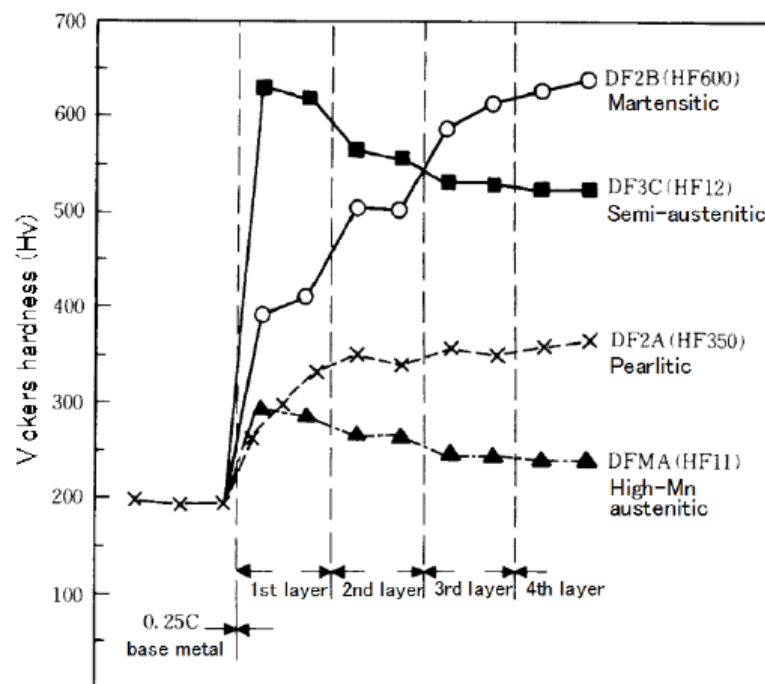
โลหะผสมกลุ่ม 10 (Alloy group 10) เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของคาร์บอน 2-7 % และมีส่วนผสมของโครเมียมจนถึงประมาณ 40 % ดังนั้นเนื้อเชื่อมจึงมีโครเมียมคาร์ไบด์ฝังอยู่ในเนื้อของเหล็กออสเทนนิค เนื้อเชื่อมในกลุ่มนี้มีความสามารถในการทนการขัดถูได้ดีมาก

จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอจะสรุปวิธีการตัดสินใจได้ดังนี้

- (1) ลักษณะการทำงานของชิ้นส่วน
- (2) ลักษณะการสึกหรอ
- (3) ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อลวดเชื่อม
- (4) ความแข็งที่ได้หลังจากการเชื่อม
- (5) การเข้ากันได้ของโครงสร้างเนื้อพอกแข็ง และโครงสร้างของชิ้นสร้างเนื้อ

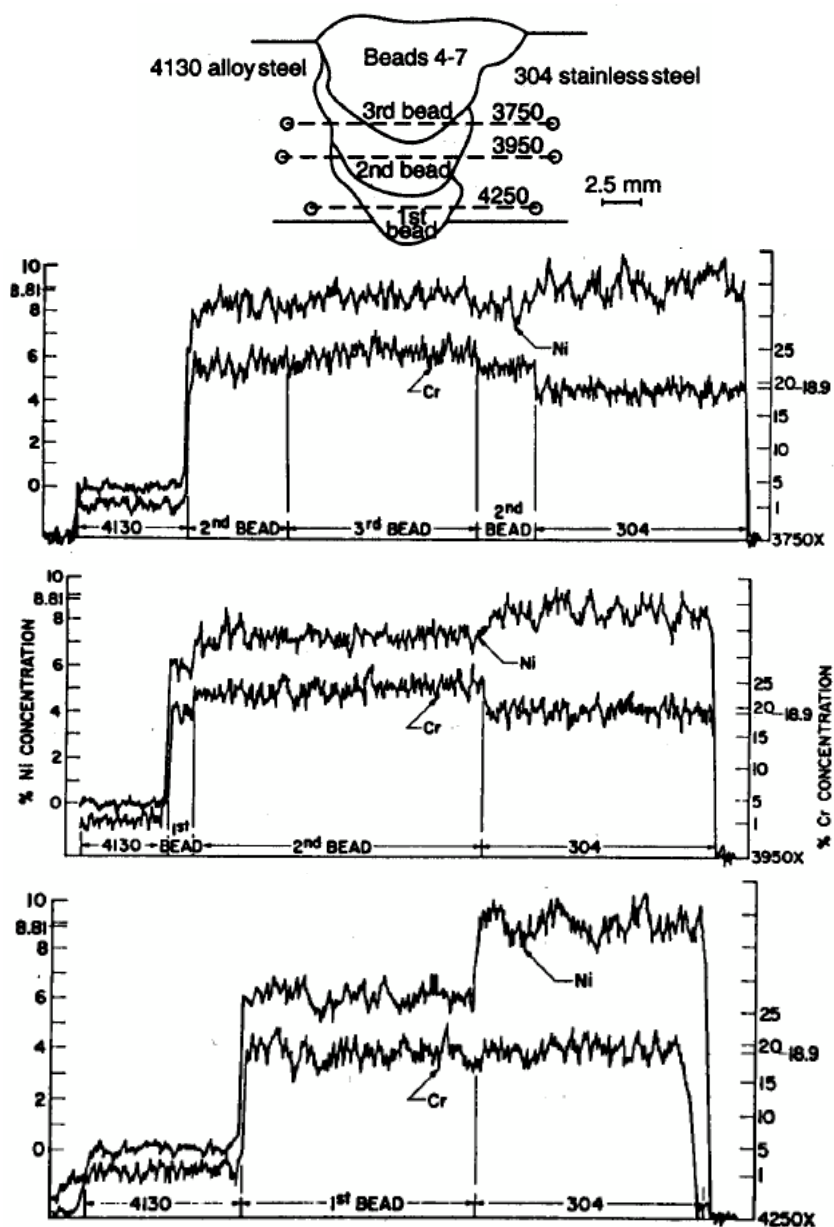
2.1.4.4 การเจือจางของเนื้อเชื่อม (Dilution)

ในกระบวนการเชื่อมที่มีการหลอมละลายรวมกันของเนื้อโลหะเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม พบว่าสมบัติของเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากที่ทางผู้ผลิตกำหนดมา ทั้งนี้เกิดจากการหลอมละลายผสมกันระหว่างเนื้อลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม ซึ่งสมบัติที่ได้ใหม่จะแตกต่างจากลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเดิมทั้งส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล (รูปที่ 2.15) การเจือจางของเนื้อเชื่อมเป็นผลกระทบสำคัญที่จะลดสมบัติการทนการสึกหรอของผิวเชื่อมในชั้นแรก เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของผิวเชื่อมเปลี่ยนไป ดังนั้นจำนวนชั้นของผิวเชื่อมก็จะช่วยลดปัญหาการเจือจางของเนื้อเชื่อมของผิวเชื่อมได้ [4]



รูปที่ 2.15 ความแข็งที่แตกต่างกันของเนื้อเชื่อมแต่ละชั้น [11]

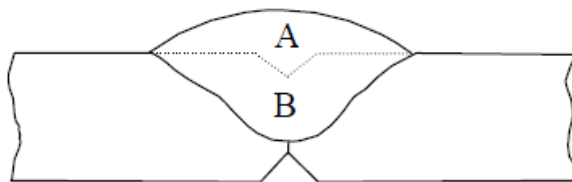
การเชื่อมหลายชั้น (Multiple-pass welds) ระหว่างโลหะที่แตกต่างกัน ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาเชื่อมติดกันรวมถึงชนิดของลวดเชื่อมเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับ การเงาของเนื้อเชื่อม ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 2.16 เมื่อเนื้อเชื่อมชั้นที่ 2 มีส่วนประกอบทางเคมีที่ไม่เหมือนกันกับเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 เนื่องจากเกิดการผสมกันของธาตุจากโลหะที่แตกต่างกันตอนที่เกิดบ่อหลอม และส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมในแต่ละชั้นแตกต่างกัน [13]



รูปที่ 2.16 การเงาเนื้อเชื่อมของการเชื่อมหลายชั้น [13]

การเงิอจางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีบริเวณที่เกิดการหลอมละลายรวมกัน การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเงิอจาง (% Dilution) แสดงดังสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.17

$$\% \text{ Dilution} = \frac{\text{Surface (B)}}{\text{Surface (A + B)}} \times 100 \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.17 อิทธิพลของการเงิอจางจากการเชื่อม [14]

2.1.5 กระบวนการทางความร้อนในการเชื่อม

จากเหตุผลของความสามารถในการชุบแข็งและความสามารถในการเชื่อม เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าว ได้มีการใช้กระบวนการทางความร้อนเข้าช่วย เช่น การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat) และการให้ความร้อนหลังเชื่อม (Post weld heat treatment)

1.2.5.1 การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดมาร์เทนไซต์ที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนซึ่งจะเสี่ยงต่อการแตกร้าวและเพื่อให้เหล็กมีการขยายตัว ลดการบิดงอ (Distortion) และความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่จะเกิดขึ้น เหล็กที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่า น้อยกว่า 0.2 ไม่จำเป็นต้องอุ่นและยังทำให้เหล็กเย็นช้าลง

(1) อุณหภูมิที่ต้องอุ่นต้องสูงกว่าอุณหภูมิที่เหล็กเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ประมาณ 10 °C โดยต้องรู้อุณหภูมิของเหล็กกล้าที่จะเชื่อม ซึ่งหาได้จากแผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลา (The Isothermal Transformation) หรือแผนภาพ TTT ของเหล็กกล้า

(2) ในการเลือกใช้วิธีในข้อ (1) ยังไม่เพียงพอสำหรับเหล็กหลายๆชนิด และบางชนิดไม่สามารถหาแผนภาพ TTT ได้ จึงได้มีการศึกษาและทดลองวิจัย โดยนำค่าความสามารถในการชุบแข็งและค่าคาร์บอนเทียบเท่ามาเป็นตัวแปรและยังคำนึงถึงความหนาของวัสดุด้วย เนื่องจากจะเป็นตัวเก็บและถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงาน

(3) มาตรฐานการเชื่อม เช่น AWS D1.1 Structural Welding Code Steels ซึ่งได้กำหนดค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนไว้ โดยการควบคุมอุณหภูมิที่จะไม่ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนแข็งจนเป็นอันตราย (Critical hardness)

1.2.5.2 การให้ความร้อนขณะเชื่อมเพื่อรักษาอุณหภูมิ (Interpass temperature)

เป็นการให้ความร้อนขณะเชื่อมเพื่อไม่ให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์และไม่เกินอุณหภูมิตอบคืนตัว

1.2.5.3 การให้ความร้อนหลังเชื่อม คือการให้ความร้อนหลังเชื่อม โดยมี

วัตถุประสงค์ คือลดความเค้นตกค้าง ลดความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ป้องกันไฮโดรเจน และเพิ่มความเหนียวให้เนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

2.1.6 เหล็กกล้าทนการสึกหรอ (Wear resistance steels)

โดยทั่วไปเหล็กที่มีความแข็งสูง ทนการสึกหรอ มักจะทนต่อแรงกระแทกได้น้อย ลักษณะงานบางอย่าง เช่น การบดแร่หรือการข่อยหิน จำเป็นต้องมีสมบัติทนต่อการสึกหรอและสามารถรับแรงกระแทกได้ มีเหล็กหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้งาน เช่น เหล็กกล้าผสมโครเมียมสูง เหล็กหล่อผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง เป็นต้น [7]

เหล็กกล้าผสมต่ำชนิดโครเมียมเป็นธาตุหลัก (Chromium cast steel)

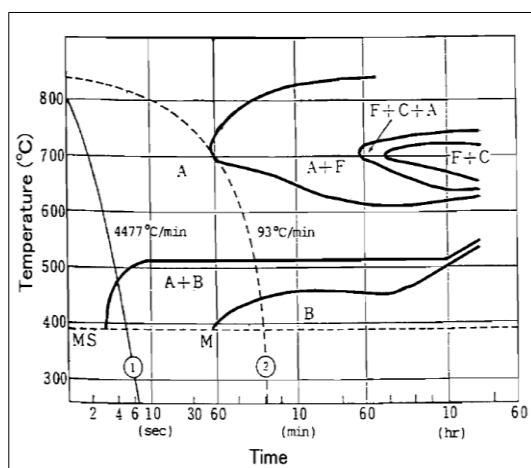
โครเมียมเป็นธาตุที่มีบทบาทในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้เหล็กกล้าในสภาพนอร์มัลไรซิง ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง แต่ความเหนียวจะลดลง ในการผลิตมักเติมธาตุอื่นๆ ลงไปเพื่อเสริมคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (ตารางที่ 2.4) โดยเฉพาะเป็นการลดบทบาททางด้านการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper brittleness) ของโครเมียมให้น้อยลง ธาตุที่สำคัญ ได้แก่ โมลิบดีนัมและวานาเดียม [15] เหล็กกล้าโครเมียมที่ประยุกต์ใช้งานทนการสึกหรอ มีการผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง โดยสามารถชุบแข็งแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ทำให้มีความแข็งสูง แสดงดังรูปที่ 2.18 แต่เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม จะทำให้เกิดการแตกเย็น เนื่องจาก

- (1) ความเหนียวต่ำของตัวเนื้อเชื่อม
- (2) ความเค้นตกค้าง
- (3) การกระจายตัวของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C

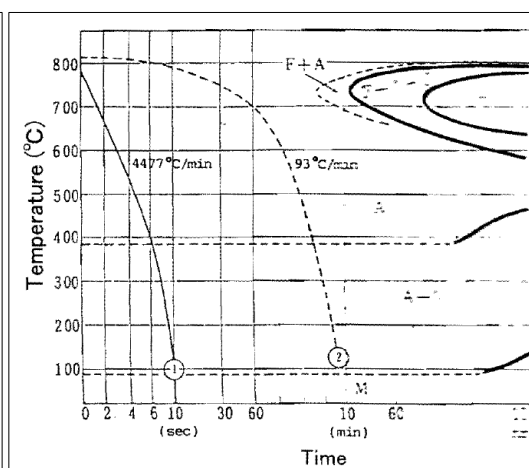
ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม และการให้ความร้อนภายหลังการเชื่อม เพื่อลดความสามารถในการแพร่ของไฮโดรเจน และออกแบบการเชื่อมให้เกิดความหนาแน่นของความเค้น (Stress concentration) น้อยที่สุด [9]

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม (ในสภาพนอร์มัลไรซิง-อบคลายตัว) [15]

%C	%Mn	%Cr	%Mo	ความเค้นจุด คราก Psi	ความเค้นแรง ดึงสูงสุด Psi	อัตราการยืด ตัว %
0.28-	0.60-	0.80-	0.15-	52,000-	90,000-	25-22
0.35	0.85	0.10	0.30	62,000	96,000	
0.20	0.50-	4.00-	0.45-	40,000	70,000	20
	0.80	6.50	0.65			



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 แผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าโครเมียม 2 ชนิด (ก) 2.25Cr-1Mo

(ข) 5Cr-0.5Mo [11]

บทบาทของธาตุผสมแต่ละชนิดที่มีต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า [16]

1. นิกเกิล (Ni) จัดเป็นธาตุที่เพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์ โดยไม่รวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ มีบทบาทที่สำคัญ ดังนี้

- มีบทบาททำให้จุดยุติคอดยด์ทั้งปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิต่ำลง ทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์มากขึ้นและเฟอร์ไรต์น้อยลง

- จากบทบาทของนิกเกิลดังกล่าวทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์เกิดที่อุณหภูมิต่ำลง

- เพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้า โดยทำให้แผนภาพ TTT เคลื่อนไปทางขวา และลดอุณหภูมิอุณหภูมิการเปลี่ยนออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ (Ms) ให้ต่ำลง เหล็กกล้าที่ผสมนิกเกิลมากกว่า 3 % อาจจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยการอบปกติ

- เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง โดยไม่ทำให้ความเหนียวลดลง
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านเชื่อมให้กับเหล็กกล้า
- ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่าง
- ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านผุกร่อนให้ดีขึ้น

2. แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับนิกเกิล ต่างกับนิกเกิลตรงที่สามารถรวมกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์ที่ทำหน้าที่ของแมงกานีสเปลี่ยนแปลงไปจากนิกเกิลบทบาทของแมงกานีสที่สำคัญมีดังนี้

- เปลี่ยนแปลงจุดยูเทคตอยด์ทั้งปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิให้ต่ำลง ทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์น้อยลง และมีส่วนทำให้เกรนละเอียดคล้ายคลึงกับนิกเกิล

- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้าและมีผลรุนแรงกว่านิกเกิลถึง 2 เท่า

- เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง แต่มีส่วนทำให้ความเหนียวลดลง โดยแมงกานีสมีแนวโน้มที่จะแยกตัวอยู่ตามขอบเกรน

หมายเหตุ ในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้แมงกานีสเป็นธาตุผสม ถึงแม้ว่าแมงกานีสจะมีราคาถูกกว่ามากก็ตามเพราะแมงกานีสมีข้อเสียที่จะต้องระมัดระวังอยู่หลายประการคือ

- แมงกานีสมีบทบาททำให้เกิดการเปราะขณะทำการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C แมงกานีสจะรวมกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์และมักจะตกผลึกจับตัวอยู่ตามขอบเกรนของเหล็กกล้าในลักษณะต่อเนื่องจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่ง ซึ่งทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติเปราะไม่ทนต่อแรงกระแทก

- เนื่องจากแมงกานีสมีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์ ทำให้เกิดออสเทนไนต์เหลือค้างปริมาณมากภายหลังการชุบแข็ง ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในขณะใช้งาน ทำให้เกิดการขยายตัวเล็กน้อย จะเกิดอันตรายจากการแตกร้าวได้ง่าย

- แมงกานีสมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัว (Segregation) ได้ง่าย ซึ่งอาจจะไปรวมอยู่ตามเกรนหรือบริเวณใจกลางของแท่งเหล็ก (Ingot) ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ

3. โครเมียม (Cr) เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพของเฟอร์ไรต์ สามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง มีบทบาทสำคัญเมื่อผสมให้เหล็กกล้าคาร์บอน ดังนี้

- มีบทบาททำให้จุดยูเทคตอยด์ มีคาร์บอนต่ำลง แต่กลับทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้า
- เมื่อโครเมียมรวมตัวกับคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพ ทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน

4. โมลิบดีนัม (Mo) เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์และรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ โมลิบดีนัมมีบทบาทที่สำคัญดังนี้

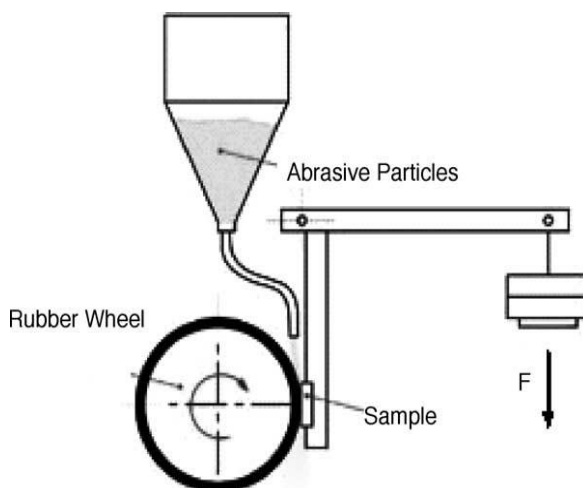
- ลดปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ แต่กลับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมไม่เกิน 1% แต่ถ้าผสมปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งลดลง
- สามารถรวมกับคาร์บอนให้โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง ทำให้เหล็กผสมโมลิบดีนัมทนความร้อนได้ดีโดยไม่สูญเสียความแข็งแรง
- ให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเสถียรภาพสูงถึงอุณหภูมิประมาณ 600 °C ทำให้รักษาความแข็งแรงไว้ได้ดีที่อุณหภูมิไม่เกิน 600 °C
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน

5. ซิลิกอน (Si) เป็นธาตุที่ไม่รวมกับคาร์บอนเมื่อผสมในเหล็ก เพราะจะรวมกับเหล็กได้ดีกว่าคาร์บอน ซิลิกอนจัดอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ มีบทบาทที่สำคัญดังนี้

- ละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์และเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์ โดยเฉพาะเพิ่มจุดคลากของเหล็กให้สูงขึ้น
- ไม่มีบทบาทเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง คือไม่มีผลทำให้แผนภาพ TTT เคลื่อนไปทางซ้ายหรือขวา
- เพิ่มเสถียรภาพให้มาร์เทนไซต์ถึงอุณหภูมิประมาณ 500 °C
- คุณสมบัติทางด้านเชื่อมของเหล็กไม่ดีเมื่อผสมซิลิกอนสูง เพราะซิลิกอนจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายมาก

2.1.7 การทดสอบการสึกหรอ

ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ (A dry sand rubber wheel machine) ตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะเสียดสีระหว่างทรายที่มีขนาด 50-70 เมช กับล้ออย่างดั่งรูปที่ 2.19 โดยทรายที่ใช้ทดสอบต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำไปทดสอบ โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ใช้อัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบ 13.5 กิโลกรัม ล้ออย่างหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ทดสอบจนได้ระยะทางในการเสียดสี 4000 เมตร จากนั้นจึงมาหาน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานทดสอบ โดยการคำนวณน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอ (Mass loss) และความต้านทานการสึกหรอ แสดงดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 [7]



รูปที่ 2.19 โดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 [7]

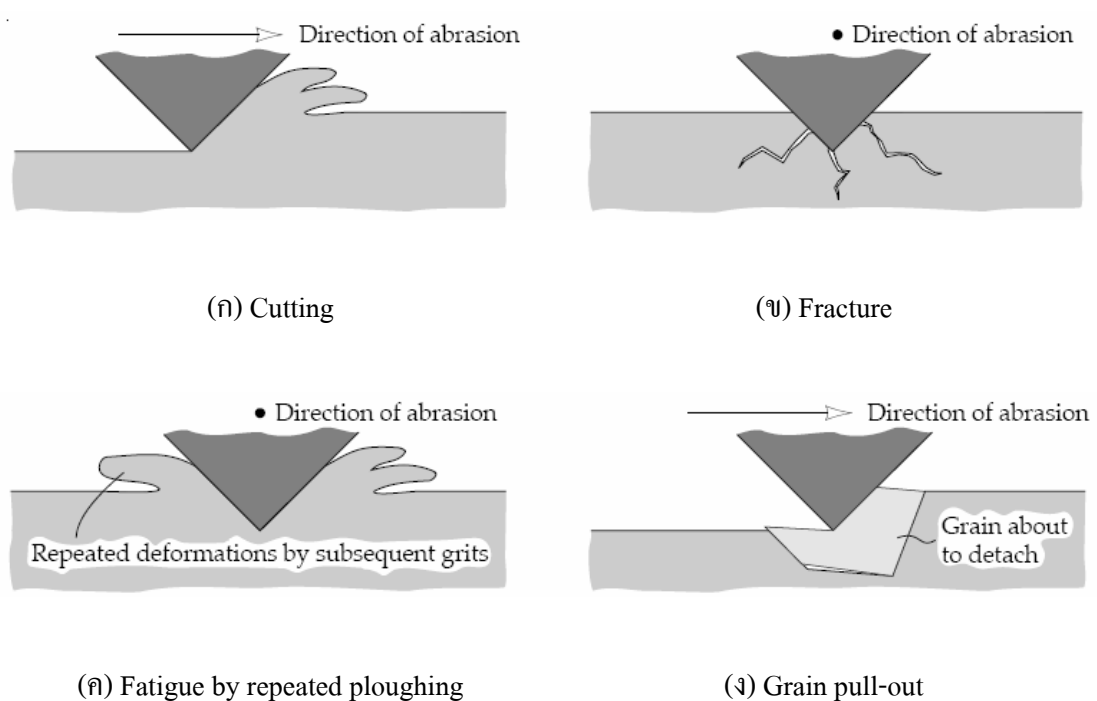
$$\text{Mass loss} = \text{Mass initial} - \text{Mass after} \quad (2.7)$$

$$\text{Abrasive wear resistance} = \frac{\text{Wheel distance (m)}}{\text{Mass loss (mg)}} \quad (2.8)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ D.H. Kang และคณะ [17] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กกล้า 2.25 Cr-1 Mo ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง โดยได้อธิบายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 2.25 Cr-1 Mo โดยใช้แผนภาพ CCT ว่ามีโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ไลต์ และเบน

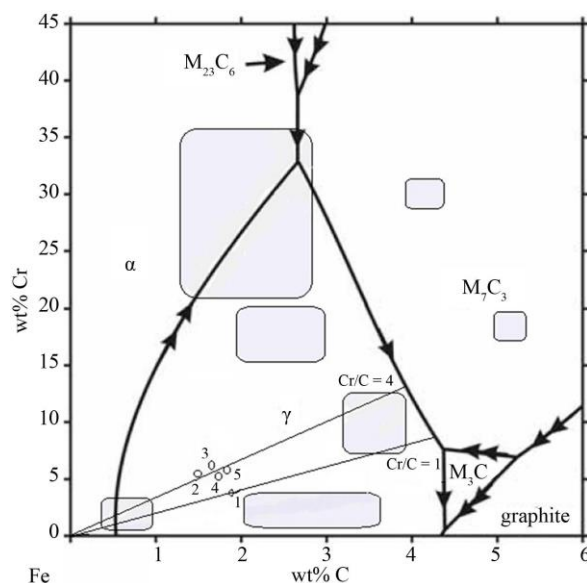
ไนต์ โดยเฟอไรต์คือเฟสลำดับแรก ส่วนเพิร์ลไลต์ละเบนไนต์คือเฟสลำดับที่สอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K.M. Kenchi และคณะ [18] ที่ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการสึกหรอของชั้นพอกแข็ง จากการศึกษาพบว่าชั้นพอกแข็งที่ใช้ลวดเชื่อม 2.22 % โครเมียม มีโครงสร้างเฟอไรต์และเพิร์ลไลต์มากกว่าลวดเชื่อม 2.15 % โครเมียม ที่มีจำนวนเฟอไรต์และเพิร์ลไลต์จำนวนปานกลาง ส่งผลให้ลวดเชื่อมชนิดแรกมีความแข็งและความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่าลวดเชื่อมชนิดที่สอง สำหรับลักษณะการสึกหรอของชั้นพอกแข็งที่ใช้ลวดเชื่อม 2.22 % โครเมียม มีลักษณะแบบการตัดและการไถ ส่วนชั้นพอกแข็งที่ใช้ลวดเชื่อม 2.15 % โครเมียม มีลักษณะการสึกหรอแบบการตัด และแบบรอยถิ่ม (Wedge formation) แต่ไม่พบการสึกหรอแบบเสียดรูปพลาสติกของชั้นพอกแข็งทั้ง 2 ชนิด ซึ่งงานวิจัย Ing. Ingrid และคณะ [19] ได้นำเสนอกลไกการสึกหรอแบบเสียดสีแต่ละแบบ แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กลไกการสึกหรอแบบขัดสี [19]

A. Shafiee และคณะ [20] ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม (WS 140) ที่ผ่านการอบคืนตัวออกสเทนไนต์ที่เวลาต่าง ๆ กัน โดยได้กล่าวไว้ว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายวัสดุชนิดเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม ที่ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการทำเหมืองแร่ลงได้ ถ้าหากวัสดุนั้นมีความเหนียวและความต้านทานการสึกหรอที่ดี เพราะในการทำงานของ

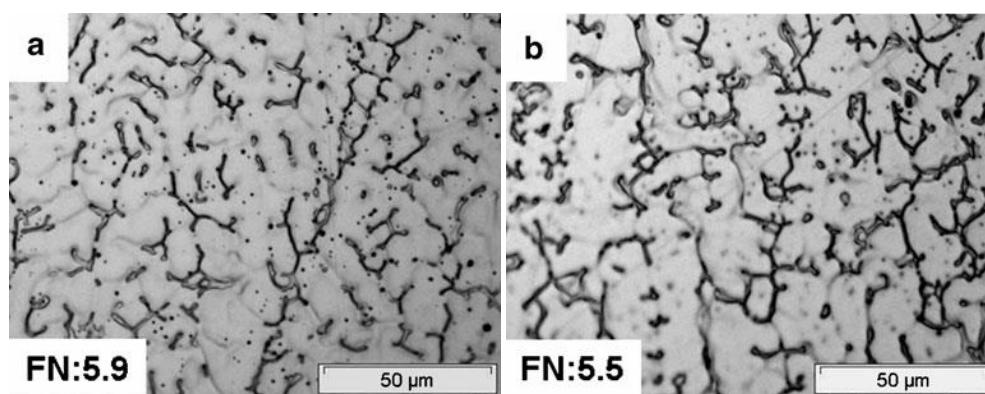
อุปกรณ์จะเกิดทั้งการเสียดสีและการกระแทกเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นวัสดุจะต้องประกอบไปด้วย โครงสร้างเฟิร์ลไรต์ที่มีความเหนียวเพื่อต้านทานแรกกระแทก และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความ แข็งเพื่อต้านทานการสึกหรอ โดยมีโครงสร้างเบนไนต์และออสเทนไนต์เป็นตัวกั้นระหว่างกลาง เพราะความแข็งของโครงสร้างมาร์เทนไซต์จะก่อให้เกิดความเข้มของความเค้นสูงและอาจแตกหัก ออกจากกันได้ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ S.I. Maldonado และคณะ [21] ที่ได้กล่าวไว้ว่าเหล็กกล้า โครเมียมเป็นพื้นฐานของวัสดุที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม เหมือนแร่ ที่มีการนำไปทำอุปกรณ์สำหรับบดหินหรือแร่ จากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษา ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติเหล็กของกล้าผสมโครเมียมสูง แต่การศึกษาเหล็กกล้า โครเมียมต่ำยังคงมีอยู่น้อย ทาง S.I. Maldonado และคณะ จึงศึกษาเหล็กกล้าโครเมียมต่ำและได้ นำเสนอเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม แสดงดังรูปที่ 2.19 เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง จุลภาค สำหรับ S.G. Sapate และคณะ [22] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติการสึกหรอของ เหล็กกล้าโครเมียมที่ผ่านการอบคืนตัว ที่อุณหภูมิต่างๆ ประกอบด้วย 150 °C 250 °C 350 °C 450 °C และ 560 °C พบว่าความละเอียดของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียมที่มีโครงสร้างมาร์เทน ไซต์ ซึ่งมีคาร์ไบด์แทรกตัวอยู่สัมพันธ์กับสมบัติทางกล โดยพบว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำที่สุด ลักษณะของมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์จะละเอียดที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงที่สุดและการสึกหรอ ต่ำที่สุด



รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม [21]

งานวิจัยจาก V. T. Bhanu Kiran และคณะ [23] ได้ศึกษาการพัฒนาและการวิเคราะห์คุณลักษณะของลวดเติม เพื่อไม่ให้มีรอยแตกของเนื้อเชื่อมพอกแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยงานวิจัยได้ดำเนินการเชื่อมพอกแข็งดังนี้ ชั้นที่ 1 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ C-4.8% Mn-1.1% Si-1.4% Cr-30.0% Ni-0.5% Mo-1.7% V-0.2% และ Fe-60.3% เชื่อมพอก 1 ชั้น บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชั้นที่ 2 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดเติม โดยเชื่อมพอก 2 ชั้น ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชั้นที่ 3 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดเติม โดยเชื่อมพอก 3 ชั้น ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชั้นที่ 4 เชื่อมพอกโดยมีเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer layer) โดยใช้ลวดเชื่อมรองพื้นที่มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ C-1.1% Mn-13% Si-0.8% S-0.05% P-0.05% และ Fe-85% เชื่อมพอก 1 ชั้น ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หลังจากนั้นก็เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดเติม ส่วนชั้นที่ 5 เชื่อมพอกโดยมีเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น ชนิดเติม 1 ชั้น หลังจากนั้นก็เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น โดยใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดเติมเช่นกัน จากผลการทดลองสรุปว่า การพอกแข็งหลายชั้นให้ค่าความแข็งต่ำสุดที่ 60 HRC และสมบัติการสึกหรอเทียบเท่ากับเหล็กกล้าผสมโครเมียม อย่างไรก็ตามการเชื่อมพอก 2 ชั้น โดยที่ไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมจะไม่มีแนวแตก ส่วนการเชื่อม 3 ชั้น จะมีแนวแตกเนื่องจากการหดตัวของแนวเชื่อม ดังนั้นในการเชื่อมพอกแข็งสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่มีความหนามากกว่า 15 มิลลิเมตร และในกรณีการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่มีความหนาน้อยกว่า 15 มิลลิเมตร จะต้องมีการอุ่นชิ้นงานประมาณ 200 °C ก่อนเชื่อมเพื่อป้องกันการแตก โดยการป้องกันการแตกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมบริเวณชั้นพอกแข็งกับโลหะฐานได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ M. Adamiak และคณะ [24] ซึ่งศึกษาความต้านทานการสึกหรอของเหล็กหล่อโครเมียมกับเหล็กแผ่น HARDOX 400 และวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวประกอบด้วย ABRADUR 64 และ WC plate จากการศึกษาพบว่าในการเชื่อมพอกผิวระหว่างวัสดุที่มีความแข็งสูงลงบนวัสดุที่มีความอ่อน ควรต้องมีเหล็กสแตนเลสเป็นชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นระหว่างกลางของโลหะ 2 ชนิด เพราะชั้นรองพื้นจะทำหน้าที่รองรับการส่งถ่ายความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกันได้ เพื่อป้องกันการแตกที่อาจเกิดขึ้นและขยายไปสู่โลหะฐานฐานเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Winarto และคณะ [25] ได้ศึกษาผลกระทบจากการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและการเชื่อมชั้นรองพื้น ที่ส่งผลต่อการแตกและความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า HSLA โดยพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนก่อนเชื่อม สามารถลดการแตกร้าวที่ชั้นแบตเตอรี่ (E 309L) ได้ และพบว่าความแข็งของชั้นแบตเตอรี่ในแต่ละชั้นไม่เท่ากันรวมถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากระดับการเจือจางของธาตุในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน การให้ความร้อนก่อนเชื่อมและการมีชั้นแบตเตอรี่ยังช่วยลดการแตกของชั้นพอกแข็งและเป็นตัวประสานที่ดีระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน ซึ่งในกรณีของการมีชั้นแบตเตอรี่เพื่อช่วยลดการแตกของชั้น

พอกแข็งและเป็นตัวประสานที่ดีระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐานสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Balakrishnan [26] และคณะ ที่ทำการศึกษากระบวนการเชื่อมพอกแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวที่ส่งผลต่อการตีกระแทก โดยการทดลองนี้ได้มีการใช้ลวดเชื่อมสแตนเลสมาตรฐาน AWS E 307-16 เป็นชั้นรองพื้น ชั้นล่าง (Root) และชั้นพอก (Capping) สำหรับการเชื่อมต่อชนแบบ 2 วี (Double V-joint) เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าลวดเชื่อมสแตนเลสมาตรฐาน AWS E 307-16 พบเกรนของเฟอไรต์ (δ ferrite) ที่คดเคี้ยวอยู่ในเนื้อหลักออสเทนนิติกที่มีลักษณะเดนไดรต์ และไม่พบรอยแตกหรือสิ่งเจือปนใดๆในเนื้อเชื่อม และยังแสดงถึงการยึดเกาะที่ดีกับเนื้อเชื่อมชนิดอื่น สำหรับความแข็งของเนื้อเชื่อมประมาณ 240 HV โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ G. Srinivasan และคณะ [27] ซึ่งศึกษาการเพิ่มเซอร์เมียมออกไซด์ลงในฟลักซ์ของการเชื่อมเคลือบโดยใช้ลวดเชื่อมสแตนเลส เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ผลปรากฏว่าโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS SFA 5.4 มีโครงสร้างจุลภาคชนิดออสเทนนิติกที่มีลักษณะของเฟอไรต์ที่คดเคี้ยวไปมา แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจัดเป็นโหมดหนึ่งของการแข็งตัว (Solidification) แบบเฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.22 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม (ก) ไม่เติมเซอร์เมียม

(ข) เติมเซอร์เมียม [27]

Olin O. Zollinger และคณะ [28] ได้อธิบายสมบัติของโลหะสำหรับการพอกแข็งว่า มีอยู่ 3 กลุ่มคือ กลุ่มโลหะออสเทนนิติก กลุ่มโลหะมาร์เทนซิติก และกลุ่มโลหะคาร์ไบด์ โดยกลุ่มโลหะออสเทนนิติกเป็นกลุ่มที่เหมาะสมกับการสร้างเนื้อให้ชิ้นงานที่สึกหรอ มีความแข็งแรงและเหนียวแต่ความ

ด้านทานการสึกหรอปานกลาง เชื่อมได้ดีกับโลหะที่มีสมบัติความแตกต่างกัน โลหะกลุ่มมาร์เทนซิติกมีความต้านทานต่อการกระแทกและความต้านทานการสึกหรอที่ดี เหมาะกับการทำเป็นชั้นพอกแข็ง ความแข็งของโลหะชนิดนี้ขึ้นกับอัตราการเย็นตัวเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งการเย็นตัวรวดเร็วจะทำให้มีความแข็งสูง ลักษณะของมาร์เทนซิติกขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นพอกแข็งและชนิดของโลหะฐาน ซึ่งเหล็กมาร์เทนซิติกมีอยู่ 3 ชนิด คือ เหล็กมาร์เทนซิติกคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (น้อยกว่า 5%) เหล็กมาร์เทนซิติกคาร์บอนสูงหรือเหล็กกล้าผสมสูง (6-12%) และเหล็กกล้ามาร์เทนซิติกสเตนเลส (0.25-18% โครเมียม) สำหรับเหล็กคาร์ไบด์โดยเฉพาะ โครเมียมคาร์ไบด์ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลัก จะมีความแข็งและต้านทานการสึกหรอที่ดี ซึ่งโครเมียมคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีโครเมียมอย่างน้อย 12% ซึ่งจากงานวิจัยนี้รวมถึงหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสำคัญของการสึกหรอ และยังได้กล่าวว่าการสึกหรอหลักที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของเครื่องจักรคือการสึกหรอแบบเสียดสี โดยงานวิจัยของ K.M. Kenchi และคณะ [29] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบเสียดสีของการเชื่อมพอกแข็ง ได้อธิบายหลักการทำงานของการสึกหรอแบบการสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง ซึ่งเป็นการสึกหรอชนิดหนึ่งของการสึกหรอแบบเสียดสี โดยได้อธิบายไว้ว่า เมื่อปล่อยให้ทรายไหลลงในทิศทางเดียวอย่างอิสระ ทรายจะได้รับพลังงานเพิ่มจากการหมุนของล้อยาง จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานมาสัมผัสกับล้อยางที่มีทรายอยู่ตรงกลาง ลำดับต่อมาทรายจะเข้าไปฝังอยู่ในล้อยาง ทำให้เกิดลักษณะการสึกหรอแบบการสัมผัส 2 วัตถุ และสุดท้ายทรายก็จะไปขูดที่ผิวของชิ้นงาน เกิดการเปลี่ยนรูปร่างที่ผิวหน้าชิ้นงาน จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งมากจะยอมให้ทรายปริมาณมากไหลผ่านบริเวณผิวสัมผัสและเกิดการกระจายของความเค้นที่มาจากรถกด ส่งผลให้อัตราการสึกหรอลดลง

Agustin Gualco และคณะ [30] ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นพอกแข็งมาร์เทนซิติกของเหล็กเครื่องมือ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อม ประกอบด้วยชนิดของแก๊สปกคลุม ความร้อนที่ให้กับชิ้นงานและความร้อนที่ให้ชิ้นงานหลังการเชื่อม โดยเชื่อมชั้นพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดมาร์เทนซิติก ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (SAE 101 carbon steel) ด้วยวิธีการเชื่อมแมก ซึ่งก่อนการเชื่อมได้มีการอุ่นชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 150 °C โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคในกรณีของการเชื่อมพอกแข็งที่ไม่มีการให้ความร้อนชิ้นงานหลังการเชื่อม พบว่ามีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีออสเทนไนต์ และมีเดนไดรต์ที่กระจายตัวแยกออกไป เมื่ออุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานเพิ่มขึ้น โครงสร้างแบบออสเทนไนต์ก็จะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นมาร์เทนไซต์มากขึ้น ในขณะที่แนวเชื่อมเย็นตัวจะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด M_3C และ $M_{23}C_6$ โดยที่โครงสร้างแบบมาร์เทนซิติกและการตกตะกอนของคาร์ไบด์จะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานและจำนวนชั้นพอกแข็งมีมากขึ้น

ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J.Yang และคณะ [31] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติการสึกหรอของชั้นพอกแข็งของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-ทังสเทน (Fe-Cr-W-C) ด้วยกรรมวิธีเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เหล็กกล้าชั้นพอกแข็งเงื่อนไขที่ไม่มีกรเดิมทังสเทนลงไปซึ่งประกอบด้วย 0.67% C 2.05% Cr 0.615% Si และ 0.565% Mn จากการวิเคราะห์ XRD พบว่ามีเฟส α -Fe (เหล็กออสเทนไนต์), γ -Fe (เหล็กเฟอร์ไรต์), $M_{23}C_6$ (เหล็กคาร์ไบด์) และ M_7C_3 (โครเมียมคาร์ไบด์) มีโครงสร้างหลักคือมาร์เทนซิติก ความแข็งประมาณ 61.5 HRC และลักษณะของการสึกหรอจะเกิดเป็นรอยลึกและกว้างกว่าชั้นพอกแข็งเงื่อนไขที่มีการเติมทังสเทนคาร์ไบด์ลงไป เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ M. Morsy และคณะ [32] ได้ศึกษาสมบัติของลวดเชื่อมพอกแข็งของเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-Cr-C hardfacing) โดยวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ลวดเชื่อมที่ใช้มี 4 มาตรฐาน ประกอบด้วยลวดเชื่อม E6-UM-60 ลวดเชื่อม E10-UM-60GR ลวดเชื่อม E10-GF-60GR1 และลวดเชื่อม E10-GF-60GR2 ผลปรากฏว่าลวดเชื่อมมาตรฐาน E6-UM-60 มีโครงสร้างมาร์เทนซิติก ค่าความแข็งเฉลี่ย 480 HV ส่วนความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับลวดเชื่อมมาตรฐานอื่น ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเหล็ก-โครเมียมคาร์ไบด์ จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติกกลุ่ม 6 (E6-UM-60) ยังคงได้รับความนิยมอยู่มากในอุตสาหกรรม ดังเช่นงานวิจัยของ M. A. Morsy และคณะ [33] ได้ศึกษาการเชื่อมซ่อมสลูกลำเลียงของเครื่องขึ้นรูปพลาสติก โดยเชื่อมพอกแข็งด้วยกรรมวิธีเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ บริเวณที่เกิดการสึกหรอแบบเสียดสีของสลูกลำเลียง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมมาร์เทนซิติกกลุ่ม 6 เป็นชั้นพอกแข็ง ที่มีลวดเชื่อมกลุ่มเหล็กกล้าและสแตนเลสเป็นชั้นรองพื้น ปรากฏว่าไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ความต้านทานการสึกหรอดีกว่าเนื้อโลหะเดิมของสลูกลำเลียง ดังนั้นการเชื่อมด้วยวิธีดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับกระบวนการเชื่อมซ่อมสลูกลำเลียงของเครื่องขึ้นรูปพลาสติก สำหรับงานวิจัยของ John J. Coronado และคณะ [34] ได้ศึกษาผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอแบบเสียดสีของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง โดยเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ในกรณีของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมพอก 1 ชั้น เป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติก ในขณะที่เนื้อเชื่อมพอก 3 ชั้น มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติกที่มีออสเทนนิติกที่ขอบเกรน ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอต่อการสึกหรอแบบขัดสีเนื้อเชื่อมพอก 1 ชั้น ให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมพอก 3 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีโครงสร้างออสเทนนิติกซึ่งเปราะที่อ่อน ง่ายต่อการขัดสีจากอนุภาคเสียดสีจากการทดสอบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการเชื่อมพอกแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอของฟันโมชนิดโมเดี่ยวของฟันโมเครื่องโมถ่าน เหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยทำการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ตามขั้นตอนการเชื่อม ที่กำหนด หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติด้านโลหะวิทยาเพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางโครงสร้างจุลภาค และในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ประกอบด้วยความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

3.1.1 เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่ได้จากการหล่อ (รูปที่ 3.1) จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ (เหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม) ซึ่งผ่านการอบคืนตัว มีความแข็งประมาณ 200 HV โดยมีโครงสร้างเป็นแบบเฟอร์ไรต์ เฟอไรต์และเบนไนต์ มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานผลิตชิ้นส่วนทางกล สำหรับเป็นอุปกรณ์ในเหมืองแร่ เช่น ฟันโมเครื่องโมถ่านหิน โดยมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมโครเมียมต่ำ (% น้ำหนัก)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.38	0.40	0.52	0.17	3.42	0.30	0.04	Balance

3.1.2 ลวดเชื่อม (Electrodes) ที่ใช้ในการเชื่อมมีด้วยกัน 2 ชนิด ดังนี้

(1) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้สำหรับเชื่อมชั้นรองพื้น โดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8556: E 188 Mn R26 (AWS A5.4-92: E 307-16) เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก

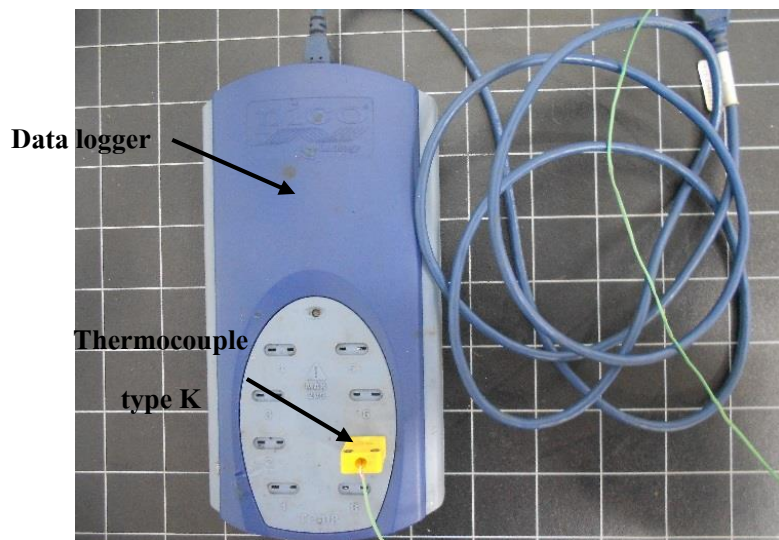
(2) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้สำหรับเชื่อมชั้นพอกแข็ง โดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8555: E 6-UM-60 เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก

3.1.3 เครื่องเชื่อม (Power source) เป็นระบบอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synegetic 4000 แสดงดังรูปที่ 3.2 ควบคุมตัวแปรการเชื่อมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์และซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม ปรับตัวแปรได้โดยตรงจากหน้าจอของเครื่องเชื่อม และยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมตัวแปรในการเชื่อมและบันทึกค่าตัวแปรในการเชื่อม



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อม

3.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple and data logger) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของชิ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และตัวเก็บข้อมูลยี่ห้อ PicoLog รุ่น USB TC-08 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

3.1.5 แผ่นให้ความร้อนเซรามิก (Flexible ceramic pad heaters) แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นแผ่นให้ความร้อนชิ้นงานก่อนเชื่อม โดยแผ่นให้ความร้อนเซรามิกจะต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานคือเครื่องเชื่อมแบบขดลวดต้านทาน



รูปที่ 3.4 แผ่นให้ความร้อนเซรามิก

3.1.6 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน (Band saw) รุ่น UE-712A แสดงดังรูปที่ 3.5 ใช้ในการตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ในขณะที่ตัดต้องเปิดน้ำหล่อเย็นเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

3.1.7 เครื่องตัดไฟเบอร์ (Abrasive cut-off machine) รุ่น BRILLANT 220 แสดงดังรูปที่ 3.6 ใช้ในการตัดชิ้นงานสำหรับเตรียมทดสอบทางโลหะวิทยา โดยใช้ความเร็วรอบ 1550-1600 รอบต่อนาที อัตราการป้อนชิ้นงาน 0.3 มิลลิเมตรต่อนาที ในขณะที่ตัดจะเปิดน้ำหล่อเย็นเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดไฟเบอร์

3.1.8 เครื่องทำเรื่อนชิ้นงานแบบร้อน (Hot mounting press) ยี่ห้อ Struers รุ่น CitoPress-1 แสดงดังรูปที่ 3.7 ใช้สำหรับทำเรื่อนชิ้นงานให้สามารถจับถือได้ง่าย



รูปที่ 3.7 เครื่องทำเรื่อนชิ้นงานแบบร้อน

3.1.9 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S แสดงดังรูปที่ 3.8 ใช้สำหรับกัดผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมให้เรียบและได้ขนาดที่ต้องการ ก่อนไปทดสอบความแข็งและการสึกหรอ



รูปที่ 3.8 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.1.10 เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder-polisher) ยี่ห้อ PACE TECHNOLOGIES รุ่น NANO 1000T GRIDER-POLISHER เป็นงานกลมขนาด 8 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 3.9 ใช้สำหรับเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค



รูปที่ 3.9 เครื่องขัดชิ้นงาน

3.1.11 น้ำยาเคมี (Etching reagent) ใช้ในการกัดผิวหน้าชิ้นงานเพื่อเตรียมชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ซึ่งน้ำยาเคมีที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้

- (1) สารละลาย Nital, 2 % (2 cc HNO₃ + 98 cc Ethyl alcohol)
- (2) สารละลาย Nital, 10 % (10 cc HNO₃+90 cc Ethyl alcohol)
- (3) สารละลาย Viella's (5 cc HCl + 2 gr Picric acid + 100 cc Ethyl alcohol)

3.1.12 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา มี 3 ชนิดคือ

(1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZ2-ET มีกำลังขยายตั้งแต่ 4-28 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.10 ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 4-28 เท่า

(2) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น Scope.A1 มีกำลังขยายตั้งแต่ 25-500 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.11 ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 25-500 เท่า

(3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ FEI Quanta 400 รุ่น SEM-Quanta แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยโหมดที่ใช้คือการวิเคราะห์ธาตุแบบเส้น (EDX line scan analysis) และการวิเคราะห์ธาตุแบบจุด (EDX point analysis) ส่วนโหมดของภาพคือ Backscattered electron



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1.13 เครื่องทดสอบความแข็ง (Universal hardness tester) ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น ZHU เป็นเครื่องทดสอบความแข็งระดับมหภาค วัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) หัวกดเป็นเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมด้านเท่า มีมุมระหว่างหน้าปิรามิด 136° สามารถปรับแรงกดได้ตั้งแต่ 3-100 kgf แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.1.14 อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอ (Wear instrument) ประกอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 และทรายขนาด 212-300 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.14



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ทดสอบการสีกหรือ(ก) เครื่องทดสอบการสีกหรือ

(ข) ทรายขนาด 212-300 ไมโครเมตร

3.1.15 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weight instrument) ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น TB-214 ที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (รูปที่ 3.15) ตามที่มาตรฐาน ASTM G65 กำหนดไว้ในการทดสอบการสีกหรือ เครื่องชั่งน้ำหนักทำหน้าที่ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการสีกหรือ

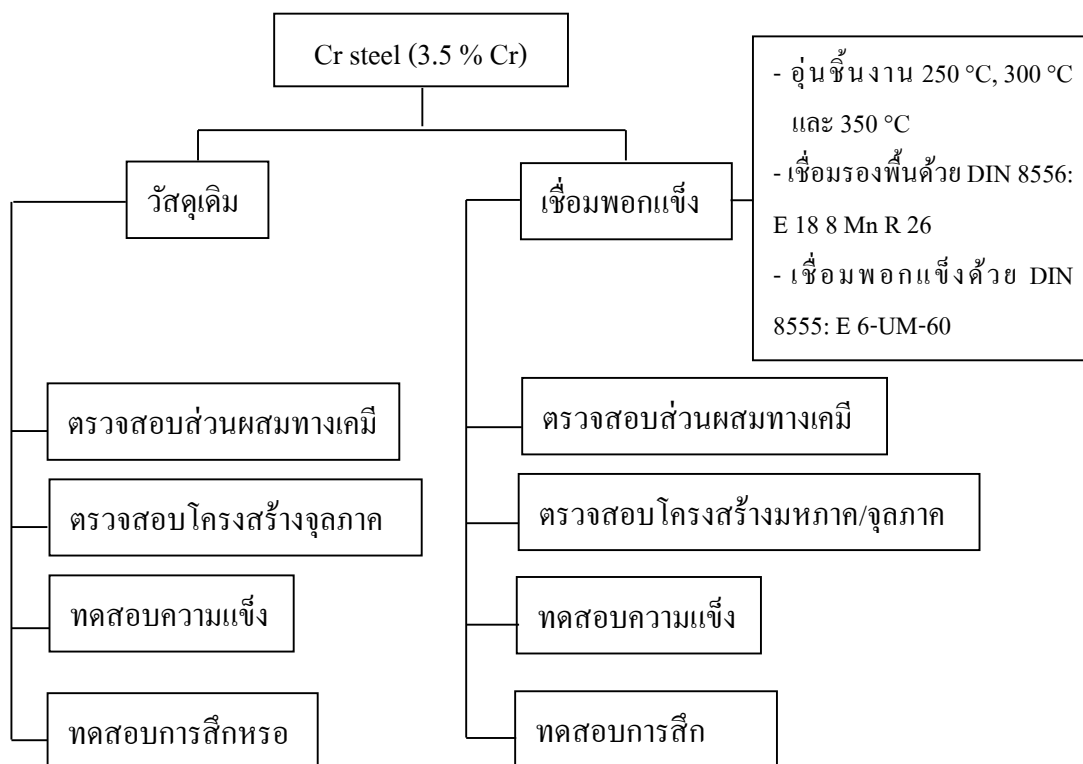


รูปที่ 3.15 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.1.16 อุปกรณ์อื่นๆ

- (1) พงเบเคอร์ไลท์ (Bakelite)
- (2) กระดาษทราย (SiC paper)
- (3) แผ่นสักหลาด (Polish pad)
- (4) พงอลูมินา (Alumina oxide powder)
- (5) เครื่องเป่าลม (Blower)
- (6) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- (7) หินเจียร์ (Grinder)
- (8) เวอร์เนีย (Vernier)
- (9) แปรงทองเหลือง (Brass brush)
- (10) ค้อนเคาะสแลก (Slag hammer)
- (11) ครอบกอบลวดเชื่อม (Portable welding rod)
- (12) สว่าน (Driller)
- (13) ต๊าบเกลียวมือ (Screw tap)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



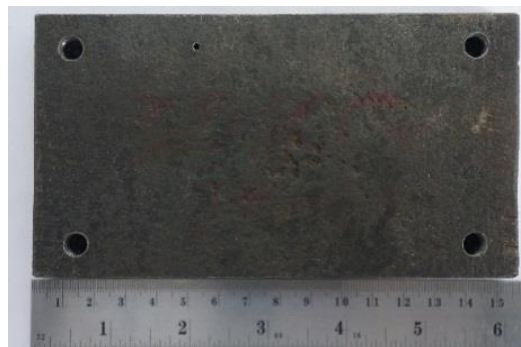
รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

3.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อม

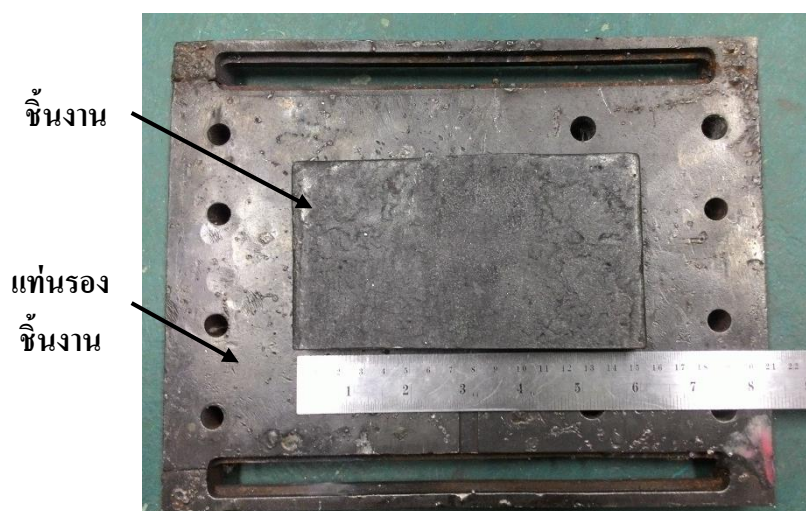
ตัดเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร จำนวน 15 แผ่น (15 เส้นใยการเชื่อม) โดยแต่ละแผ่นเจาะรูที่ด้านหลังชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ลึก 12 มิลลิเมตรจากผิว จำนวน 4 รู จากนั้นจึงตัดเกลียวขนาด M8 x 1.5 เพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกับแท่นรองชิ้นงาน ป้องกันไม่ให้ชิ้นงานบิดงอในขณะที่เชื่อม และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ลึก 12 มิลลิเมตรจากผิวด้านหลังชิ้นงานสำหรับเป็นช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิล แสดงดังรูปที่ 3.17 (ก) ถึง (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.17 เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง
(ค) ชิ้นงานยึดติดกับแท่นรองชิ้นงาน

3.4 กรรมวิธีการเชื่อม

เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รูปที่ 3.18 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม โดยชิ้นงานเชื่อมจะยึดติดอยู่บนแท่นรองชิ้นงานและต่ออยู่กับสายเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อกับคอมพิวเตอร์อีกทีเพื่อบันทึกอุณหภูมิ การเชื่อมใช้กระแสตรง (DC+) โดยชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องเชื่อม และลวดเชื่อมต่อกับขั้วบวกของเครื่องเชื่อม เครื่องเชื่อมจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลการเชื่อม ที่ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และเวลาในการเชื่อมแต่ละแนวเชื่อม



รูปที่ 3.18 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม

การเชื่อมแบ่งออกเป็น 15 เงื่อนไข โดยนำชิ้นงานในข้อ 3.3 มาให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันคือ อุณหภูมิห้อง 250 °C 300 °C และ 350 °C โดยใช้แผ่นเซรามิกเป็นตัวให้ความร้อน (รูปที่ 3.19) หลังจากนั้นทำการทดลองเชื่อมพอกแข็งโดยใช้ค่าตัวแปรในการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3.2 การเชื่อมแต่ละเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 3.3 และแสดงดังรูปที่ 3.20 ถึง รูปที่ 3.24 สำหรับในกรณีการเชื่อมที่อุณหภูมิห้อง ได้ทดลองเชื่อมแบบที่มีชั้นรองพื้นและไม่มีชั้นรองพื้น



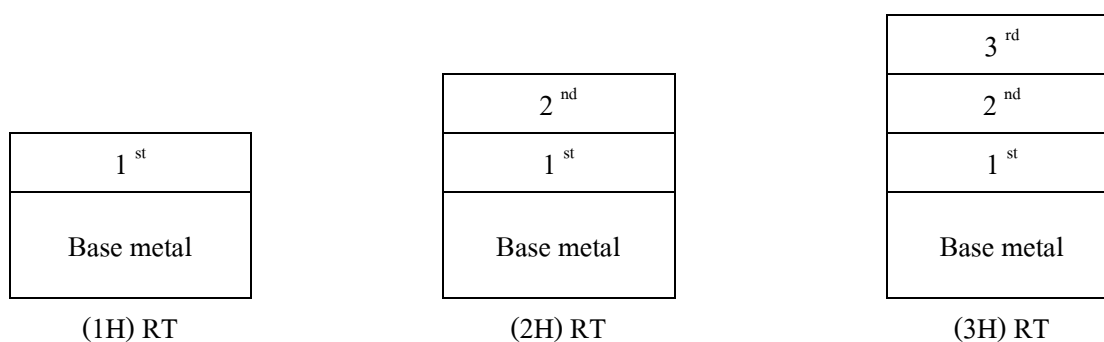
รูปที่ 3.19 ตัวทำความร้อนเซรามิกแผ่น

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

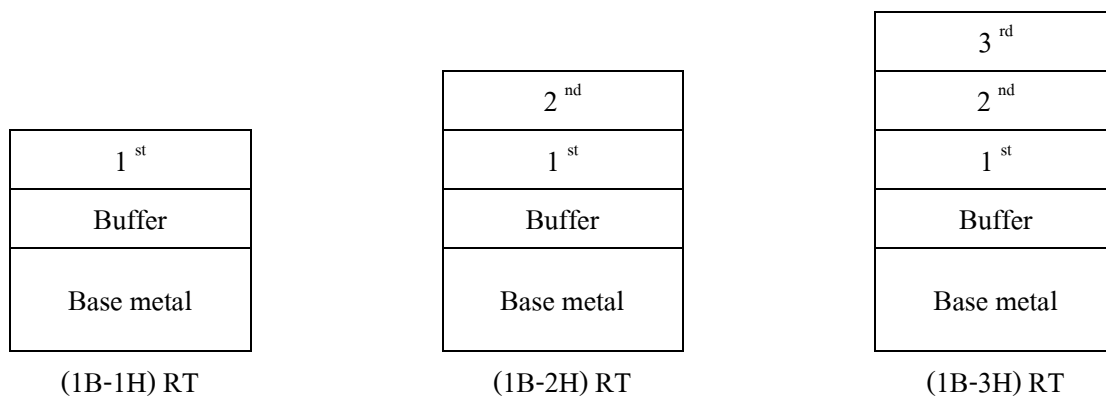
ลวดเชื่อม	กระแส (A)	แรงดัน (V)	ความเร็วเชื่อม (cm/min)	ความร้อนนำเข้า (kJ/cm)
ชั้นพอกแข็ง	155-158	20-24	15-17	9.65
ชั้นรองพื้น	130-133	20-23	17-19	7.20

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

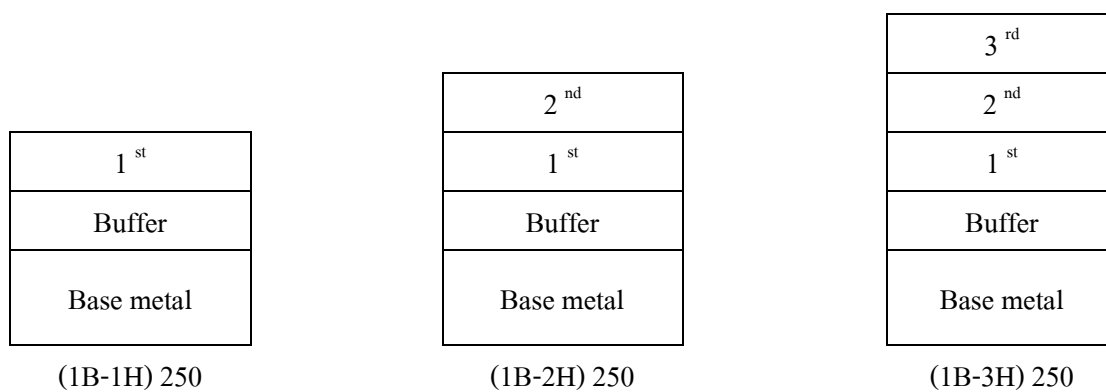
ชั้นงาน	ความร้อนก่อนเชื่อม (°C)	จำนวนชั้นรองพื้น	จำนวนชั้นพอกแข็ง
(1H) RT	-	-	1
(2H) RT	-	-	2
(3H) RT	-	-	3
(1B-1H) RT	-	1	1
(1B-2H) RT	-	1	2
(1B-3H) RT	-	1	3
(1B-1H) 250	250	1	1
(1B-2H) 250	250	1	2
(1B-3H) 250	250	1	3
(1B-1H) 300	300	1	1
(1B-2H) 300	300	1	2
(1B-3H) 300	300	1	3
(1B-1H) 350	350	1	1
(1B-2H) 350	350	1	2
(1B-3H) 350	350	1	3



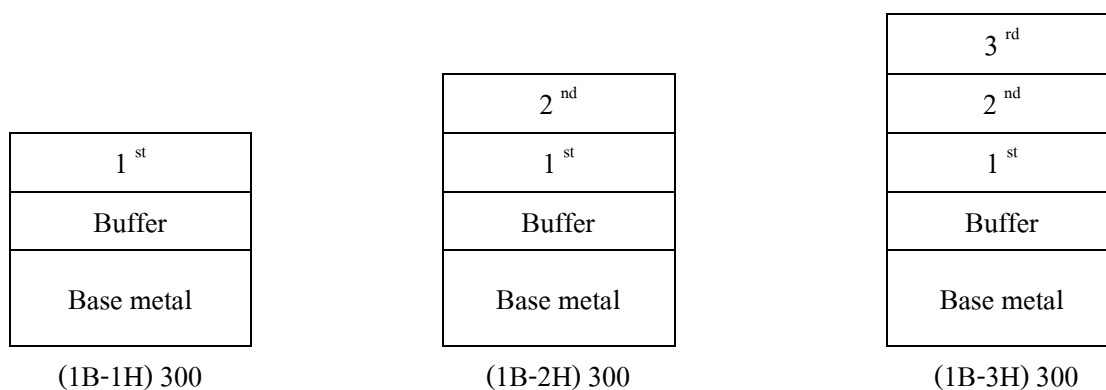
รูปที่ 3.20 การเชื่อมเงื่อนไขไม่มีชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชั้นงานก่อนเชื่อม



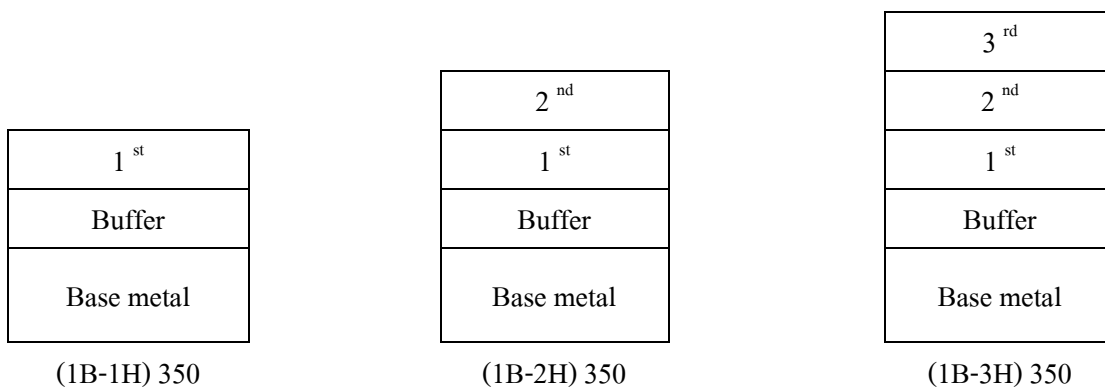
รูปที่ 3.21 การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม



รูปที่ 3.22 การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C



รูปที่ 3.23 การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300 °C



รูปที่ 3.24 การเชื่อมเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้นและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 350 °C

3.4.1 เชื่อมชั้นรองพื้นในทำราบด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามมาตรฐาน DIN 8556: E 18 8 Mn R 26 (AWS A5.4-92: E 307-16) ยี่ห้อ FOX A-7A เป็นจำนวน 1 ชั้น โดยก่อนการเชื่อมจะต้องอบลวดเชื่อมที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.2 เชื่อมชั้นพอกแข็งในทำราบด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ด้วยลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN 8555: E 6-UM-60 ยี่ห้อ UTP DUR 650 Kb โดยแบ่งการเชื่อมพอกแข็ง ออกเป็น 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ก่อนการเชื่อมจะต้องอบลวดเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.3 หลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.25) จากนั้นนำชิ้นงานมาเตรียมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งและทดสอบการสึกหรอ

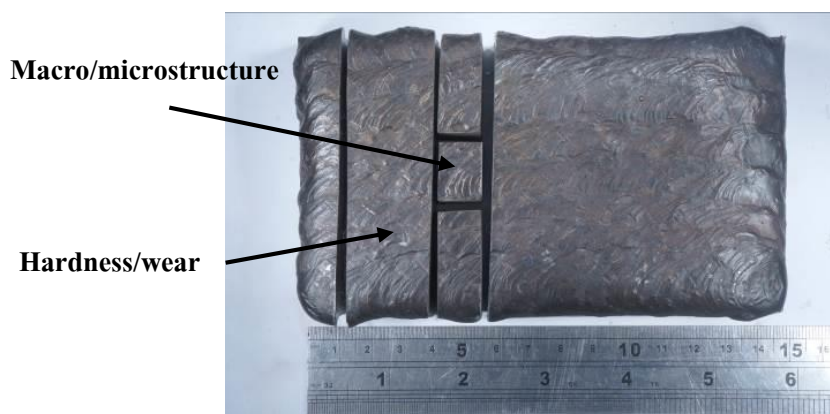


รูปที่ 3.25 ชิ้นงานหลังการเชื่อม

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

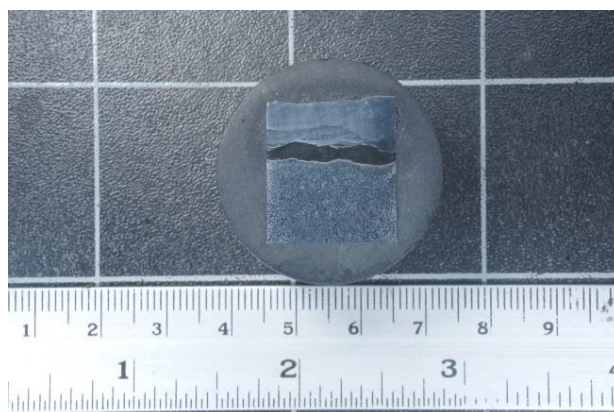
ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

3.5.1 ตัดชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทั้ง 15 กรณี ในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม บริเวณตรงกลางชิ้นงานเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.26 ให้มีขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร เพื่อตรวจสอบ โครงสร้างบริเวณภาคตัดขวาง



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานหลังการตัด

3.5.2 ทำเร็นแบบร้อน (Hot mounting) กับชิ้นทดสอบทั้ง 15 เงื่อนไข เพื่อสะดวกในการจับถือ แสดงดังรูปที่ 3.27 โดยใช้ผงเบเคอร์ไลต์ (Bakelite) เป็นตัวเร็น ใช้เวลาในการทำเร็น 5 นาที ที่ความดัน 29 MPa และอุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 3.27 ชิ้นงานที่ทำเร็นแบบร้อน

3.5.3 ขัดชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P80, P120, P180, P360, P600, P800, P1200 และ P2500 ตามลำดับ

3.5.4 ขัดชิ้นทดสอบด้วยผ้าสักหลาดและผงอลูมินาขนาดอนุภาค 5 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.28 แล้วจึงล้างชิ้นงานให้สะอาด ทำให้แห้ง และเก็บไว้ใน โถดูดความชื้น (Desiccator)



รูปที่ 3.28 การขัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา

3.5.5 นำชิ้นทดสอบมากัดผิวหน้าด้วยน้ำยาเคมี โดยวิธีการจุ่มลงในน้ำยาเคมีแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้ง สำหรับวิธีการกัดผิวชิ้นงานในแต่ละบริเวณมีดังต่อไปนี้

(1) บริเวณโลหะฐาน ใช้สารละลาย 2 % Nital ระยะเวลาในการจุ่มในสารละลาย 5 วินาที

(2) บริเวณชั้นรองพื้น ใช้สารละลาย Viella's ระยะเวลาในการจุ่มในสารละลาย 1 วินาที (ใช้สำหรับถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคได้เช่นกัน)

(3) บริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (1st Hardfacing) ใช้สารละลาย 10% Nital ระยะเวลาในการจุ่มในสารละลาย 10 นาที

(4) บริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และ 3 (2nd and 3rd Hardfacing) ใช้สารละลาย 2 % Nital ระยะเวลาในการจุ่มในสารละลาย 3 นาที

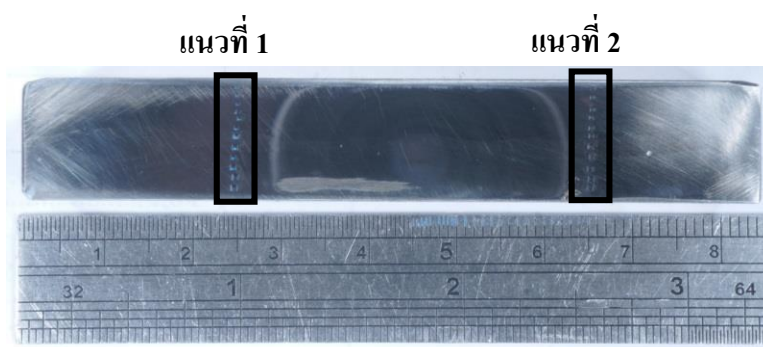
(5) ในกรณีการเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้น ใช้สารละลายกรด 2 % Nital ระยะเวลาในการจุ่มสารละลายกรด 5 วินาที สามารถถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคได้ในทุกบริเวณ

(6) ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนชนิดของสารละลายสำหรับกัดผิวหน้าขึ้นทดสอบ ต้องเริ่มต้นทำในขั้นตอนที่ 3.5.4 ก่อนเพื่อขัดทำความสะอาดสารละลายชนิดเดิมออก

3.5.6 ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.6 การตรวจสอบค่าความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการตรวจสอบระดับมหภาค โดยใช้เครื่อง Vickers hardness (HV) ที่มีแรงกด 100 kgf ทดสอบขึ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็ง โดยวัดค่าความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของแนวเชื่อมตั้งแต่โลหะฐาน บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ไปจนถึงชั้นพอกแข็งชั้นบนสุด ซึ่งวัดทุกๆ 1 มิลลิเมตร แต่ละจุดจะกดค้างไว้ 10 วินาที โดยวัดเป็นจำนวน 2 แนว แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การวัดค่าความแข็ง

3.7 การตรวจสอบการสึกหรอ

3.7.1 นำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว ไปตัดในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อมให้มีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกัดบริเวณผิวชั้นพอกแข็ง ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง ลักษณะขึ้นทดสอบการสึกหรอแสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ชิ้นทดสอบการสึกหรอ

3.7.2 ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4

3.7.3 การทดสอบการสึกหรอ ทดสอบโดยใช้ทดสอบเครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะเสียดสีระหว่างทรายที่มีขนาด 212-300 ไมโครเมตรกับล้อยาง โดยทรายที่ใช้ทดสอบต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ใช้อัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบที่กดลงบนชิ้นงาน 13.5 กิโลกรัม ล้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ทดสอบจนได้ระยะทางในการเสียดสี 4000 เมตร

3.7.4 ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นผลการวิเคราะห์การสึกหรอของฟันไม้อชนิดไม้เดี่ยว ส่วนที่สองเป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะฐาน ส่วนที่สามเป็นการผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเชื่อมแต่ละเงื่อนไข และส่วนที่สี่เป็นผลการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การทดสอบความแข็งและการสึกหรอ รวมถึงการวิจารณ์ผลทั้งหมด

4.1 การวิเคราะห์การสึกหรอ

ไม้เดี่ยวผลิตมาจากเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยผลิตเป็นชิ้นวงแหวน ในแต่ละวงมีฟันไม้ 5 ฟัน แล้วนำมาประกอบกันเป็นไม้เดี่ยว โดยหนึ่งไม้มีวงแหวนฟันไม้ทั้งหมด 6 วง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไม้เดี่ยวที่ผลิตมาจากเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

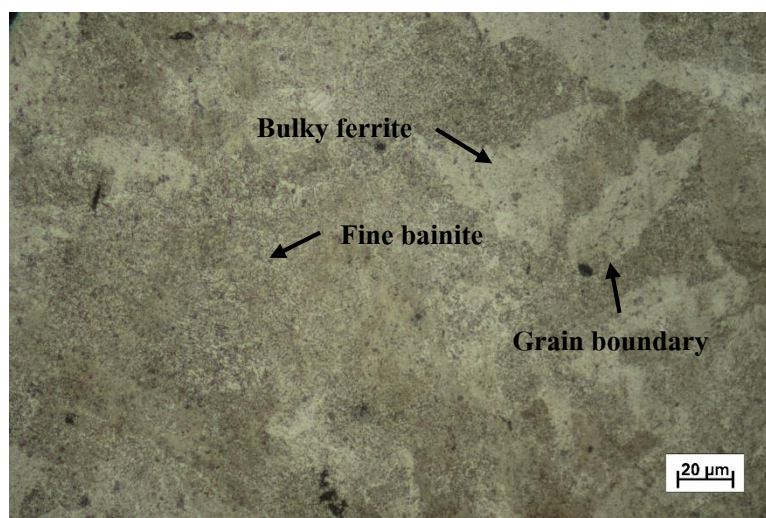
จากการศึกษาร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเหมืองแม่เมาะ พบว่าการสึกหรอ ที่เกิดกับไม้เดี่ยวในแต่ละฟันเป็นแบบครูด มีลักษณะสม่ำเสมอ แต่ฟันไม้ที่อยู่บริเวณตรงกลาง (ฟันที่ 3 และ 4) จะมีการสึกหรอมากกว่าฟันไม้ที่อยู่ด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบการสลักห่อของโม้เดี่ยว

4.2 โลหะฐาน

4.2.1 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ซึ่งผ่านกระบวนการอบคืนตัวแสดงดังรูปที่ 4.3 และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี (Optical Emission Spectrometer, OES) แสดงดังตารางที่ 4.1 (ผลการตรวจสอบอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม กำลังขยาย 500 เท่า

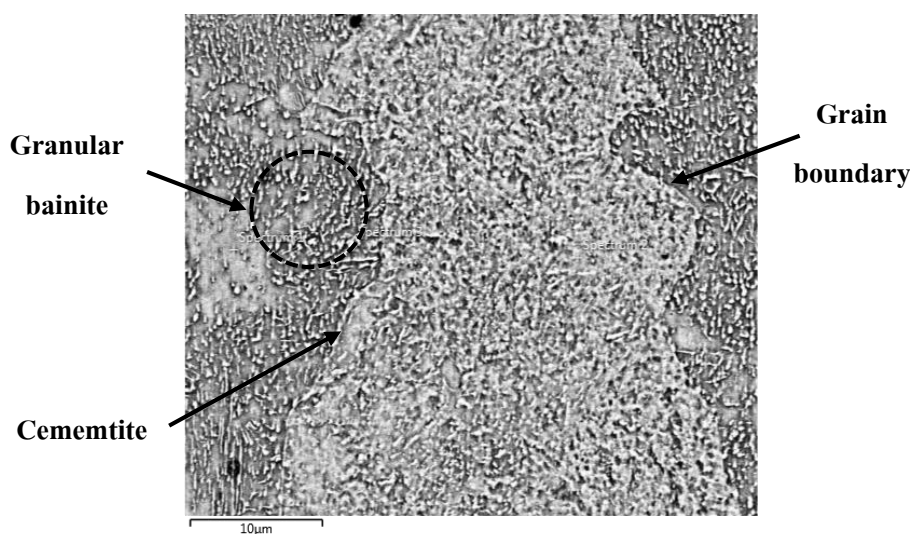
ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ และมีการก่อรูปร่างเบนไนต์ที่ละเอียดเกิดขึ้น โดยโครงสร้างเฟอร์ไรต์คือบริเวณเฟสสีทึบ ส่วนโครงสร้างเพอร์ไรต์คือบริเวณเฟสสีขาว ซึ่งยืนยันได้จากธาตุผสมหลักของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม คือ เหล็ก โครเมียม คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส และ โมลิบดีนัม โดยเฉพาะโครเมียมที่ทำให้เกิดโครงสร้าง

เฟอร์ไรต์อยู่แล้ว ประกอบกับปริมาณ 0.4% คาร์บอน ซึ่งเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอนแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างสุดท้ายเหล็กจะประกอบด้วยเหล็กเฟอร์ไรต์ 50% และเหล็กเพอร์ไรต์ 50% ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พิสูจน์ว่าเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์เช่นกัน

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของธาตุแบบจุด แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าโครงสร้างมีการก่อรูปร่างเบนไนต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ กระจายอยู่ในเนื้อโลหะฐาน ซึ่งมีโครงสร้างซิเมนไทต์ (Fe_3C) ลักษณะเป็นแท่งเล็กๆยาวไปตามขอบเกรน จากการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีพบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของธาตุในเนื้อโลหะฐาน

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม (% น้ำหนัก)

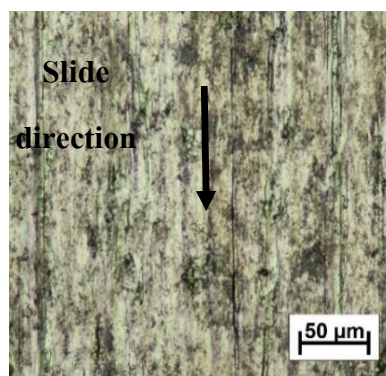
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.41	0.68	0.66	0.17	3.10	0.28	0.15	Balance



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม กำลังขยาย 3,000 เท่า

4.2.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็งของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม พบว่ามีค่าความแข็งจากการวัดครั้งที่ 1 เท่ากับ 202.55 HV วัดครั้งที่ 2 เท่ากับ 209.15 HV วัดครั้งที่ 3 เท่ากับ 213.25 HV ดังนั้นค่าเฉลี่ยจึงเท่ากับ 208.32 HV

4.2.3 ผลการตรวจสอบการสึกหรอของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยวัดค่าจากน้ำหนักที่หายไปซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.7613 กรัม และมีค่าความต้านทานการสึกหรอเท่ากับ 1.56 เมตรต่อมิลลิกรัม สำหรับลักษณะของผิวที่เกิดการสึกหรอจะเป็นแบบตัด และแบบแตก แสดงดังรูปที่ 4.5



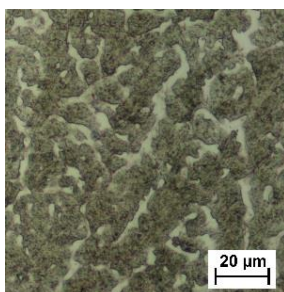
รูปที่ 4.5 ลักษณะผิวที่สึกหรอของโลหะฐาน

4.3 การเชื่อมพอกแข็งเจือไนไมเชื่อมชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1H) RT (2H) RT และ (3H) RT]

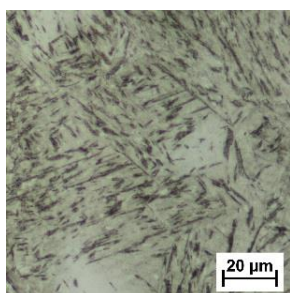
4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่ไม่มีชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยโครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.6 (ค)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งมีความหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศ และไม่พบรอยแตกบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน สำหรับโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.6 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกที่แทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติกเช่นเดิม รูปที่ 4.6 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซด์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบร้อน ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Transformation) จากเนื้อโลหะเดิมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เพอร์ไรต์และเบน

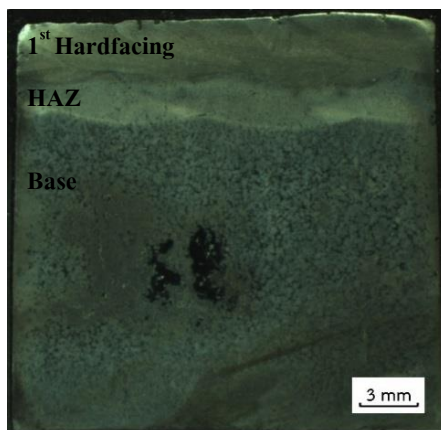
ไนต์ เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.6 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ โลว์ไรต์และเบนไนต์



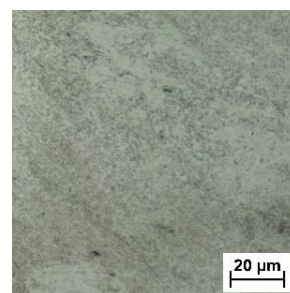
(ก) 1st Hardfacing



(ข) HAZ



(ค) Macrostructure

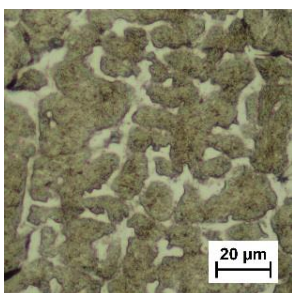
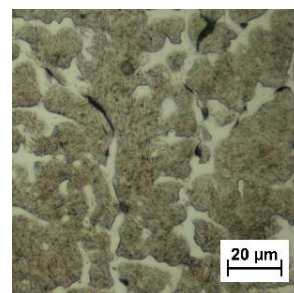
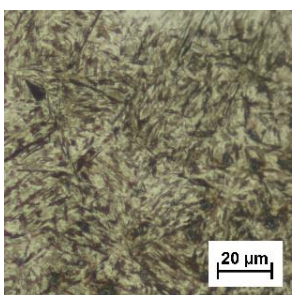


(ง) Base metal

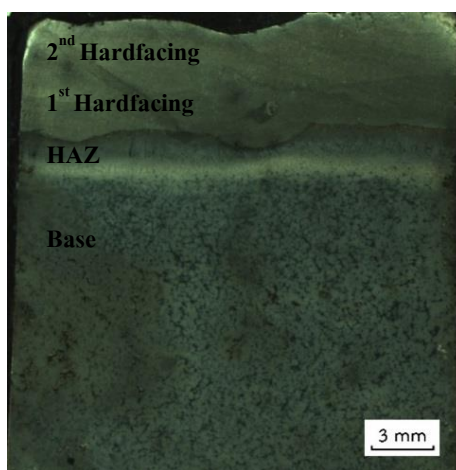
รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ที่ไม่มีชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(2H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยโครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.7 (ง)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศ และไม่พบรอยแตกบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน สำหรับโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตามลำดับ โดยมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเหมือนกัน คือ มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนไซต์ที่แทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์

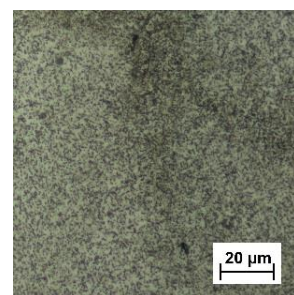
เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก แต่เฟสออสเทนิติกที่บริเวณขอบเกรนจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าการเชื่อมกรณีเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น [(1H) RT] ซึ่งเกิดจากความร้อนสะสมที่มากขึ้นจากการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2 ทำให้อัตราการเย็นตัวจึงช้ากว่า ส่งผลให้เฟสออสเทนิติกสามารถก่อรูปร่างได้มากขึ้น รูปที่ 4.7 (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเนื้อโลหะเดิมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.7 (จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

(ก) 1st Hardfacing(ข) 2nd Hardfacing

(ค) HAZ



(ง) Macrostructure

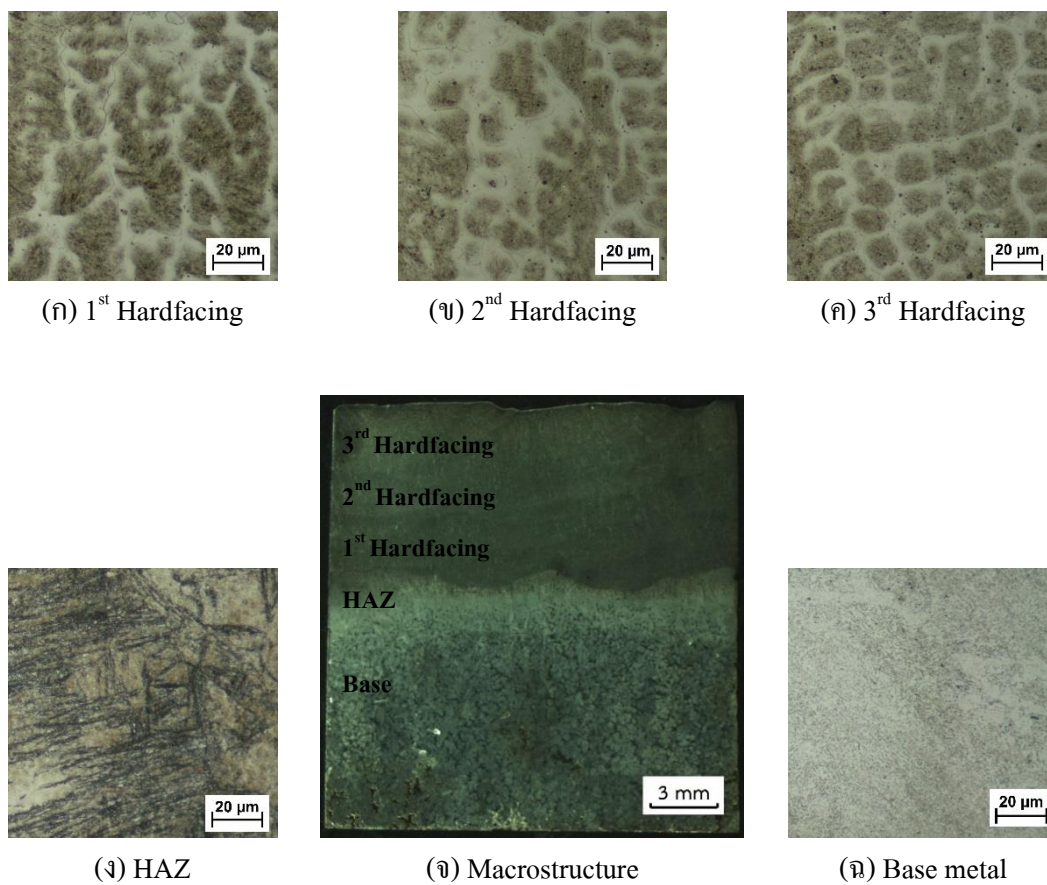


(จ) Base metal

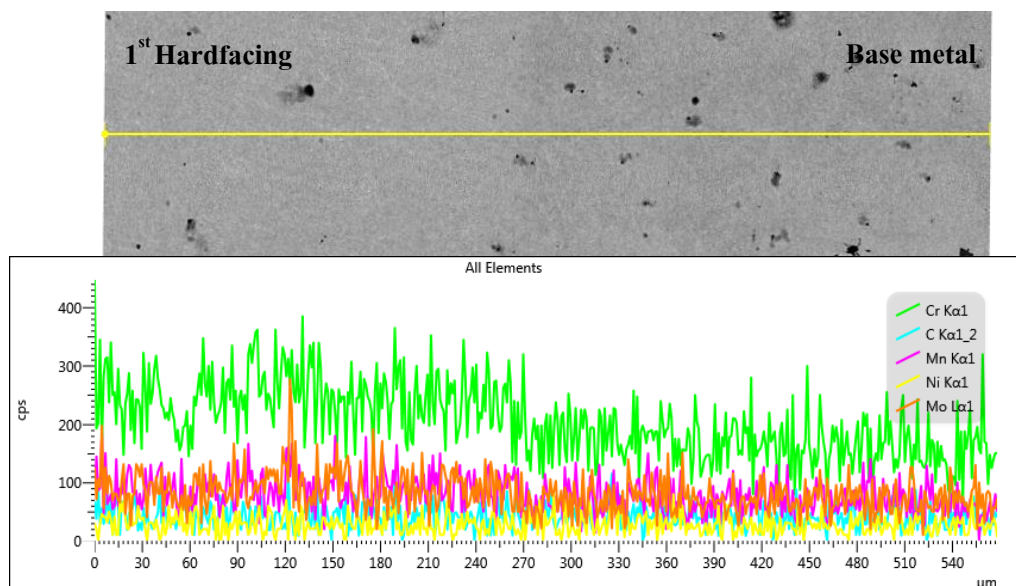
รูปที่ 4.7 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (2H) RT

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่ไม่มีชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(3H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยโครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.8 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ไม่มีรอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศ และไม่พบรอยแตกบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.8 (ก) ถึง (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ โดยมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกัน คือ มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกที่แทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค ลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก แต่เฟสออสเทนนิคที่บริเวณขอบเกรนจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าการเชื่อมกรณีเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น [(1H) RT] และ 2 ชั้น [(2H) RT] ตามลำดับ เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็งสามชั้นจะมีความร้อนสะสมจากการเชื่อมมากที่สุด เฟสออสเทนนิคจึงก่อรูปร่างได้มากขึ้น โดยเฉพาะในชั้นพอกแข็งที่ 1 และ 2 ที่สังเกตเห็นเฟสออสเทนนิคได้ชัดเจนกว่าชั้นพอกแข็งที่ 3 รูปที่ 4.8 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซด์ของบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซด์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเกิดมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์เพอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซด์ ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.8 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เพอร์ไรต์และเบนไนต์

ผลการวิเคราะห์การเจือจางของธาตุระหว่างชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน แสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลการวิเคราะห์ EDX line-scan พบว่าการกระจายตัวของธาตุผสมที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และ โมลิบดีนัม ในเนื้อโลหะทั้ง 2 บริเวณมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และโลหะฐานมีปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 บริเวณเกิดการผสมกันของธาตุน้อยหรือการเจือจางต่ำ ทำให้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และบริเวณโลหะฐานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรวมถึงสมบัติทางกล ซึ่งสามารถยืนยันด้วยค่าความแข็งและผลการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (3H) RT



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน

4.3.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง

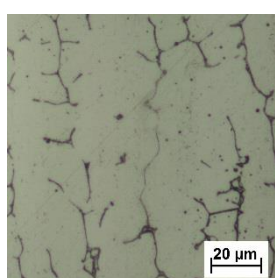
ค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงดังอย่างละเอียดในภาคผนวก ค ความแข็งบริเวณโลหะฐาน ผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และชั้นพอกแข็งของการเชื่อมทั้ง 3 เงื่อนไข มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งของโลหะฐานมีค่าประมาณ 200-210 HV ค่าความแข็งของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีค่าประมาณ 300-550 HV ซึ่งสูงกว่าโลหะฐาน เนื่องบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระหว่างการเชื่อม สำหรับค่าความแข็งของชั้นพอกแข็งทั้งสามชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 670 HV ชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 717 HV และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 690 HV

4.4 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1B-1H) RT (1B-2H) RT และ (1B-3H) RT]

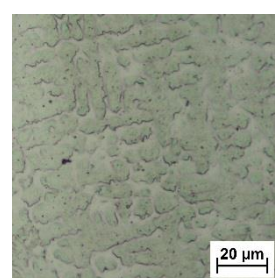
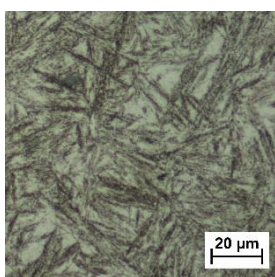
4.4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคสร้างจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1B-1H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.10 (ง)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น ที่แสดงว่าชั้นรองพื้นทำหน้าที่เป็นชั้นยึดที่ติดระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน โดยไม่แสดงรอยแตกร้าวให้เห็นในชั้นรองพื้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็นในชั้นพอกแข็งเช่นกัน ส่วนบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.10 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติกที่มีโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโอเบียม เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก ซึ่งการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นจะสังเกตเห็นเฟสมาร์เทนซิติกได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างออสเทนนิติกที่มีลักษณะเดนไดรต์ เป็นเนื้อหลักและมีขอบเกรนเป็นเคลต้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคดเคี้ยวไปมา แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) เนื่องจากใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก โดยชั้นพอกแข็งจะเกิดการเจือจางมาก เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิติกผสมกับมาร์เทนซิติกมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไขที่ไม่มีชั้นรอง

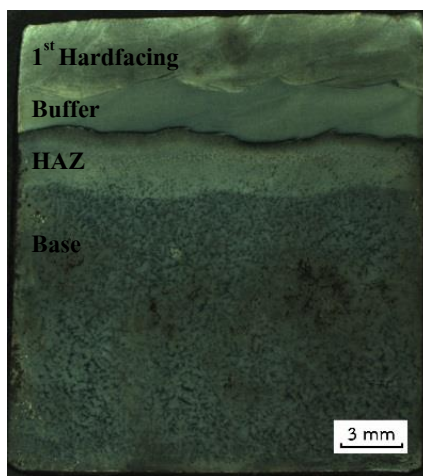
พื้น (1H) RT รูปที่ 4.10 (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นผลของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม โดยความร้อนที่สูงจากการเชื่อมทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคในสถานะของแข็ง โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.11 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์



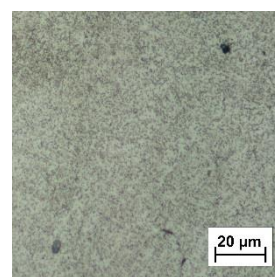
(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing

(ค) HAZ



(ง) Macrostructure

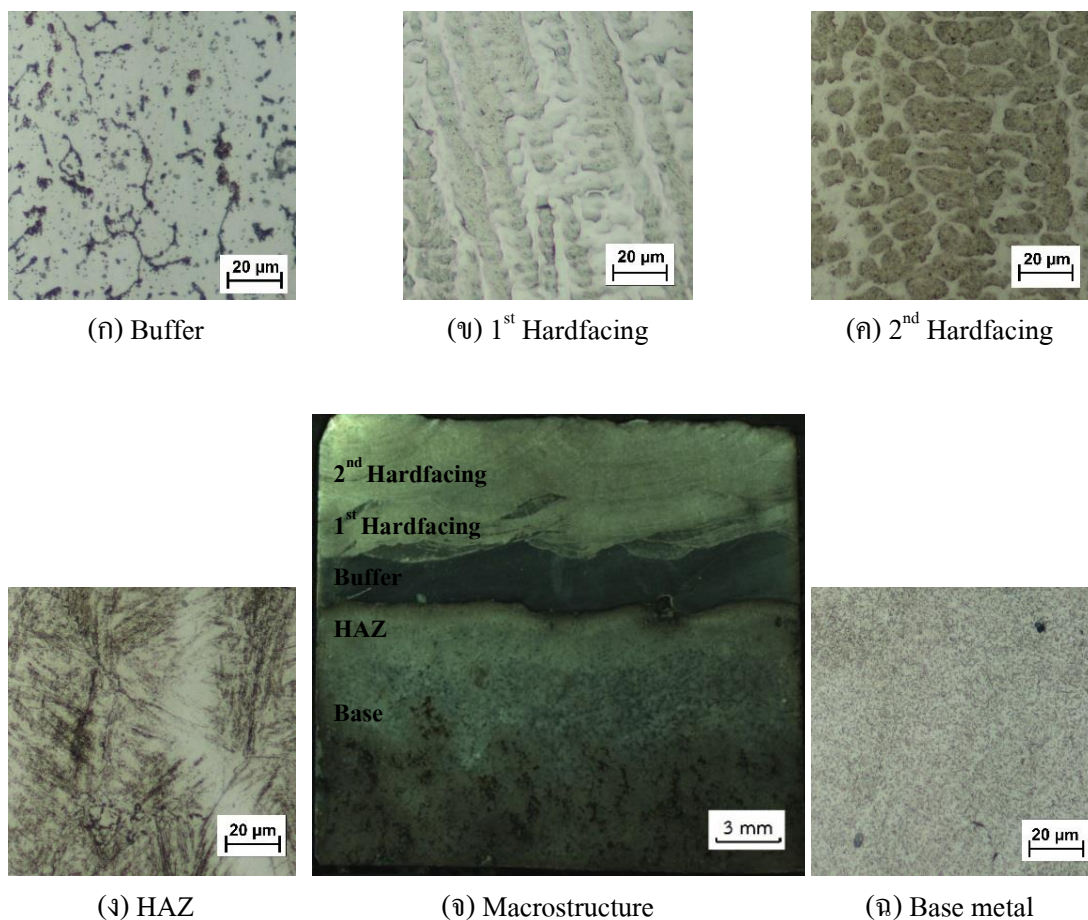


(จ) Base metal

รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) RT

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1B-2H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งลักษณะโดยรวมจะมีลักษณะทำนองเดียวกันกับการเชื่อมเงื่อนไขก่อนหน้านี้นี้ แต่จะแตกต่างกันที่จำนวนของชั้นพอก

แข็ง โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.11 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น ที่แสดงว่าชั้นรองพื้นทำหน้าที่เป็นชั้นยึดที่ค้ำระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน โดยไม่แสดงรอยแตกร้าวให้เห็นในชั้นรองพื้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็นในชั้นพอกแข็งเช่นกัน ส่วนบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.11 (ข) และ (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติคแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติคที่มีโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโอเบียม เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติคเช่นเดิม โดยชั้นพอกแข็งที่ 2 จะมีเฟสมาร์เทนซิติคที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากกว่าชั้นที่ 1 เนื่องจากชั้นพอกแข็งที่ 1 เกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งชั้นรองพื้นมีโครงสร้างชนิดออสเทนนิคที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายๆ ไปมา แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) เนื่องจากใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิค โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติคมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะเกิดการเจือจางน้อยลง เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น การเจือจางจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ค่าในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆ เพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของ (1B-2H) RT ต่ำกว่า (2H) RT รูปที่ 4.11 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นผลของมาร์เทนไซด์ เฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม โดยความร้อนที่สูงจากการเชื่อมทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคในสถานะของแข็ง โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซด์ ที่มีสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.11 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

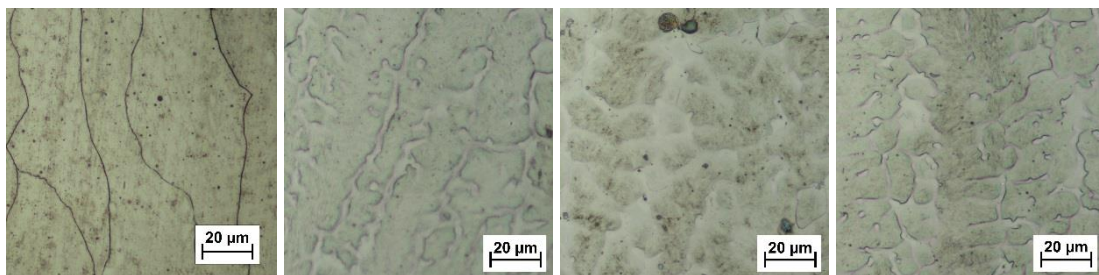


รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) RT

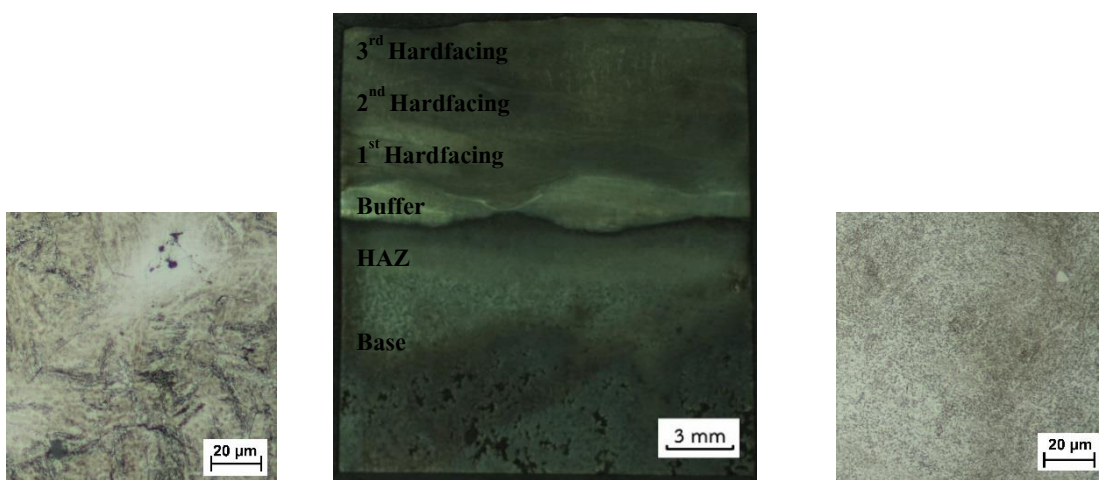
ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม [(1B-3H) RT] แสดงดังรูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.12 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความกว้างประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าว รูปที่ 4.12 (ข) ถึง (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ ที่มีโครงสร้างมาร์เทนซิติคแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติค เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติค ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีเฟสมาร์เทนซิติคที่ละเอียด

และเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และ นิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งชั้นรองพื้นเป็นชั้นที่มีโครงสร้างอสเทนนิกที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายไปมา แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก) โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสอสเทนนิกผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะเกิดการเจือจางลดลงตามลำดับ เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของ (1B-3H) RT ต่ำกว่า (3H) RT รูปที่ 4.12 (จ) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสอสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.12 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

ผลการวิเคราะห์การเจือจางของธาตุระหว่างชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น แสดงดังรูปที่ 4.13 จากผลการวิเคราะห์ EDX line scan พบว่าการกระจายตัวของธาตุผสม เช่น โครเมียม แมงกานีส นิกเกิล และโมลิบดีนัม ในเนื้อโลหะทั้ง 2 บริเวณมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นรองพื้นเป็นโลหะคนละชนิดกัน แต่ถ้าเปรียบเทียบปริมาณธาตุผสม เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ของการเชื่อมเงื่อนไข (3H) RT กับการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT พบว่าปริมาณธาตุผสมของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT มีปริมาณมากกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าธาตุผสมที่เพิ่มมากขึ้นนั้นมาจากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเจือจางของเนื้อเชื่อม เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ ทำให้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม รวมถึงสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมด้วย ซึ่งสามารถยืนยันด้วยค่าความแข็งและผลการทดสอบการสึกหรอเช่นกัน



(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing(ค) 2nd Hardfacing(ง) 3rd Hardfacing

(จ) HAZ

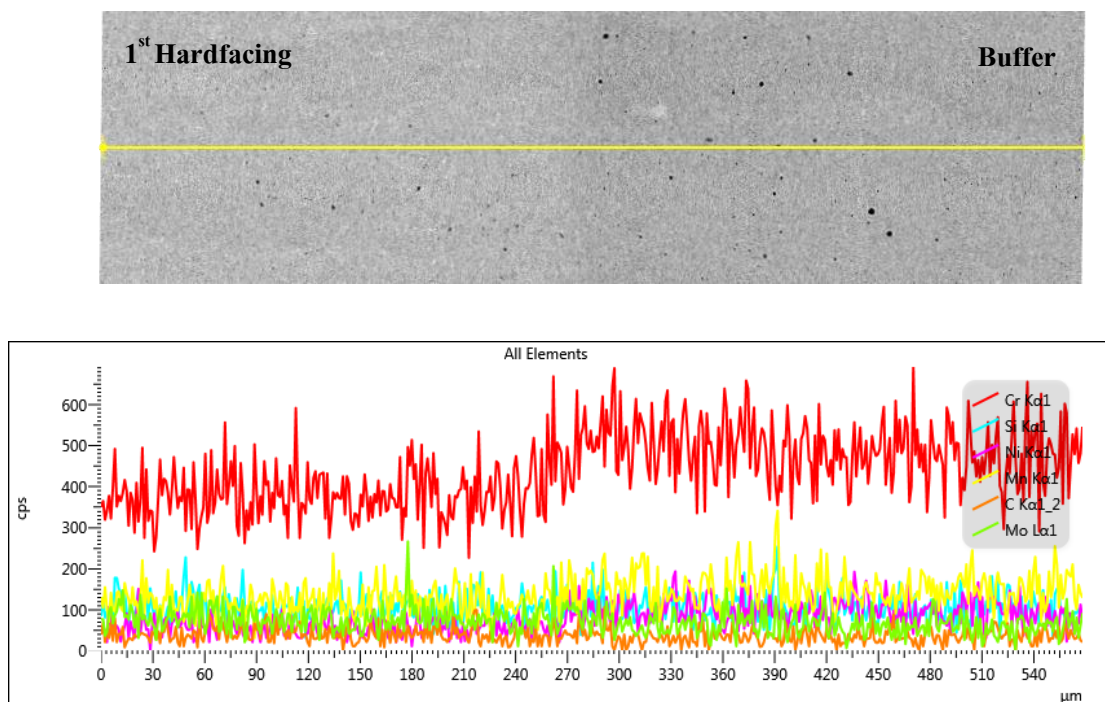
(ฉ) Macrostructure

(ช) Base metal

รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT

4.4.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง

ค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงอย่างละเอียดในภาคผนวก ค โดยความแข็งบริเวณ โลหะฐาน ผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และชั้นรองพื้นของทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งของโลหะฐานมีค่าประมาณ 200-210 HV ค่าความแข็งบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีค่าประมาณ 260-400 HV ค่าความแข็งของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 230-250 HV สำหรับความแข็งของชั้นพอกแข็งพบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นจากชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 ตามลำดับ เนื่องจากชั้นพอกแข็งเกิดการเจือจางของธาตุที่ได้รับมาจากชั้นรองพื้น โดยความแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 416 HV ชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 560 HV และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 670 HV



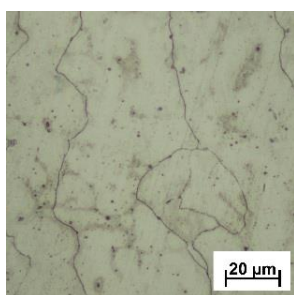
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับชั้นรองพื้น

4.5 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุ่นขึ้นงาน 250 °C [(1B-1H) 250 (1B-2H) 250 และ (1B-3H) 250]

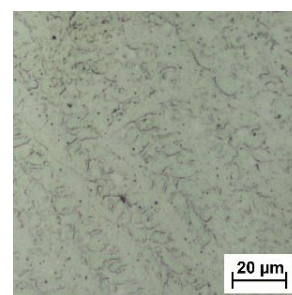
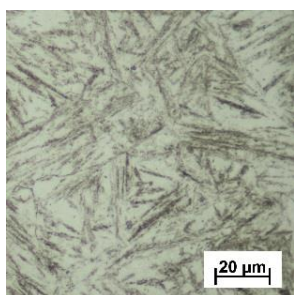
4.5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C [(1B-1H) 250] แสดงดังรูปที่ 4.14 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.14 (ง)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆ ให้เห็น บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.14 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก ซึ่งการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นจะสังเกตเห็นเฟสมาร์เทนซิติกได้ไม่ค่อยชัดเจน เนื่องจากเกิดการเงื้องาจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นรองพื้น โครงสร้างออสเทนนิติก

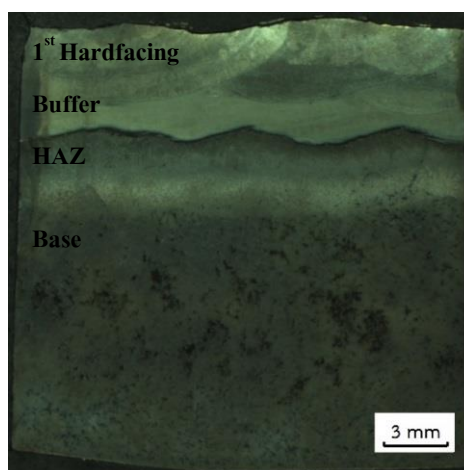
ที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลดำเฟอร์ไรต์ ลักษณะคดเคี้ยวไปมา แสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) โดยชั้นพอกแข็งจะเกิดการเจือจางมากเนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT รูปที่ 4.14 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์โลดเฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.14 (จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์โลดเฟอร์ไรต์และเบนไนต์



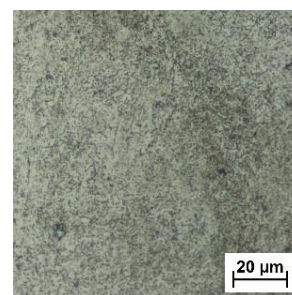
(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing

(ค) HAZ



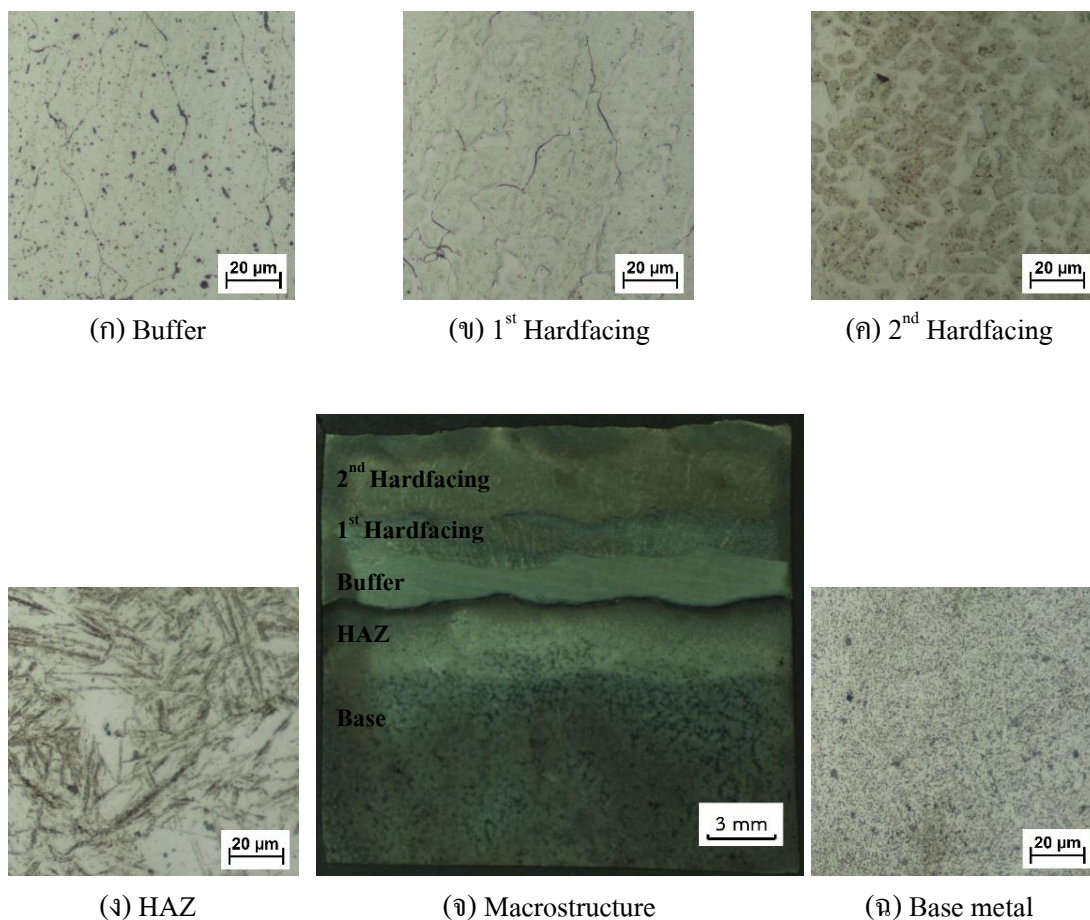
(ง) Macrostructure



(จ) Base metal

รูปที่ 4.14 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 250

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C [(1B-2H) 250] แสดงดังรูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.15 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.15 (ข) และ (ค) แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก โดยชั้นพอกแข็งที่ 2 จะมีเฟสมาร์เทนซิติกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนกว่าชั้นที่ 1 เนื่องจากเกิดการเงือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งชั้นรองพื้นมีโครงสร้างออสเทนนิติกที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายไปมา แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกันในขณะเชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วน แล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเงือจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิติกผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะเกิดการเงือน้อยลง เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น การเงือจางของธาตุจึงลดน้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของ (1B-2H) 250 ต่ำกว่า (2H) RT รูปที่ 4.15 (ง) แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นผลของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสของโครงสร้างออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.15 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์



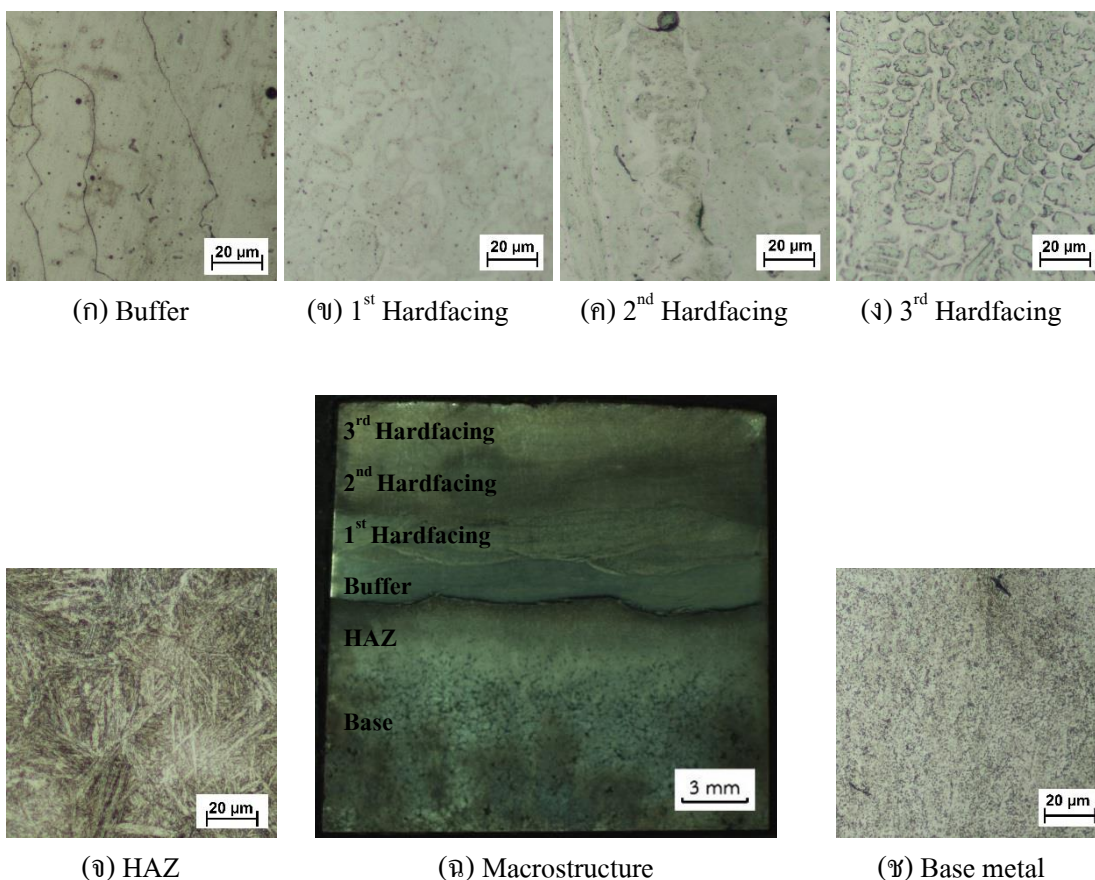
รูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 250

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C [(1B-3H) 250] แสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งลักษณะโดยรวมจะมีลักษณะทำนองเดียวกันกับการเชื่อมเงื่อนไขก่อนหน้านี้ แต่จะแตกต่างกันที่จำนวนของชั้นพอกแข็ง โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.16 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้นที่แสดงว่าชั้นรองพื้นทำหน้าที่เป็นชั้นยึดที่ค้ำระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น โดยเฉพาะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.16 (ข) ถึง (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติคแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรน

เป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีเฟสมาร์เทนซิติกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างออสเทนนิคที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายๆ ไปมา แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะเกิดการเจือจางน้อยลงตามลำดับ เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆ เพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของ 3 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของ (1B-3H) 250 ต่ำกว่า (3H) RT รูปที่ 4.16 (จ) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซด์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซด์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.16 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์

4.5.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง

ค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงดังภาคผนวก ค ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน ผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และชั้นรองพื้นของการเชื่อมทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งของโลหะฐานมีค่าประมาณ 200-210 HV ค่าความแข็งของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีค่าประมาณ 260-510 HV ค่าความแข็งของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 240-250 HV สำหรับความแข็งของชั้นพอกแข็งพบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นจากชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 3 เนื่องจากชั้นพอกแข็งเกิดการเจือจางของธาตุที่ได้รับมาจากชั้นรองพื้น โดยความแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 433 HV ชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 549 HV และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 624 HV



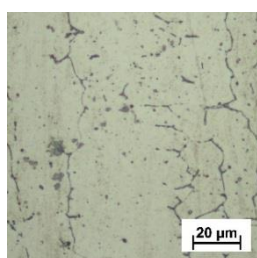
รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 250

4.6 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุ่นชิ้นงาน 300 °C [(1B-1H) 300 (1B-2H) 300 และ (1B-3H) 300]

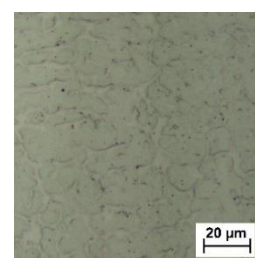
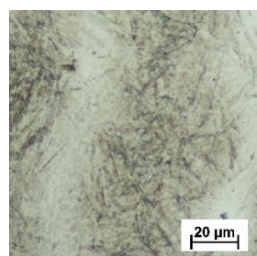
4.6.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300 °C [(1B-1H) 300] แสดงดังรูปที่ 4.17 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.17 (ง)) แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.17 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลาย

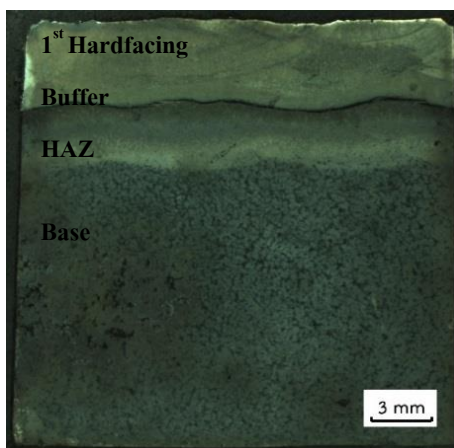
แล้วแข็งตัว ก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติค ซึ่งการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นจะสังเกตเห็นเฟสมาร์เทนซิติคได้ไม่ค่อยชัดเจน เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดออสเทนนิติกที่มีลักษณะเคนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเขตด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคดเคี้ยวไปมา แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก)) โดยชั้นพอกแข็งจะเกิดการเจือจางมาก เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติคมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT รูปที่ 4.17 (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซด์ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ โฟร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซด์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.17 (จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ โฟร์ไรต์และเบนไนต์



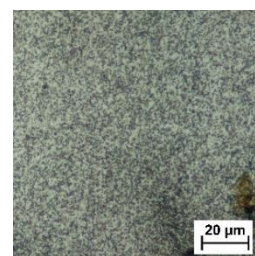
(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing

(ค) HAZ



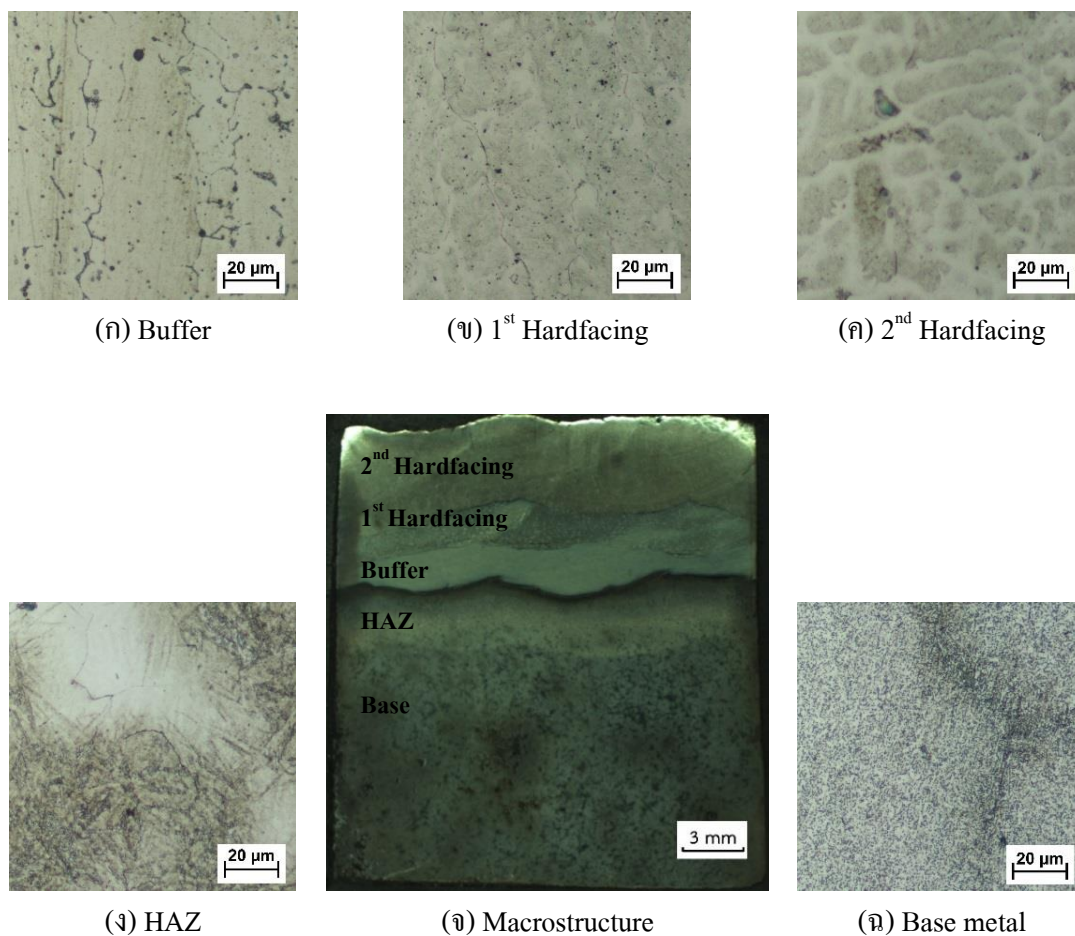
(ง) Macrostructure



(จ) Base metal

รูปที่ 4.17 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 300

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 300 °C [(1B-2H) 300] แสดงดังรูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.18 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น โดยเฉพาะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเคนไดรด์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะมีเฟสมาร์เทนซิติกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากกว่าชั้นที่ 1 เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดออสเทนไนต์ที่มีลักษณะเคนไดรด์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายไปมา แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะเกิดการเจือจางน้อยลง เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น การเจือของธาตุจึงลดน้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 300 ต่ำกว่าเงื่อนไข (2H) RT รูปที่ 4.18 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์ ของบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.18 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

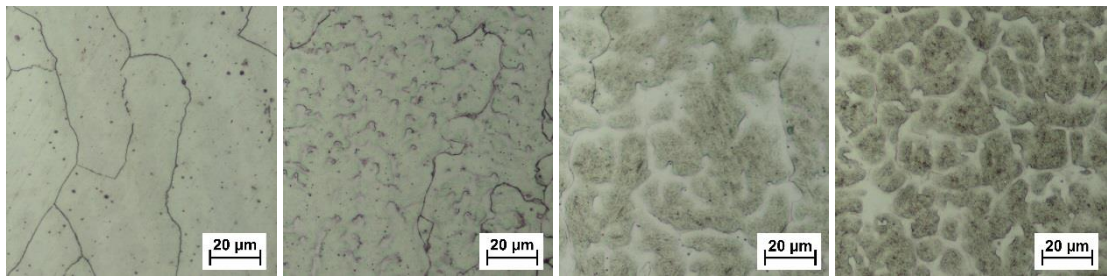


รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 300

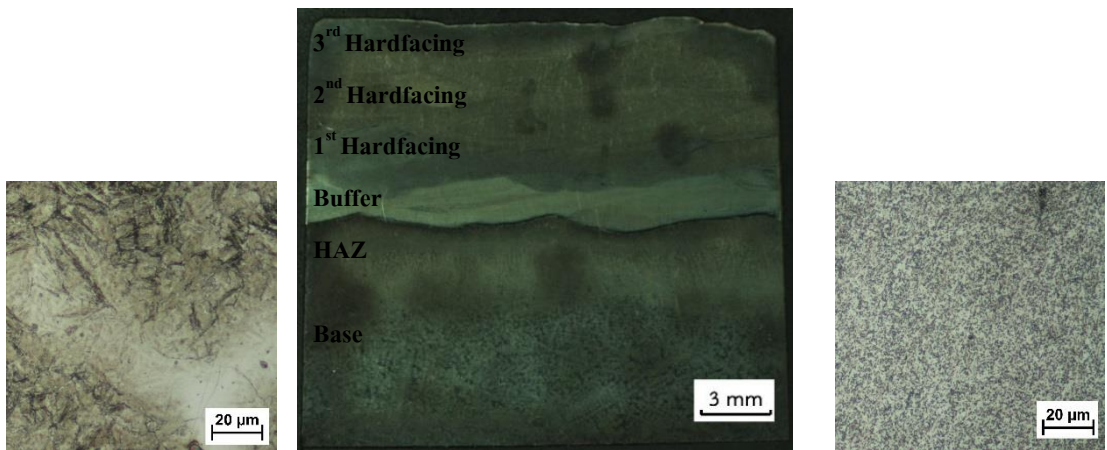
ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300 °C [(1B-3H) 300] แสดงดังรูปที่ 4.19 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.19 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน มีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าว รูปที่ 4.19 (ข) ถึง (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในออสเทนซิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีเฟสมาร์เทนซิ

ดึกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเงื้องาจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดอสเทนิติกที่มีลักษณะเด่น ไรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคดเคี้ยวไปมา แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเงื้องาจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดเฟสอสเทนิติกผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะเกิดการเงื้องาจางน้อยลงตามลำดับ เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 300 ต่ำกว่าเงื่อนไข (3H) RT เช่นกัน รูปที่ 4.19 (จ) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสอสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.19 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

รูปที่ 4.20 ถึง รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นพอกแข็ง ชั้นรองพื้นและบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจสอบบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (รูปที่ 4.20 ก) และชั้นที่ 2 (รูปที่ 4.20 ข) พบว่าบริเวณที่มีสีทึบคือเฟสของมาร์เทนซิติกที่มีปริมาณของเหล็ก คาร์บอนและโมลิบดีนัมมากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนบริเวณเฟสสีขาวซึ่งเป็นเฟสของอสเทนิติกจะมีปริมาณโครเมียมและแมงกานีสมาก สำหรับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (รูปที่ 4.21 ก) ก็ยังคงมีโครงสร้างมาร์เทนซิติกที่แทรกอยู่ในเฟสอสเทนิติก แต่พบว่าปริมาณของธาตุที่ทำให้เกิดโครงสร้างอสเทนิติกมีมากขึ้น เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล ซึ่งเป็นผลมาจากการเงื้องาจางจากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีปริมาณธาตุดังกล่าวมากอยู่แล้ว สำหรับบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (รูปที่ 4.22) ที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบเข็ม ไม่พบความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของในแต่ละบริเวณที่มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากความร้อนในสถานะของแข็งเพียงอย่างเดียว แต่องค์ประกอบทางเคมียังคงเหมือนกันกับเนื้อโลหะเดิม (เหล็กกล้า 3.5% โครเมียม)

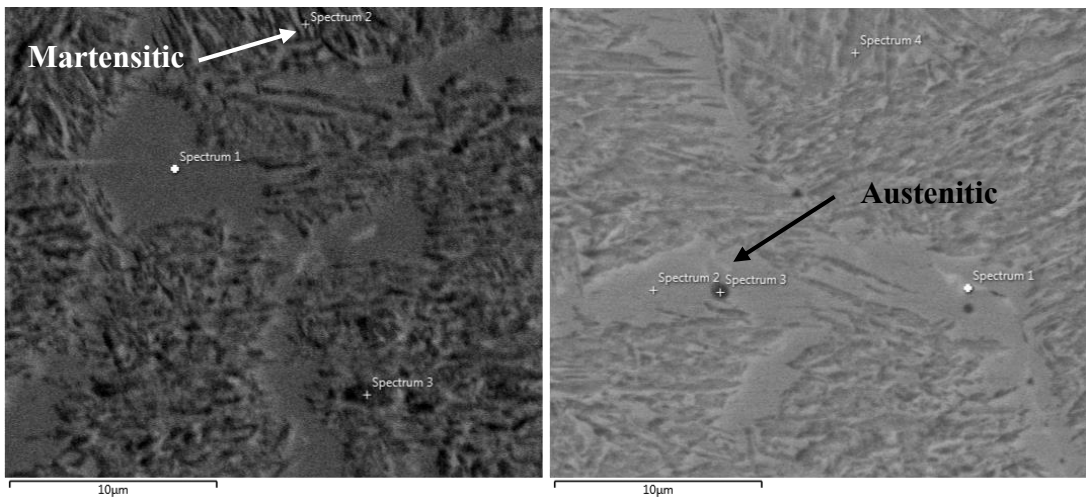


(ก) Buffer (ข) 1st Hardfacing (ค) 2nd Hardfacing (ง) 3rd Hardfacing



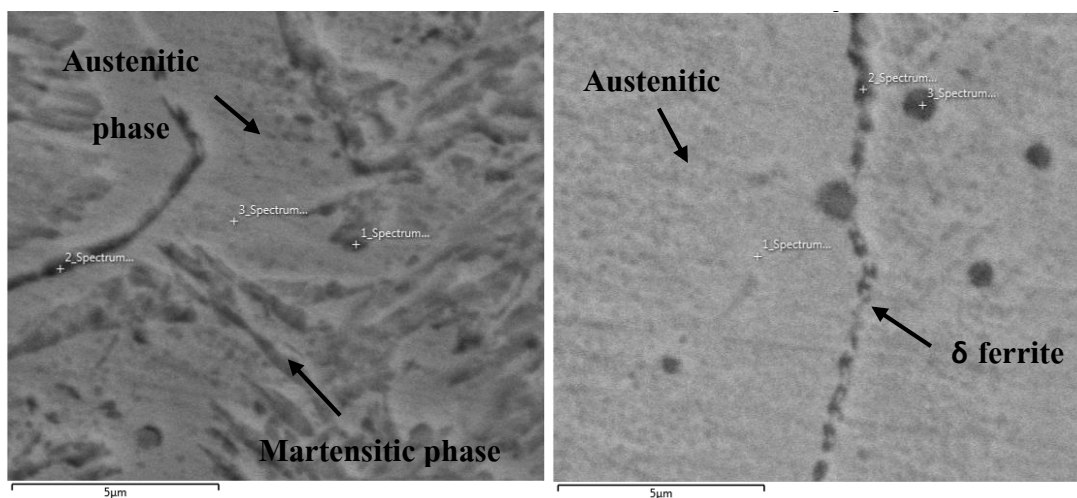
(จ) HAZ (ฉ) Macrostructure (ช) Base metal

รูปที่ 4.19 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมโลหะ (1B-3H) 300



(ก) (ข)

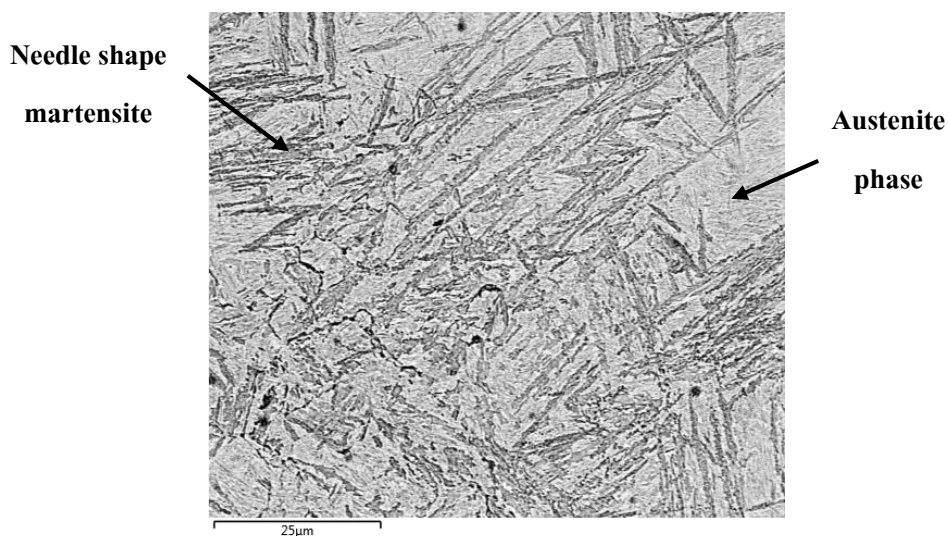
รูปที่ 4.20 โครงสร้างมาร์เทนซิติคของชั้นพอกแข็ง (ก) ชั้นที่ 3 (ข) ชั้นที่ 2



(ก)

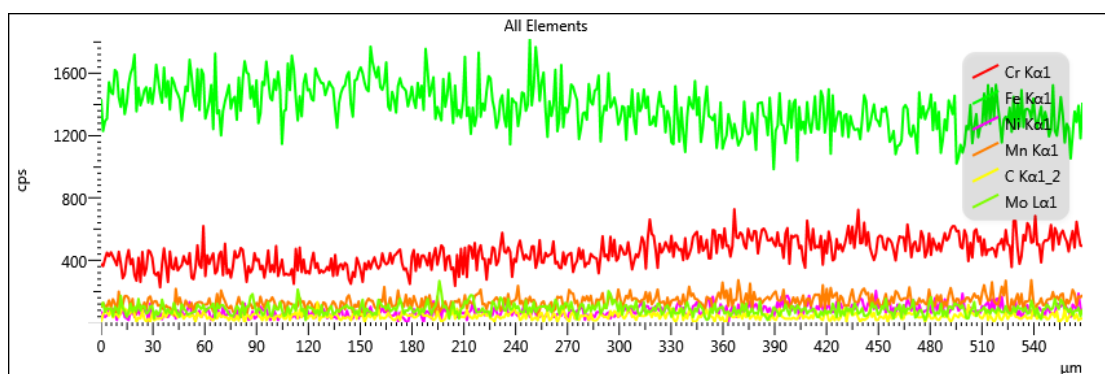
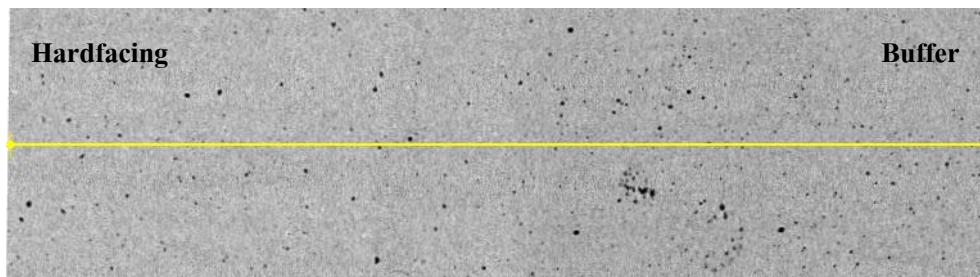
(ข)

รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (ก) โครงสร้างมาร์เทนซิติคบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1
(ข) โครงสร้างออสเทนนิติคบริเวณชั้นรองพื้น

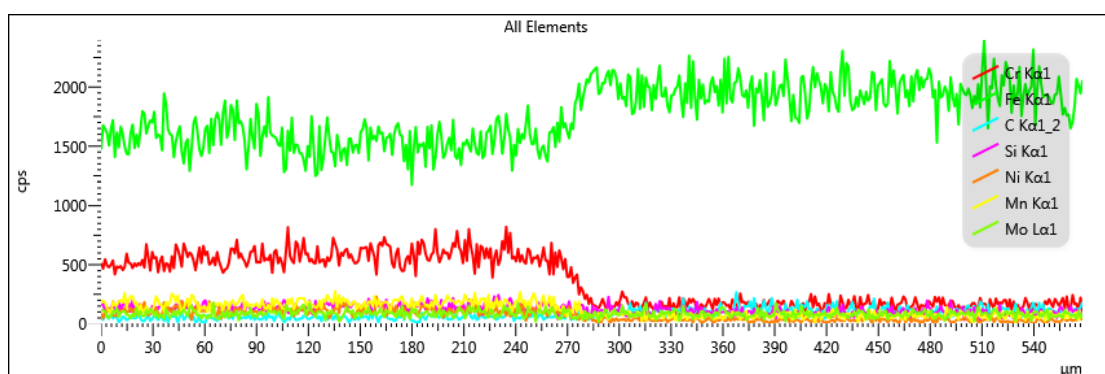
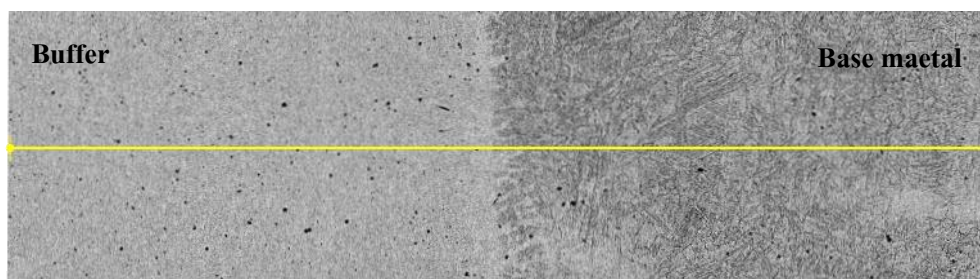


รูปที่ 4.22 โครงสร้างมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน

ผลการทำ EDX line scan ของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 300 พบการเจือจางของธาตุระหว่างชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น (รูปที่ 4.23) เช่นเดียวกับผลการทำ EDX line scan ของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT และไม่พบการเจือจางของธาตุระหว่างชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน (รูปที่ 4.24) เช่นเดียวกับกับผลการทำ EDX line scan ของการเชื่อมเงื่อนไข (3H) RT



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นพอกแข็งกับชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบ EDX line scan บริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน

4.6.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง

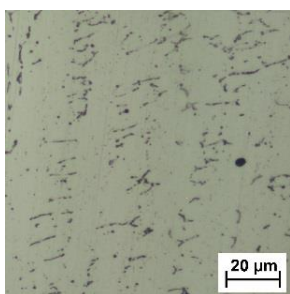
ค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงอย่างละเอียดในภาคผนวก ค ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน ผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และชั้นรองพื้นของการเชื่อมทั้ง 3 เงื่อนไข มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งของโลหะฐานมีค่าประมาณ 200-210 HV ค่าความแข็งของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีค่าประมาณ 240-570 HV ค่าความแข็งของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 244-288 HV สำหรับความแข็งของชั้นพอกแข็งพบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นจากชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ เนื่องจากชั้นพอกแข็งเกิดการเงาของธาตุที่ได้รับมาจากชั้นรองพื้น ทำให้สมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไป โดยความแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 440 HV ชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 595 HV และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 651 HV

4.7 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไขเชื่อมชั้นรองพื้นและอุณหภูมิขึ้นงาน 350 °C [(1B-1H) 350 (1B-2H) 350 และ (1B-3H) 350]

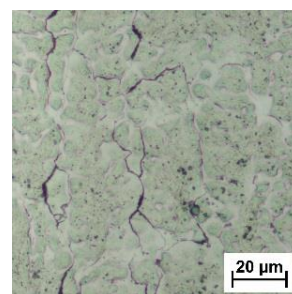
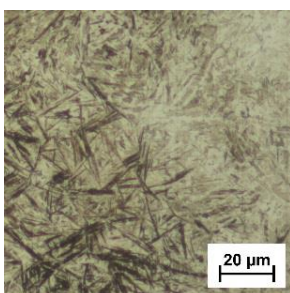
4.7.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และอุณหภูมิขึ้นงานก่อนเชื่อม 350 °C [(1B-1H) 350] แสดงดังรูปที่ 4.25 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.25 (ง)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่น ๆ ให้เห็น โดยเฉพาะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.25 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นกลุ่มมาร์เทนซิติก เมื่อหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะได้โครงสร้างมาร์เทนซิติกเช่นเดิม ซึ่งชั้นพอกแข็ง 1 ชั้นจะสังเกตเห็นเฟสมาร์เทนซิติกได้ไม่ค่อยชัดเจน เนื่องจากเกิดการเงาของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดออสเทนนิติก ที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลตต้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายๆ ไปมา แสดงดังรูปที่ 4.25 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งจะเกิดการเงาของธาตุมาก เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิติกผสมกับมาร์เทนซิติกมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำกว่า

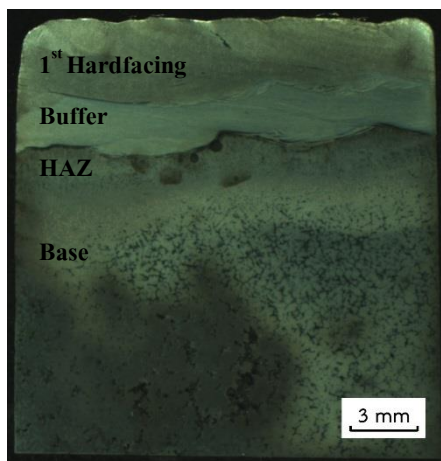
มาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT รูปที่ 4.25 (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ที่เป็นผลมาจากการได้รับความร้อนสูงจากการเชื่อม จนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในสถานะของแข็ง แล้วเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อโลหะ ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.25 (จ) แสดง โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์



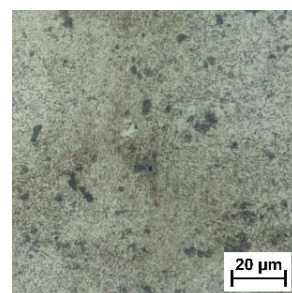
(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing

(ค) HAZ



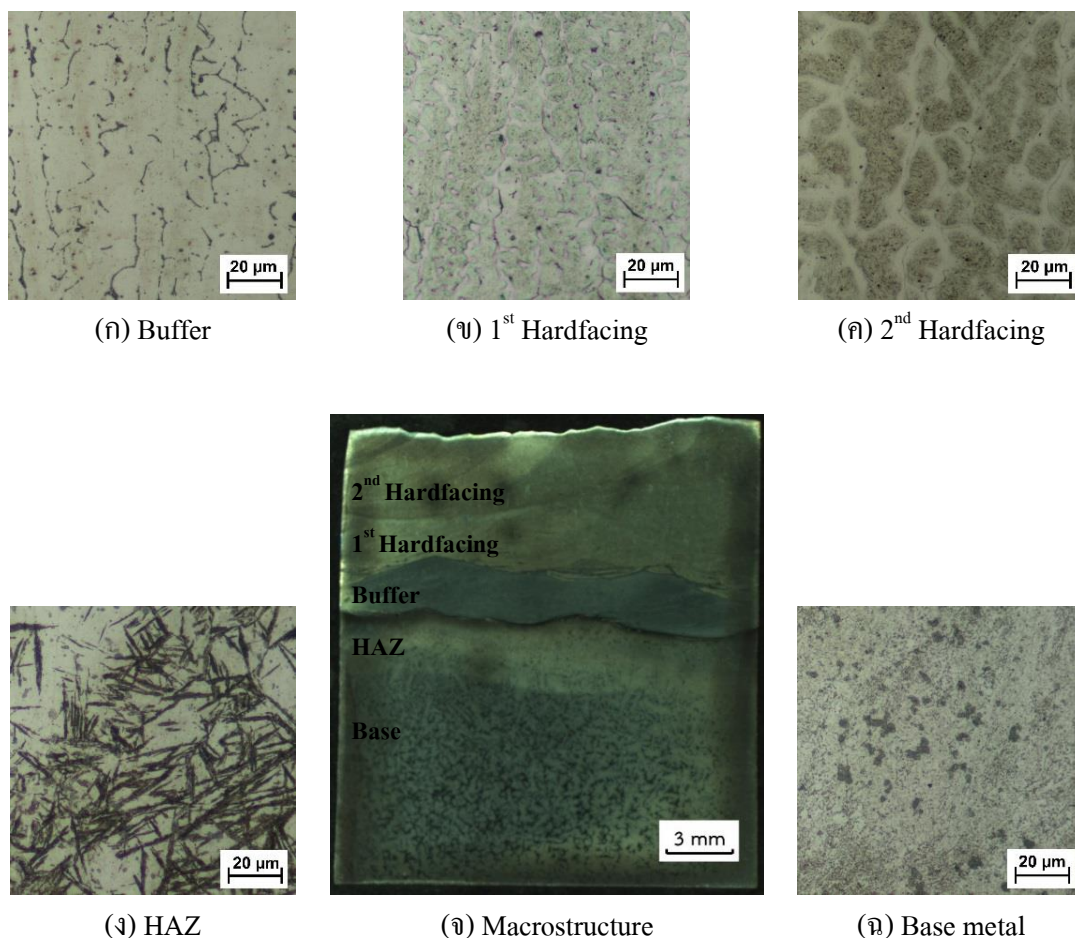
(ง) Macrostructure



(จ) Base metal

รูปที่ 4.25 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-1H) 350

ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 350 °C [(1B-2H) 350] แสดงดังรูปที่ 4.26 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.26 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น โดยเฉพาะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.26 (ข) และ (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติกแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเคนไดรด์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะมีเฟสมาร์เทนซิติกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากกว่าชั้นที่ 1 เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดออสเทนนิคที่มีลักษณะเคนไดรด์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายไปมา แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 จะเกิดการเจือจางน้อยลง เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น การเจือของธาตุจึงลดน้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งเงือนไซ (1B-2H) 300 ต่ำกว่าเงือนไซ (2H) RT เช่นกัน รูปที่ 4.26 (จ) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคชนิดมาร์เทนไซต์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อโลหะเดิม) เป็นมาร์เทนไซต์ ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.26 (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์



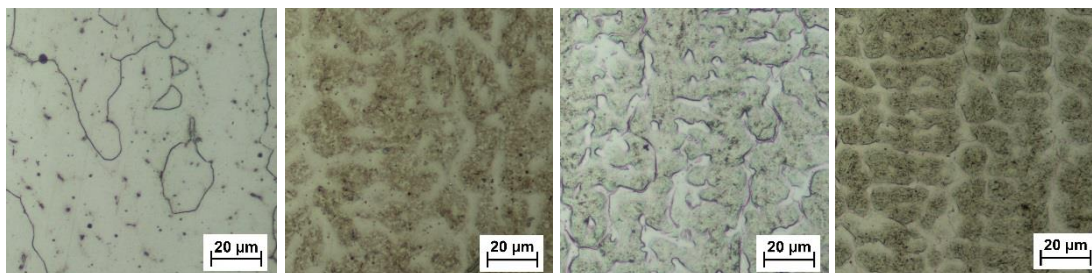
รูปที่ 4.26 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-2H) 350

ลักษณะ โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น และและอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 350 °C [(1B-3H) 350] แสดงดังรูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาค (รูปที่ 4.27 (จ)) ที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงโลหะฐานมีความหนาประมาณ 13-15 มิลลิเมตร บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ชั้นรองพื้นมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งแต่ละชั้นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นการเชื่อมที่ติดกันเป็นอย่างดีในแต่ละชั้น รวมถึงไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องอื่นๆให้เห็น โดยเฉพาะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนก็ไม่พบรอยแตกร้าวเช่นกัน รูปที่ 4.27 (ข) ถึง (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ ที่มีโครงสร้างชนิดมาร์เทนซิติคแทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิค มีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติค เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติค ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีเฟส

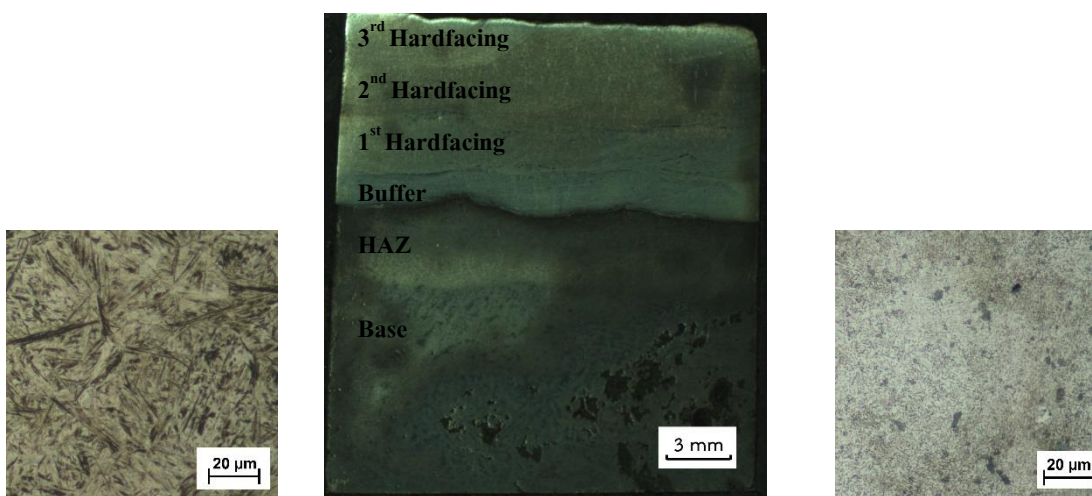
มาร์เทนซิติกที่ละเอียดและเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเจือจางของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล จากชั้นรองพื้น ซึ่งเป็นชั้นที่มีโครงสร้างชนิดออสเทนนิคที่มีลักษณะเดนไดรต์เป็นเนื้อหลักที่มีขอบเกรนเคลต้าเฟอร์ไรต์ ลักษณะคล้ายไปมา แสดงดังรูปที่ 4.27 (ก) เนื่องจากชั้นทั้งสองเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน ในขณะที่เชื่อมจะเกิดการหลอมละลายใหม่ของเนื้อเชื่อมในชั้นรองพื้นบางส่วนแล้วผสมกับชั้นพอกแข็งที่หลอมละลายใหม่ ทำให้เกิดการผสมกันของธาตุของทั้ง 2 บริเวณ โดยชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เกิดการเจือจางมากที่สุด เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะเกิดการเจือจางน้อยลงตามลำดับ เนื่องจากเป็นชั้นที่มีระยะห่างออกไปจากชั้นรองพื้นมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยค่าความแข็งที่ต่ำในชั้นพอกแข็งที่ 1 แล้วความแข็งค่อยๆเพิ่มขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่ไม่มีชั้นรองพื้น ความแข็งบริเวณชั้นพอกแข็งของการเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไข (1B-3H) 350 ต่ำกว่าเงื่อนไข (3H) RT เช่นกัน รูปที่ 4.27 (จ) แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของมาร์เทนไซด์บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ที่มีลักษณะเกรนเป็นแบบเข็ม ซึ่งเป็นผลของมาร์เทนไซด์ ส่วนเฟสสีขาวคือเฟสออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (เนื้อเดิม) เป็นมาร์เทนไซด์ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ รูปที่ 4.27 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์

4.7.2 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง

ค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงดังภาคผนวก ค ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน ผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และชั้นรองพื้นของทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งของโลหะฐานมีค่าประมาณ 200-210 HV ค่าความแข็งของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนมีค่าประมาณ 240-450 HV ค่าความแข็งของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 221-245 HV สำหรับความแข็งของชั้นพอกแข็งพบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นจากชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 3 เนื่องจากชั้นพอกแข็งเกิดการเจือจางของธาตุที่ได้รับมาจากชั้นรองพื้น โดยความแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 461 HV ชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 601 HV และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 645 HV



(ก) Buffer

(ข) 1st Hardfacing(ค) 2nd Hardfacing(ง) 3rd Hardfacing

(จ) HAZ

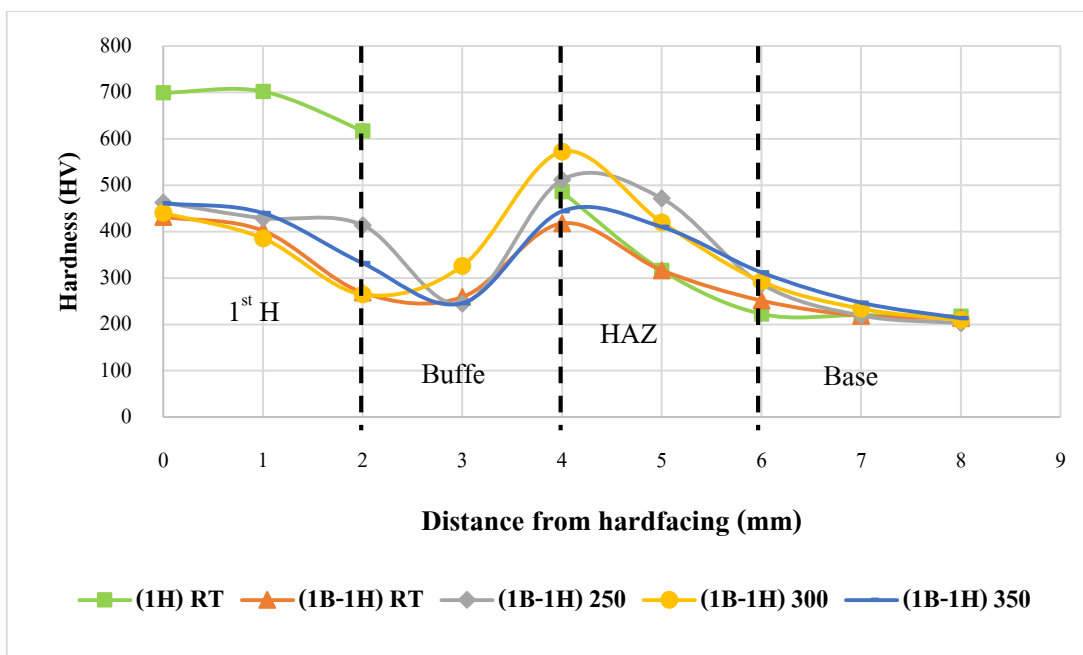
(ฉ) Macrostructure

(ช) Base metal

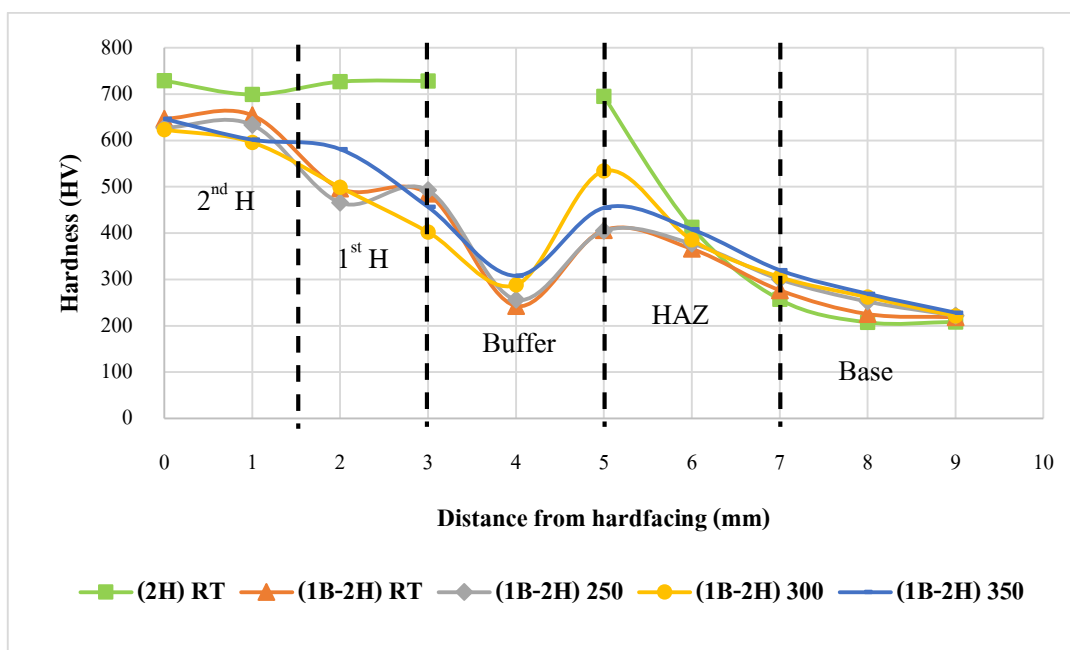
รูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 350

4.8 ผลการตรวจสอบความแข็ง

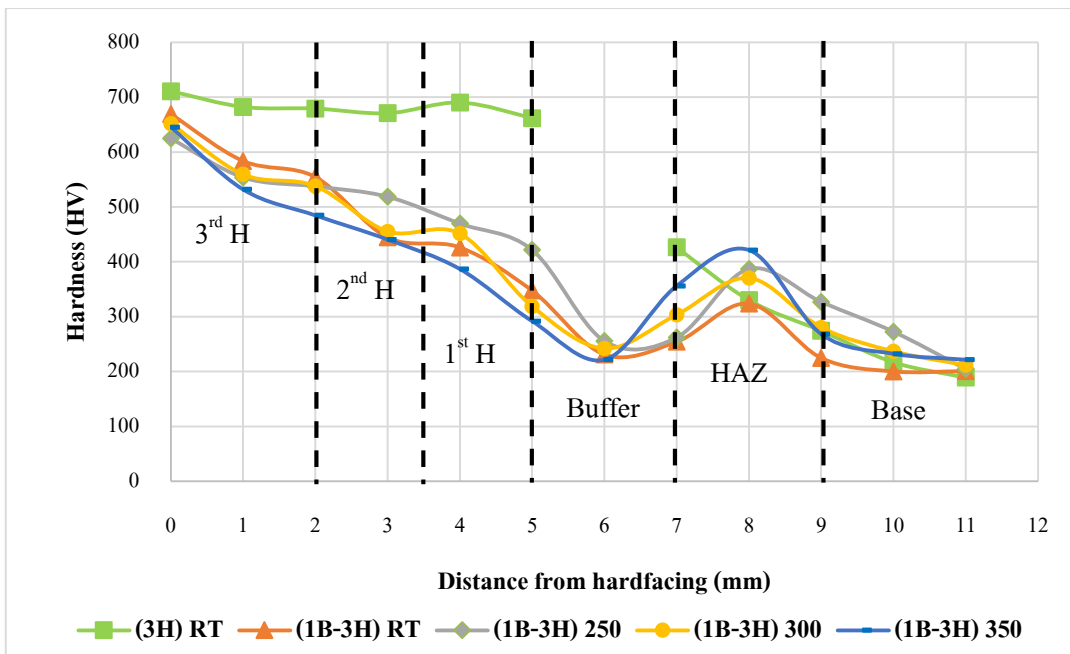
การทดสอบความแข็งจะเริ่มทดสอบจากบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน และบริเวณโลหะฐาน โดยผลการทดสอบค่าความแข็งของการเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขแสดงอย่างละเอียดในภาคผนวก ข สำหรับส่วนที่จะแสดงดังต่อไปนี้คือการเปรียบเทียบค่าความแข็งของการเชื่อมเงื่อนไขที่มีจำนวนชั้นพอกแข็งเท่ากันนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งบริเวณต่างๆกับจุดที่ทดสอบของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.28 ถึง รูปที่ 4.30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น



รูปที่ 4.29 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น



รูปที่ 4.30 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมที่ได้จากการหล่อแล้วอบคืนตัวที่ใช้เป็นโลหะฐาน มีค่าความแข็งต่ำที่สุด โดยมีค่าประมาณ 200 HV บริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน เป็นบริเวณที่ค่าความแข็งเปลี่ยนไปจากโลหะเดิม โดยมีค่าความแข็งที่สูงขึ้น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งและเปราะ โดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 450-550 HV แต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างชิ้นงานที่ไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและชิ้นงานที่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิต่างๆในทุกเงื่อนไขการเชื่อม เนื่องจากค่าความร้อนเข้าจากการเชื่อมมีความเพียงพออยู่แล้ว และเนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมมีขนาดเล็ก เมื่อเชื่อมจะเกิดความร้อนสะสมในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วมีอุณหภูมิสูงกว่าเดิมมาก (มากกว่า 700 °C) โดยอุณหภูมิดังกล่าวสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมมากและมีแนวโน้มว่าการเชื่อมเงื่อนไขที่จำนวนชั้นพอกแข็งเท่ากัน อุณหภูมิสุดท้ายจะมีค่าใกล้เคียงกันด้วย เมื่อชิ้นงานเกิดการเย็นตัว (ในอากาศ) อัตราการเย็นตัวจึงใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจึงมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นความร้อนที่ให้กับชิ้นงานก่อนเชื่อมที่แตกต่างกันจึงไม่แสดงผลของค่าความแข็งที่ชัดเจนให้เห็นในบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ชั้นรองพื้นในการเชื่อมทุกเงื่อนไข มีค่าความแข็ง 220-250 HV เนื่องจากเป็นชิ้นที่มีโครงสร้างหลักเป็นออสเทนไนต์ที่มีสมบัติความแข็งที่ต่ำเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว สำหรับความแข็งของชั้นพอกแข็งพบว่าอุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานก่อนเชื่อมไม่มีผลต่อความแข็งของเนื้อเชื่อมพอก

แข็งแต่อย่างใด ที่จะเกี่ยวข้องก็จะเป็นจำนวนชั้นของชั้นพอกแข็งและการเงี้ยวของธาตุจากชั้นรองพื้น โดยพบว่าชั้นพอกแข็งของการเชื่อมเงี้ยวที่ไม่มีชั้นรองพื้นจะมีความแข็งที่ใกล้เคียงกันทุกเงี้ยว (660-700 HV) เนื่องจากมีการเงี้ยวของธาตุระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐานที่ต่ำ และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็ง เนื้อเชื่อมก็จะมีสมบัติเป็นมาร์เทนซิติคที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่วนการเชื่อมเงี้ยวที่มีชั้นรองพื้น พบว่าชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งประมาณ 450 HV 500 HV และ 650 HV ตามลำดับ เนื่องจากการมีชั้นรองพื้นอยู่ ทำให้เกิดการเงี้ยวของธาตุ เช่น โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล ที่มีอยู่มากในชั้นรองพื้น ที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำ เข้ามาผสมกันกับชั้นพอกแข็ง ซึ่งจะเกิดขึ้นมากที่สุดกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้น ความแข็งจึงต่ำลง ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 ยังคงได้รับอิทธิพลบางส่วนของ การเงี้ยวผ่านชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ทำให้ความแข็งยังต่ำอยู่แต่มีแนวโน้มค่อยๆ สูงขึ้น สำหรับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 คาดว่าไม่เกิดการเงี้ยวแล้ว ส่งผลให้ความแข็งมีค่าสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับชั้นพอกแข็งเงี้ยวที่ไม่มีชั้นรองพื้น

4.9 ผลการตรวจสอบการสึกหรอ

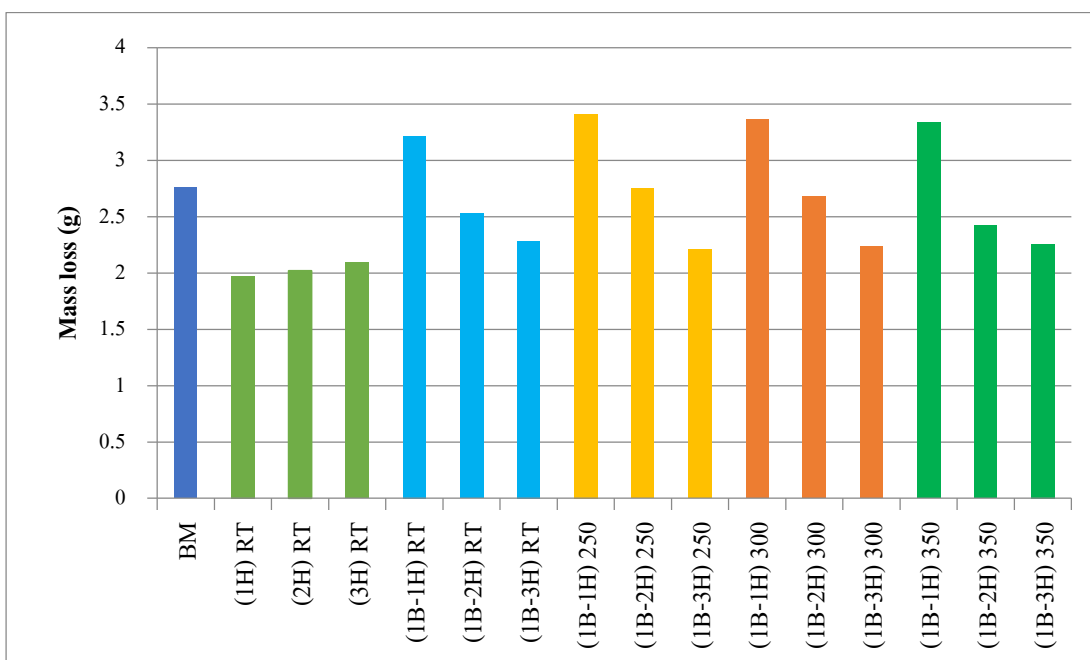
ผลการทดสอบการสึกหรอแสดงดังตารางที่ 4.2 จากการทดลองพบว่าโลหะฐาน มีค่าความต้านทานการสึกหรอที่ค่อนข้างต่ำแสดงดังรูปที่ 4.31 เนื่องจากเหล็กกล้า 3.5 %โครเมียมที่ใช้เป็นโลหะฐานมีค่าความแข็งที่ต่ำ แต่ค่าความสึกหรอยังถือว่าคืออยู่ถ้าเปรียบเทียบกับเงี้ยวการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้นที่มีการสึกหรอที่สูงกว่า แต่มีค่าความแข็งที่สูงกว่าเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมมาก ผลดังกล่าวคาดว่ามาจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานที่มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ เฟอไรต์และเบนไนต์ที่คาดว่ามีการกระจายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ในโครงสร้างเฟอไรต์ ซึ่งโครเมียมคาร์ไบด์เป็นโครงสร้างที่แข็ง เกิดจากคาร์บอนจับตัวกับโครเมียม ทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอของโลหะสูงขึ้นแม้ว่าความแข็งจะต่ำก็ตาม สำหรับการเชื่อมพอกแข็งเงี้ยวไม่มีชั้นรองพื้น พบว่ามีค่าความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด (น้ำหนักที่หายไปต่ำที่สุด) โดยที่การเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้นจะมีค่าน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกัน เนื่องจากชั้นพอกแข็งในกรณีนี้ มีลักษณะโครงสร้างแบบมาร์เทนซิติคที่สมบูรณ์ เกิดการเงี้ยวต่ำของธาตุจากโลหะฐาน และส่งผลให้มีความแข็งที่สูงเช่นกัน แต่การเชื่อมพอกแข็ง 1 จะมีค่าน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าการพอกแข็ง 2 และ 3 ชั้น ตามลำดับเล็กน้อย เนื่องจากการพอกแข็ง 2 ชั้นและ 3 ชั้น มีโครงสร้างมาร์เทนไซด์ที่มีออสเทนไนต์บริเวณขอบเกรนอยู่มากกว่า ซึ่งโครงสร้างออสเทนไนต์เป็นเฟสที่อ่อน ทำให้ง่ายต่อการสึกหรอจากการเสียดสี

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

ชั้นงาน ทดสอบ	น้ำหนักก่อน ทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความต้านทานการ สึกหรอ (เมตร/มิลลิกรัม)	ความแข็ง (HV)
BM	181.9646	179.2033	2.7613	1.56	208.3
(1H) RT	163.4648	161.4924	1.9724	2.18	699.4
(2H) RT	164.7163	162.6981	2.0182	2.14	728.7
(3H) RT	183.3998	181.3059	2.0939	2.06	710.8
(1B-1H) RT	186.1519	182.9365	3.2154	1.34	431.9
(1B-2H) RT	167.2215	164.6918	2.5297	1.70	646.6
(1B-3H) RT	186.1998	183.9179	2.2819	1.89	669.1
(1B-1H) 250	165.6639	162.2525	3.4114	1.26	462.5
(1B-2H) 250	161.6071	158.8542	2.7529	1.57	627.1
(1B-3H) 250	174.0178	171.8107	2.2071	1.95	624.6
(1B-1H) 300	164.6236	161.264	3.3596	1.28	440.4
(1B-2H) 300	168.6447	165.9631	2.6816	1.61	623.3
(1B-3H) 300	171.7352	169.5015	2.2337	1.93	651.6
(1B-1H) 350	172.7414	169.4059	3.3355	1.29	461.4
(1B-2H) 350	161.7131	159.2919	2.4212	1.78	646.4
(1B-3H) 350	188.147	185.8896	2.2574	1.91	645.4

กรณีการเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมรองพื้น 1 ชั้น พบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบการสึกหรอจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขการเชื่อม กล่าวคือ ในกรณีที่เชื่อมชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น จะมีค่าน้ำหนักที่หายไปสูงที่สุด เนื่องจากการเงาของธาตุจากชั้นรองพื้น ทำให้คุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งต่ำลง ในกรณีเชื่อมชั้นพอกแข็ง 2 ชั้น พบว่ายังคงมีอิทธิพลของการเงาของธาตุจากชั้นรองพื้นที่ส่งผ่านชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ขึ้นมา ทำให้คุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งยังคงต่ำอยู่ สำหรับในกรณีการเชื่อมชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น พบว่าค่าความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดและมีค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากชั้นนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบมาร์เทนซิติกที่สมบูรณ์ ไม่เกิดการเงาของธาตุจากชั้นรองพื้นอีกแล้ว

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับผลการทดสอบการสึกหรอ โดยพบว่าถ้าชิ้นงานมีความแข็งมาก น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอจะน้อย และในทำนองเดียวกัน ถ้าชิ้นงานมีความแข็งน้อย น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอจะมาก ถึงแม้ว่าการเชื่อมเงื่อนไข (1H) RT ที่มีความแข็งน้อย แต่น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอน้อยกว่าการเชื่อมเงื่อนไข (2H) RT และ (3H) RT ก็ตาม ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดจากการทดลอง เช่น การกัดปาดหน้าชิ้นพอกแข็งที่ไม่เท่ากันของชิ้นงานก่อนการทดสอบความแข็งและความบริสุทธิ์ของทรายที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแตกต่างของค่าน้ำหนักที่หายไปของทั้ง 3 เงื่อนไขนี้ มีความแตกต่างกันประมาณ 6% ของค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ซึ่งไม่ถือว่ามีนัยสำคัญ และจากเงื่อนไขการเชื่อมที่เหลืออีก 12 เงื่อนไข ยังคงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันของชิ้นพอกแข็งที่มีค่าความแข็งสูง จะมีการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการสึกหรอน้อยกว่าชิ้นพอกแข็งที่มีค่าความแข็งต่ำกว่า โดยการเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้น จะมีค่าความแข็งมากที่สุด ทำให้การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการสึกหรอมีค่าน้อยที่สุด



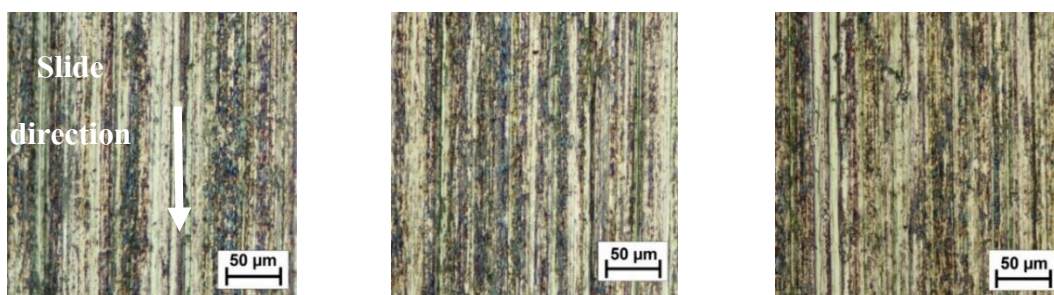
รูปที่ 4.31 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบเสียดสีของชิ้นงาน ที่ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งเป็นหลัก รูปที่ 4.33 และ รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะผิวที่เกิดการสึกหรอที่มีลักษณะคล้ายกันของชิ้นงานเชื่อมเงื่อนไขไม่มีชั้นรองพื้น และชิ้นงานเชื่อมเงื่อนไขที่มีชั้นรองพื้น

ตามลำดับ ซึ่งการสึกหรอหลักของการสึกหรอแบบเสียดสีประกอบด้วย การสึกหรอมีแบบไถ พบมากในชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น เนื่องจากชั้นพอกแข็งชั้นนี้มีความอ่อนนุ่มและเหนียวกว่าชั้นพอกแข็งอื่นๆอันเป็นผลมาจากการเจือจางของธาตุจากชั้นรองพื้นที่อยู่ติดกัน ผิวที่สึกหรอมีแบบตัด พบมากที่สุดจากการทดลอง เกิดขึ้นกับทุกชิ้นงานที่ทดสอบ และผิวที่สึกหรอแบบแตก พบในโลหะฐานและชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 เนื่องจากโลหะฐานมีลักษณะโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์อยู่ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ค่าความแข็งสูง เมื่อเกิดการสึกเสียดสีโครเมียมคาร์ไบด์จึงหลุดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ ส่วนชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 มีโครงสร้างที่แข็งแต่เปราะ เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป จึงเกิดในลักษณะแตกเปราะ



รูปที่ 4.32 ชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอ



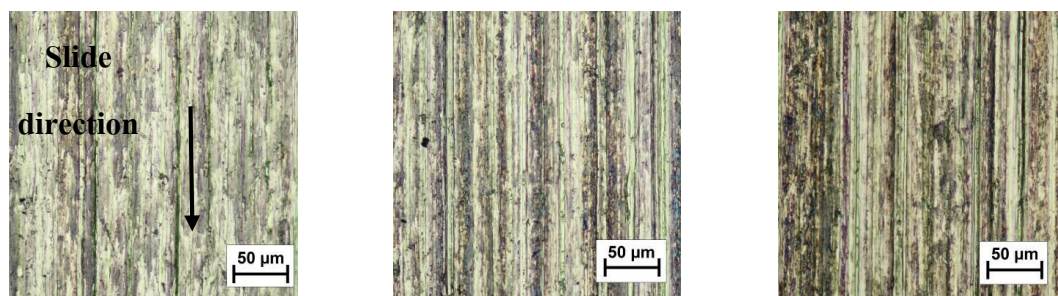
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.33 ผิวที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้น (ก) เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

(ข) เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น (ค) เชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.34 ผิวที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมที่มีชั้นรองพื้น (ก) เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น
(ข) เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น (ค) เชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

อย่างไรก็ตาม ควรมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมถึงแม้ว่าจากผลการทดลองจะไม่พบความแตกต่างทั้งค่าความแข็งและลักษณะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (เนื่องจากผลของชิ้นงานทดสอบขนาดเล็กเกินไป ทำให้ความร้อนที่ได้จากระบวนการเชื่อม อบอุ่นความแข็งบริเวณผลกระทบจากความร้อน ทำให้ความแข็งลดลง จนเกิดความเมื่อยเบนของการทดลอง) ของการเชื่อมเงื่อนไขที่ไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและเงื่อนไขที่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 250 °C, 300 °C และ 350 °C แต่ในทางทฤษฎีแล้ว เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่า 1.247 ควรมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม 300-350 °C ประกอบกับคำแนะนำการเชื่อมในคู่มือการเลือกใช้ลวดเชื่อมพอกแข็งและงานวิจัยที่ใช้เหล็กกล้าเกรดที่ใกล้เคียงกับเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม กล่าวไว้ว่า ควรมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมชั้นพอกแข็งประมาณ 200-350 °C ดังนั้น เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเชื่อว่าการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมยังคงจำเป็นอยู่สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นชิ้นงาน ทางผู้วิจัยแนะนำอุณหภูมิ 250 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในการทดลองเชื่อมเงื่อนไขที่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้รวมถึงเวลาที่ใช้ในการอุ่นชิ้นงาน และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแข็งและลักษณะบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อเทียบกับการเชื่อมเงื่อนไขที่มีการอุ่นชิ้นงาน 300 °C และ 350 °C การเชื่อมพอกแข็งยังคงจำเป็นต้องมีชั้นรองพื้นเพราะการเชื่อมพอกแข็งหลายชั้นมีโอกาสเกิดการแตกที่มาจากชั้นพอกแข็งแล้วขยายเข้าสู่โลหะฐานได้ และเพื่อเป็นตัวประสานระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐานไม่ให้หลุดออกจากกันในระหว่างการใช้งานที่มีแรงกระแทกเข้ามาเกี่ยวข้องของด้วย อย่างไรก็ตาม การเชื่อมพอกแข็งที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น จะเกิดการเงื้องาจางของธาตุดูดซับจากชั้นรองพื้น ไปสู่ชั้นพอกแข็ง ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชั้นพอกแข็งเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ทำให้ค่าความแข็งของชั้น

พอกแข็งต่ำลง ส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอต่ำลงด้วย โดยเฉพาะการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น จะเกิดการเงือจางมากที่สุด แต่กรณีการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น พบว่าบริเวณชั้นที่ 3 ของชั้นพอกแข็งมีค่าความแข็งสูงและความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด เนื่องจากไม่เกิดการเงือจาง การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ยังส่งผลดีเรื่องความหนาของชั้นพอกแข็งที่มากกว่าการเชื่อม 2 ชั้นและ 1 ชั้น ตามลำดับ ทำให้มีระยะเวลาในการใช้งานที่ยาวนานกว่า ดังนั้นจากการทดลองจึงสรุปได้ว่า การเชื่อมกรณีอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมอย่างน้อย 250 °C ที่มีชั้นรองพื้น 1 ชั้น และเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น [(1B-3H) 250] เหมาะสำหรับการเชื่อมพอกแข็งในงานซ่อมบำรุงเครื่องไม่ถ่านหินชนิดไม่เคียว เหมือนแม่เกาะ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

รายงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาโครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ของพิน โมเครื่อง โมถ่านหิน ที่มีเงื่อนไขการเชื่อมแตกต่างกัน 15 เงื่อนไข

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ชั้นพอกแข็งของการเชื่อมทุกเงื่อนไข มีโครงสร้างมาร์เทนซิดิกที่แทรกอยู่ในออสเทนิติก ลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีความแข็งสูงและความต้านทานการสึกหรอที่ดี

5.1.2 การเชื่อมจางกับชั้นรองพื้น ส่งผลต่อโครงสร้างมาร์เทนซิดิกของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง ที่ทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอต่ำลง

5.1.3 เนื้อเชื่อมชั้นรองพื้นมีโครงสร้างออสเทนิติก และลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นการยึดเกาะที่ดีกับชั้นพอกแข็งและกับโลหะฐาน

5.1.4 จากโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมทุกเงื่อนไข ไม่พบการแตกบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน

5.1.5 การทดลองนี้ เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมมีขนาดเล็ก ดังนั้นความแตกต่างของความแข็งบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน จากการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติงานจริง ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว)

5.1.6 ความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น สูงกว่า 2 ชั้น และการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น สูงกว่า 1 ชั้น และความแข็งของโลหะฐานต่ำที่สุด

5.1.7 ค่าความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ดีกว่า 2 ชั้น และการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ดีกว่า 1 ชั้น และความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น และ 2 ชั้นดีกว่าโลหะฐาน

5.1.8 การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้ 25% ของโลหะฐาน

5.1.9 การเชื่อมพอกแข็งเงื่อนไข (1B-3H) 250 เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมซ่อมเครื่องม้อถ่านหินชนิดม้อเดี่ยว เหมือนแม่เฆะ

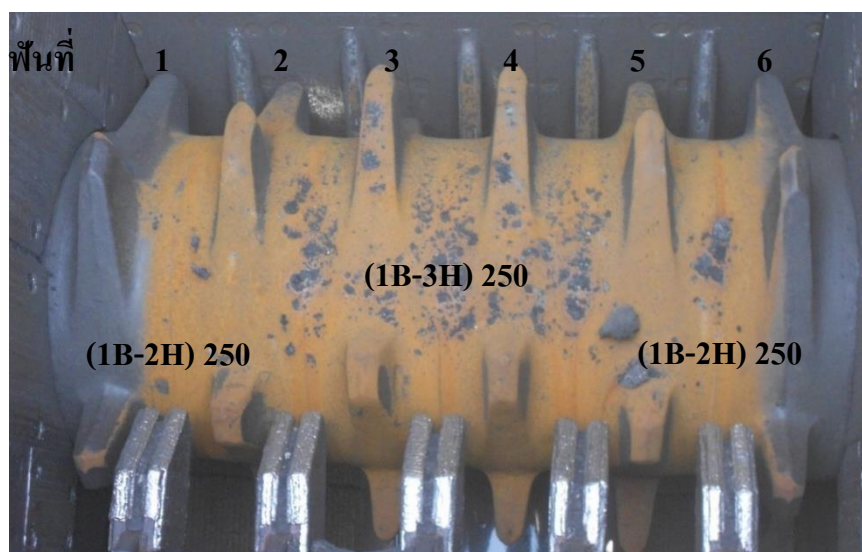
5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเชื่อมเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม ควรอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมอย่างน้อย 250 °C

5.2.2 ควรเชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น เพื่อเป็นตัวประสานระหว่างชั้นพอกแข็งกับโลหะฐาน

5.2.3 ชั้นพอกแข็งควรเชื่อมอย่างน้อย 2-3 ชั้น เพื่อช่วยลดปัญหาการเง็จางของเนื้อเชื่อม ที่จะทำให้ชั้นพอกแข็งมีความแข็งต่ำและทนการสึกหรอได้น้อยลง

5.2.4 การเชื่อมซ่อมพื้นม้อเครื่องม้อถ่านหินแบบม้อเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยบริเวณพื้นที่ 1, 2, 5 และ 6 ที่เกิดการสึกหรอน้อย เชื่อมด้วยวิธี (1B-2H) 250 ส่วนบริเวณพื้นที่ 3 และ 4 ที่เกิดการสึกหรอมาก เชื่อมด้วยวิธี (1B-3H) 250 โดยเชื่อมซ่อมทั้งส่วนของพื้นม้อและฐานพื้นม้อ



รูปที่ 5.1 วิธีเชื่อมซ่อมพื้นม้อเครื่องม้อถ่านหินแบบม้อเดี่ยว

5.2.5 การอุ่นขึ้นงานมีความสำคัญสูงกับการเชื่อมรองพื้นชั้นแรก หลังจากอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมแล้ว ควรเชื่อมให้เสร็จภายในคราวเดียว ไม่ควรปล่อยให้ชั้นงานเย็นตัวจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นขึ้นงาน (แนะนำให้รักษาอุณหภูมิที่ 100-150 °C) เพื่อลดอัตราการเย็นตัวและการหดตัวที่เร็วของชั้นงาน ที่อาจทำให้เกิดการแตกร้าวดังง่าย

5.2.6 หลังจากการเชื่อมรองพื้นเสร็จ ขณะเชื่อมพอกแข็งไม่จำเป็นต้องให้อุณหภูมิถึง 250 °C แต่ให้ลดอุณหภูมิลงเหลือ 100-150 °C และรักษาอุณหภูมิไม่ให้สูงหรือต่ำกว่านี้

5.2.7 เมื่อการสึกหรอของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 หหมดไป การสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และ 1 ตามลำดับ การวางแผนการซ่อมบำรุงจึงเป็นสิ่งจำเป็น

5.2.8 หลังจากอบลวดเชื่อมแล้ว ในระหว่างการเชื่อม ควรเก็บลวดเชื่อมไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิประมาณ 80-90 °C เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอก

บรรณานุกรม

- [1] จิตติ บัวพูน, ประศาสน์ สุบรรพวงศ, ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. การวิเคราะห์การชำรุดเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 9. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2556.
- [2] ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. เทคโนโลยีการเชื่อมพอกแข็ง. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย; 2550.
- [3] ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. วิศวกรรมการเชื่อม. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2555
- [4] Bailey N. Weldability of ferritic steel. Cambridge: Abington Publishing; 1994.
- [5] Callister WD. Materials science and engineering an introduction. 5thed. New York: John Wiley & Sons; 2000.
- [6] จิตติ บัวพูน, นิรมิต เดชสุภา, ประศาสน์ สุบรรพวงศ, ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. การวิเคราะห์การชำรุดเบื้องต้น. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2550.
- [7] Buchely MF, Gutierrez JC, Leon LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Wear 2005; 259: 52–61.
- [8] Kotecki DJ, Ogborn JS. Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys. Welding research supplement 1995; 75: 269s-78s.
- [9] Yamamoto S. Arc welding of specific steels and cast irons. 3rd ed. Kanagawa: Shinko Welding Service; 2008.
- [10] Bohler welding. Welding guide. Kapfenberg: The Institute.
- [11] Kobe Steel Ltd. Arc welding of specific steels and cast irons Tokyo: The Institute; 2015.
- [12] UTP Schweissmaterial. Manual electrodes solders and fluxes inert-gas, submerged-arc and flux-cored wires metal powders. 9901th ed. Bad Krozingen: The Institute.
- [13] Kou S. Welding metallurgy. 2nded. New Jersey: John Wiley & Sons; 2003.
- [14] Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding. London: ISTE; 2008
- [15] มนต์ สติรจินดา. เหล็กกล้า. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์; 2529.

- [16] สุรัถยา ลีมนา. การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2553
- [17] Kang DH, Lee HW. Microstructure and hardness change in high temperature service depending on Mo content in 2.25Cr-Mo steel weld metals. *Met Mater Int* 2011; 6: 963-67.
- [18] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT. The effect of welding processes on microstructure and abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Bonfring international journal of industrial engineering and management science* 2012; 2: 28-34.
- [19] Kovaiková, I, Szewczykova, B, Blaškoviš, P. Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology* [online]. ISSN; 1335-9053.
- [20] Shafiee A, Nili-Ahmadabadi M, Ghasemi HM, Hossein-Mirzaei E. Wear behavior of a Cr-Mo steel with different microstructures, in comparison with austempered ductile iron (ADI). *Int J Mater Form* 2009; 2 Suppl 1: 237-41.
- [21] Maldonado-Ruiz SI, Orozco-González P, Baltazar-Hernández, VH, Bedolla-Jacuinde A, Hernández-Rodríguez MAL. Effect of V-Ti on the microstructure and abrasive wear behavior of 6CrC cast steel mill balls. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2014; 2: 383-91.
- [22] Sapate, SG, Gurijala C, Rathod A, Singh A. Microstructure and abrasive wear properties of chrome alloy steel. *International Journal on Manufacturing and Material Science* 2012; 2: 40-3.
- [23] Kiran VT, Krishna M, Natraj JR, Kumar S. Development and characterization of an electrode deposition procedure for crack-free hardfacing of low carbon steel. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* 2012; 4: 18-25.
- [24] Adamiak M, Gorka J, Kik T. Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2009; 37(2): 375-80.
- [25] Winarto, Priadi D. Effect of preheating and buttering on cracking susceptibility and wear resistance of hardfaced HSLA steel deposit. *Japan Welding Society* 2013; 31: 202s-205s.

- [26] Balakrishnan M, Balasubramanian V, Reddy GM. Effect of hardfacing consumables on ballistic performance of Q&T steel joints. *Defence Technology* 2013; 9: 249-58.
- [27] Srinivasan G, Bhaduri AK, Albert SK. Addition of cerium oxide in the flux formulations of a basic-coated stainless steel electrode. *Weld World* 2013; 57: 55-63
- [28] Zollinger OO, Beckham LB, Monroe C. Hard surfacing alloys with the same hardness rating can vary greatly in actual abrasive wear performance. *Welding Journal* 1998; 77: 39-43.
- [29] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT. The effect of microstructure on 3 body abrasive wear behavior of hardfacing alloys. *Bonfring international journal of industrial engineering and management science* 2014; 4: 14-23.
- [30] Gualco A., Svoboda HG, Surian ES De Vedia LA. Effect of welding procedure on wear behavior of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit. *Materials and Design* 2010; 31: 4165–73.
- [31] Yang J, Yang Y, Zhou Y, Qi X, Gao Y, Ren X, et al. Microstructure and wear properties of Fe-2 wt-% Cr-X wt-% W-0.67 wt-% C hardfacing layer. *Welding Journal* 2013; 92: 225s-30s.
- [32] Morsy M, El-Kashif E. The effect of microstructure on high-stress abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposits. *Weld World* 2014; 58: 491-97.
- [33] Morsy MA, Khafagy SM, Zaghlool B. Repair welding restoration of screw conveyor for resin extruder. *Journal of American Science* 2011; 7: 313-20.
- [34] Coronado JJ, Caicedo HF, Gómes AL. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, *Tribology International* 2009; 42: 745-49.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของโลหะฐานและลวดเชื่อม

1. เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม

จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ (เหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม) ซึ่งผ่านการอบคืนตัว มีความแข็งประมาณ 200 HV โดยมีโครงสร้างเฟอไรต์ เพอร์ไรต์และเบนไนต์ มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับป็นชิ้นส่วนทางกล สำหรับอุปกรณ์ในเหมืองแร่ ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม (% น้ำหนัก)

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo
0.3836	0.4020	0.0089	0.0245	0.5187	0.1673	3.4223	0.3005
V	Cu	W	As	Sn	Co	Al	Zn
0.0125	0.0374	0.0044	0.0046	0.0035	0.0089	0.1270	0.0057

2. ลวดเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer)

ใช้ลวดตามมาตรฐาน DIN 8556: E 18 8 Mn R 26 (AWS A5.4-92: E 307-16) เป็นโลหะในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength alloyed steel) ลวดเชื่อมชนิดนี้เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูโพล์สำหรับเชื่อมโลหะที่มีความแตกต่างกัน มีความแกร่งที่เหมาะสมในการเชื่อมแทรกกลางระหว่างโลหะที่มีความแข็งสูงกับชั้นพอกแข็ง สามารถต้านทานการแตกได้เป็นอย่างดี ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 850 °C และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่อุณหภูมิต่ำถึง -10 °C ก่อนการเชื่อมจะต้องอบลวดเชื่อมเป็นเวลา 2 โมง ที่อุณหภูมิ 200 °C สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC+) และกระแสสลับ (AC) โดยลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ควรใช้กระแสเชื่อม 110-140 A

ตารางที่ ก.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8556: E 18 8 Mn R 26 [10]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.11	1.2	4.2	19.2	8.5	0.7	Balance

3. ลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Hardfacing)

ใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8555: E 6-UM-60 เหมาะกับการใช้เป็นชั้นพอกแข็งในชิ้นส่วนที่ใช้งานแล้วมีการเสียดสีและการกระแทกเกิดขึ้น โดยเฉพาะงานทางด้านเหมืองแร่ โดยค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีค่า 24 HRC เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น มีค่า 45 HRC และ

เชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่า 56-58 HRC ก่อนการเชื่อมจะต้องอุ่นชิ้นงาน 250-350 °C และอบลดเชื่อมเป็นเวลา 2 โมง ที่อุณหภูมิ 300 °C ในการเชื่อมพอกแข็ง 3-4 ชั้นควรมีการเชื่อมด้วยโลหะที่มีความแข็งต่ำเป็นชั้นรองพื้น สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC+) และกระแสสลับ โดยลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ควรใช้กระแสเชื่อม 130-170 แอมแปร์

ตารางที่ ก.3 ส่วนผสมทางเคมีของของลวดเชื่อม DIN 8555: E 6-UM-60 [12]

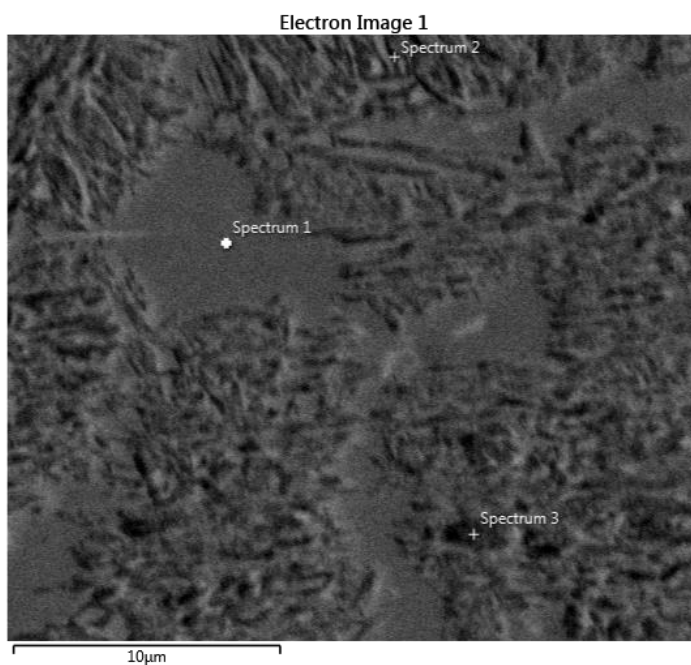
C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Fe
0.5	0.8	1.3	7	1.3	0.5	Balance

ภาคผนวก ข

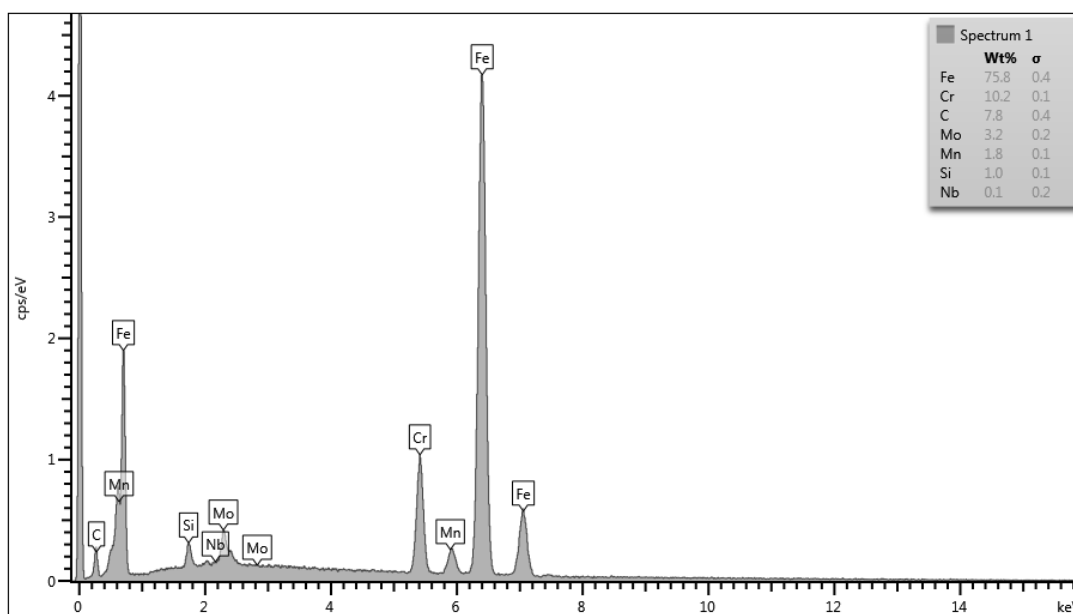
ผลการทดสอบลักษณะและปริมาณธาตุบริเวณเนื้อเชื่อมและโลหะฐาน

1. ผลการทดสอบ EDX point analysis

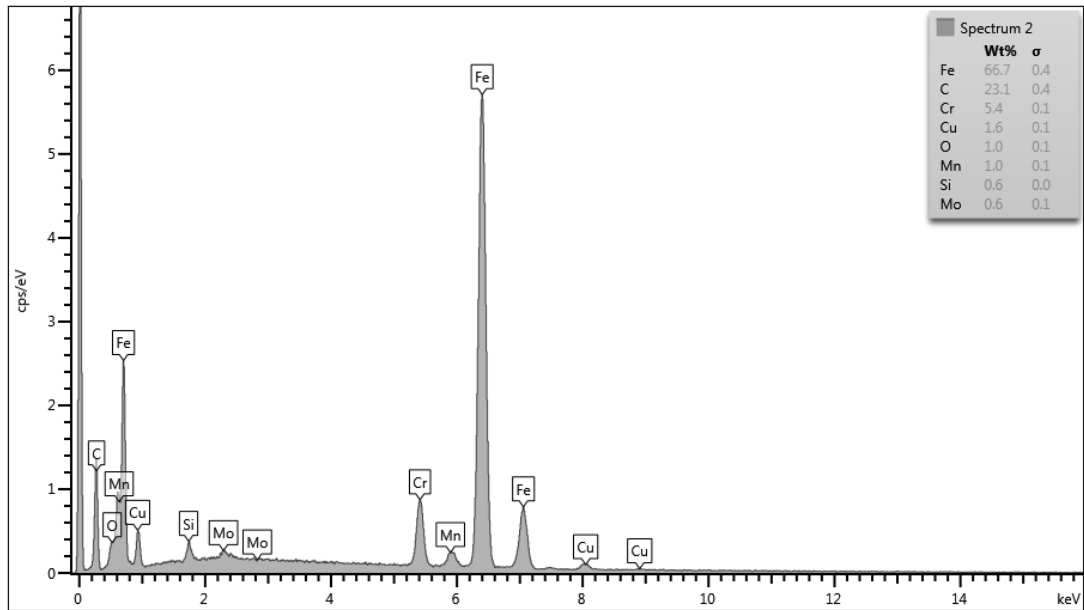
การเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 300



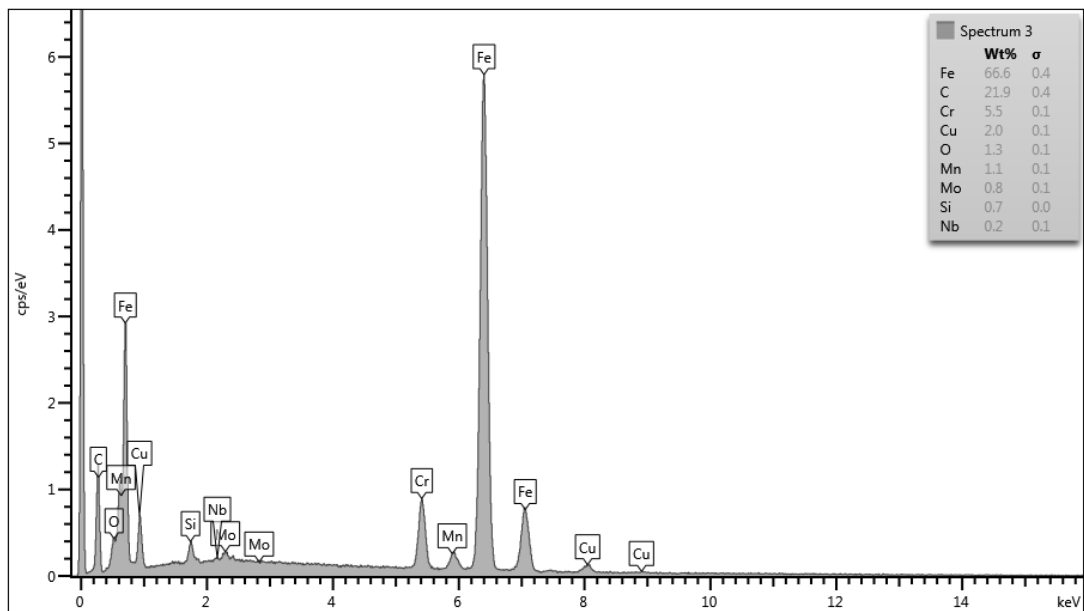
รูปที่ ข.1 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3



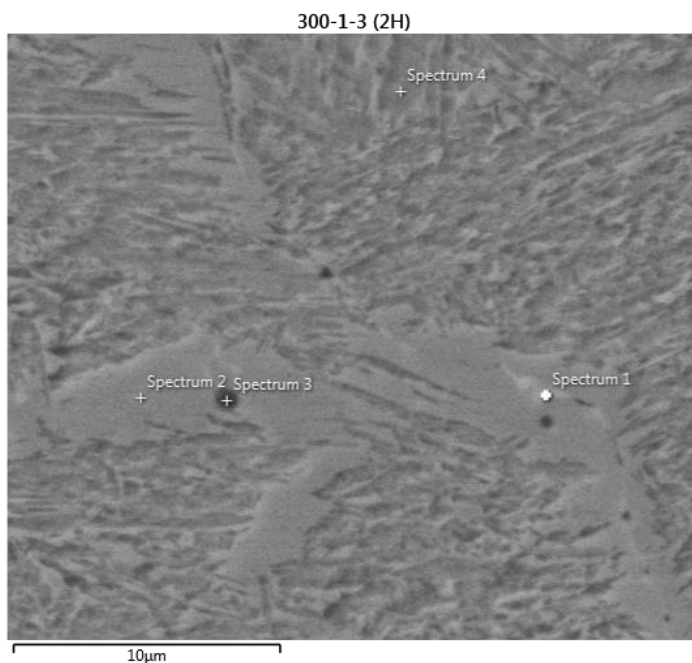
รูปที่ ข.2 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3



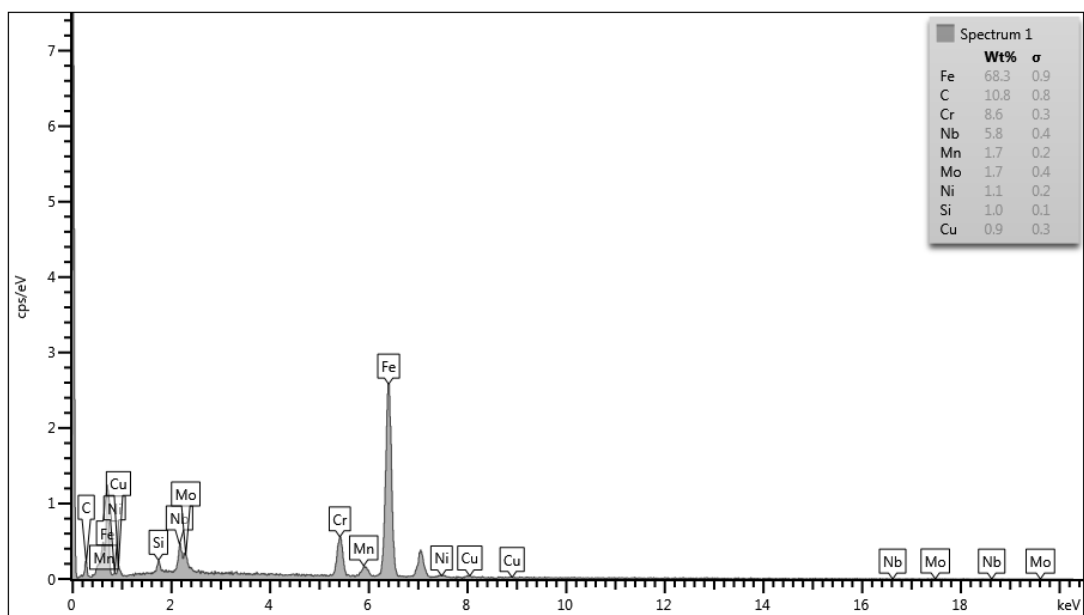
รูปที่ ข.3 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3



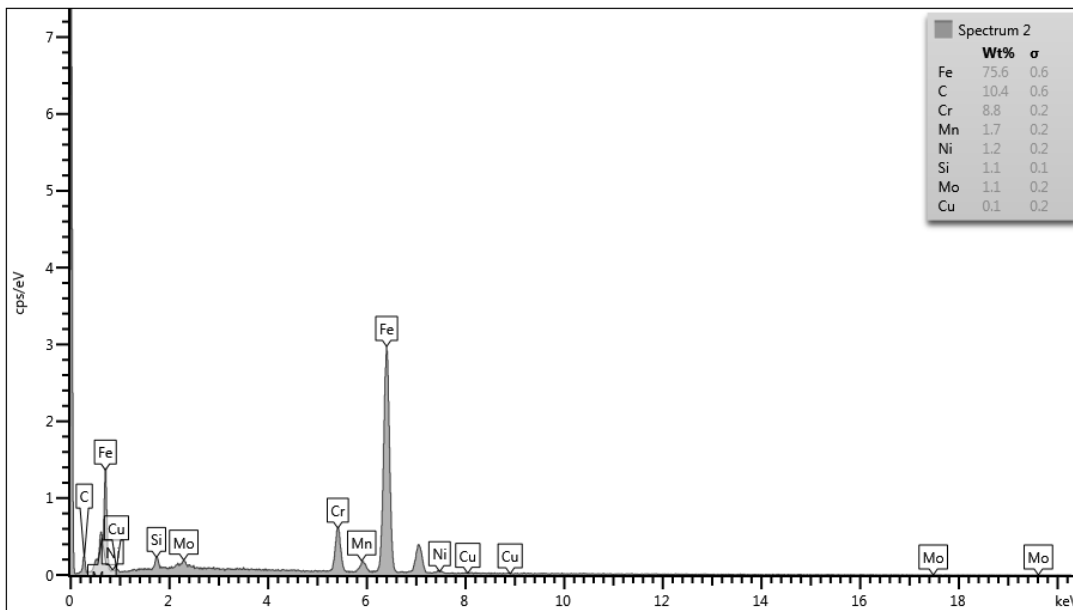
รูปที่ ข.4 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3



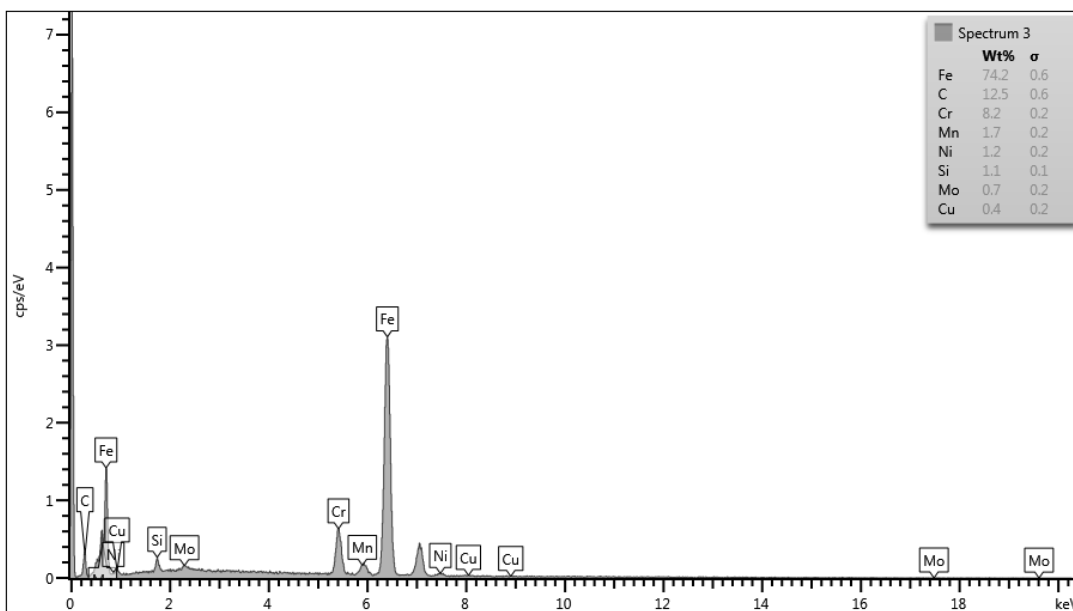
รูปที่ ข.5 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2



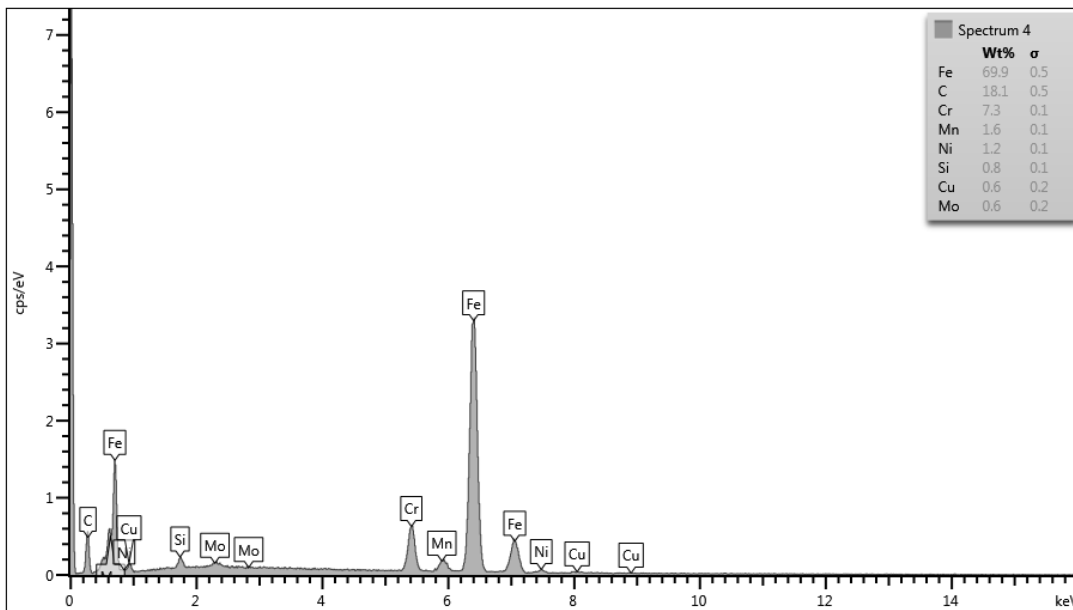
รูปที่ ข.6 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2



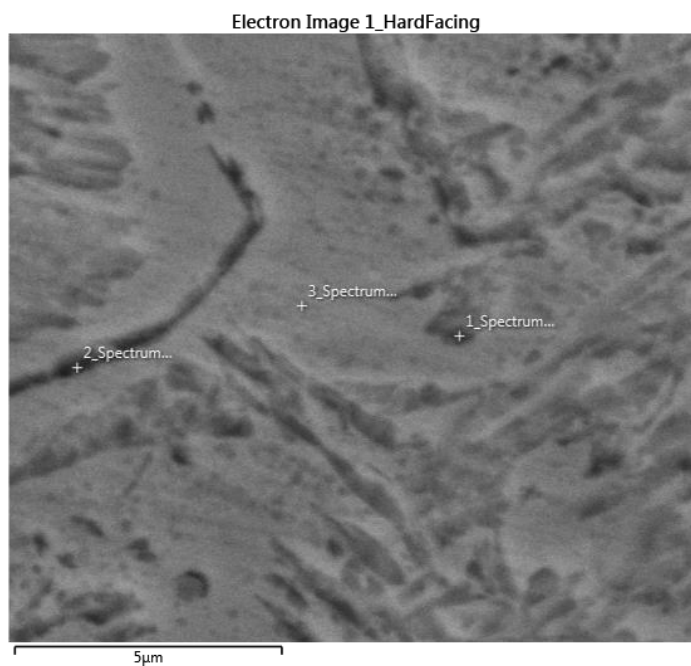
รูปที่ ข.7 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2



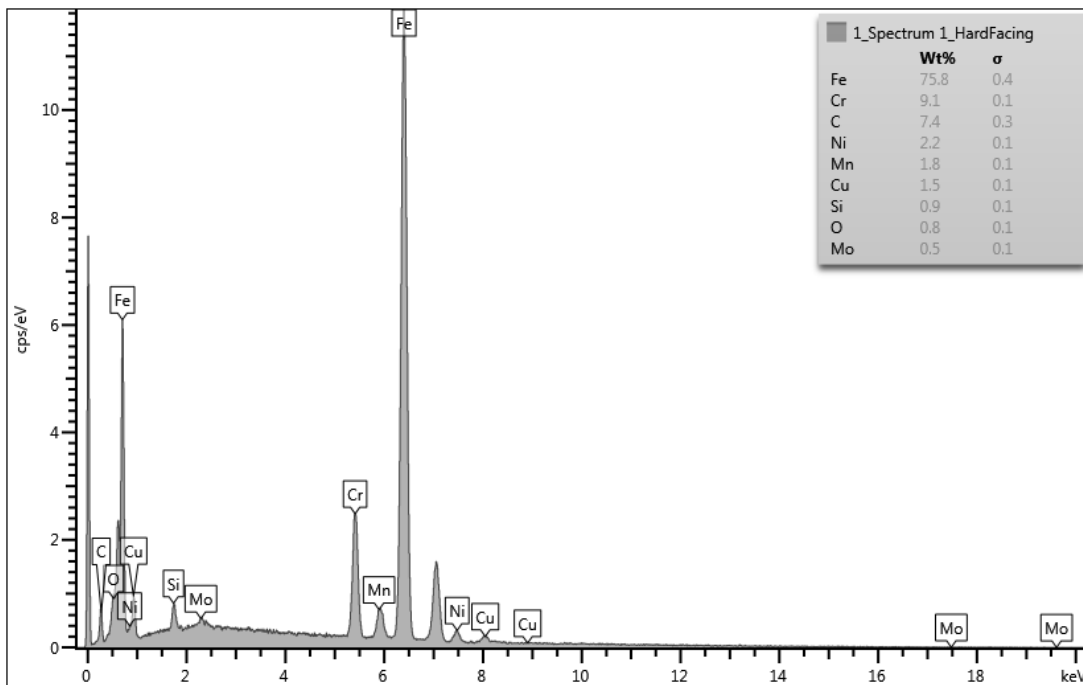
รูปที่ ข.8 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2



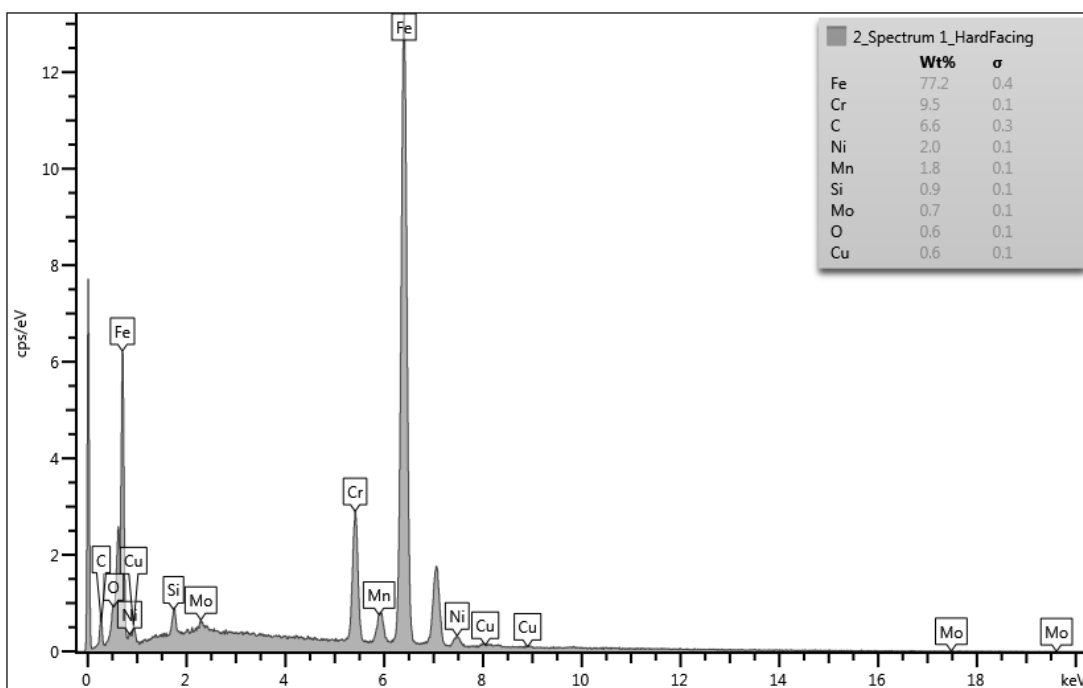
รูปที่ ข.9 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 4 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2



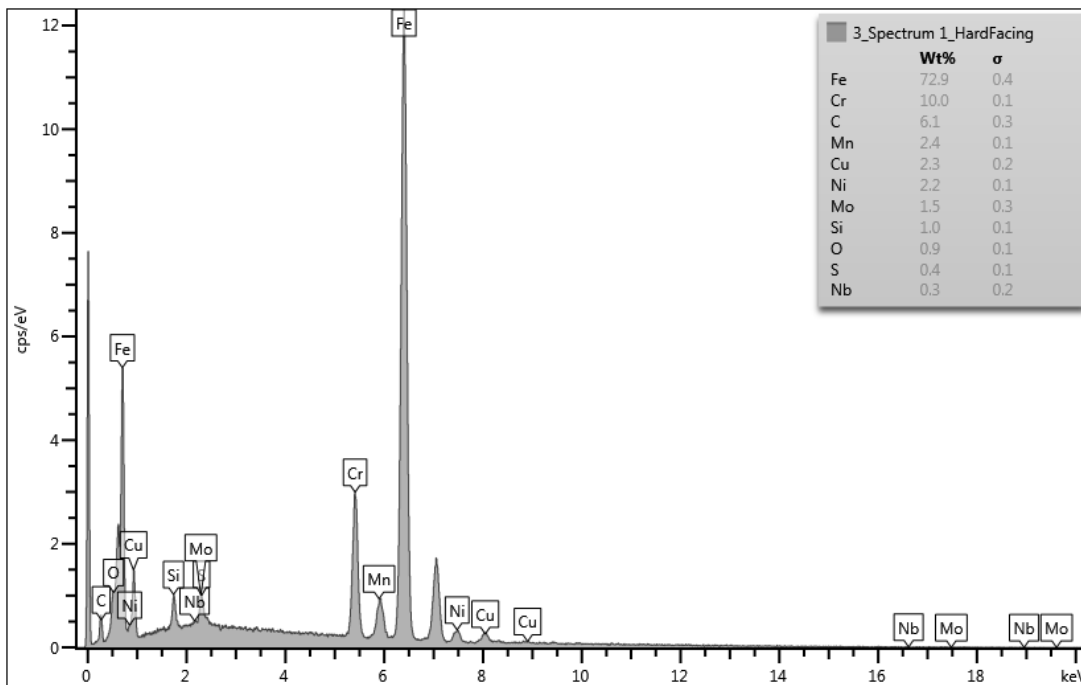
รูปที่ ข.10 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1



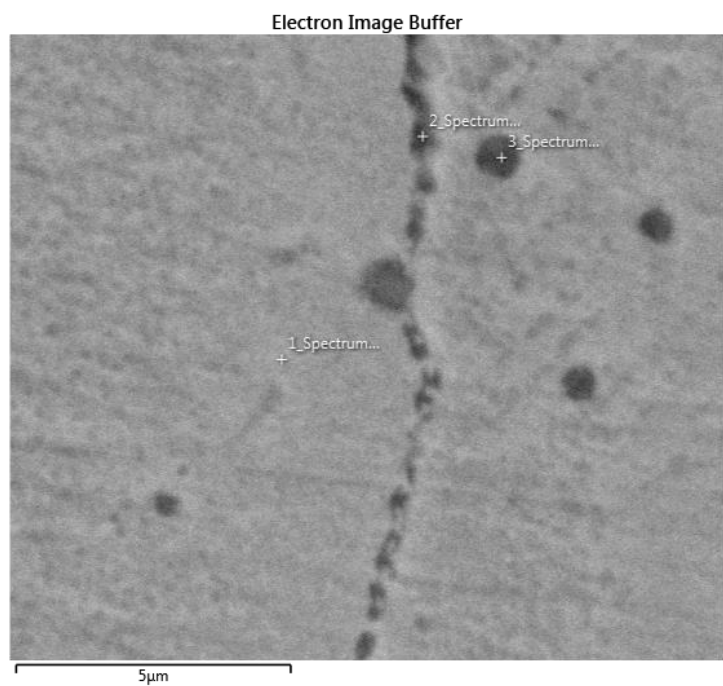
รูปที่ ข.11 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1



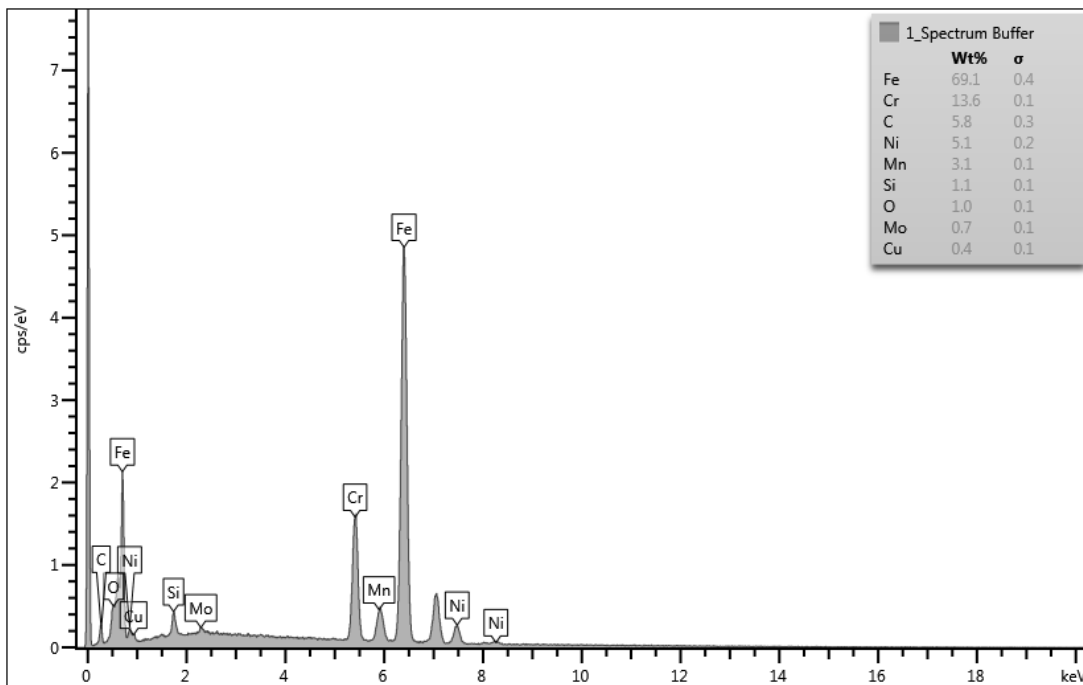
รูปที่ ข.12 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1



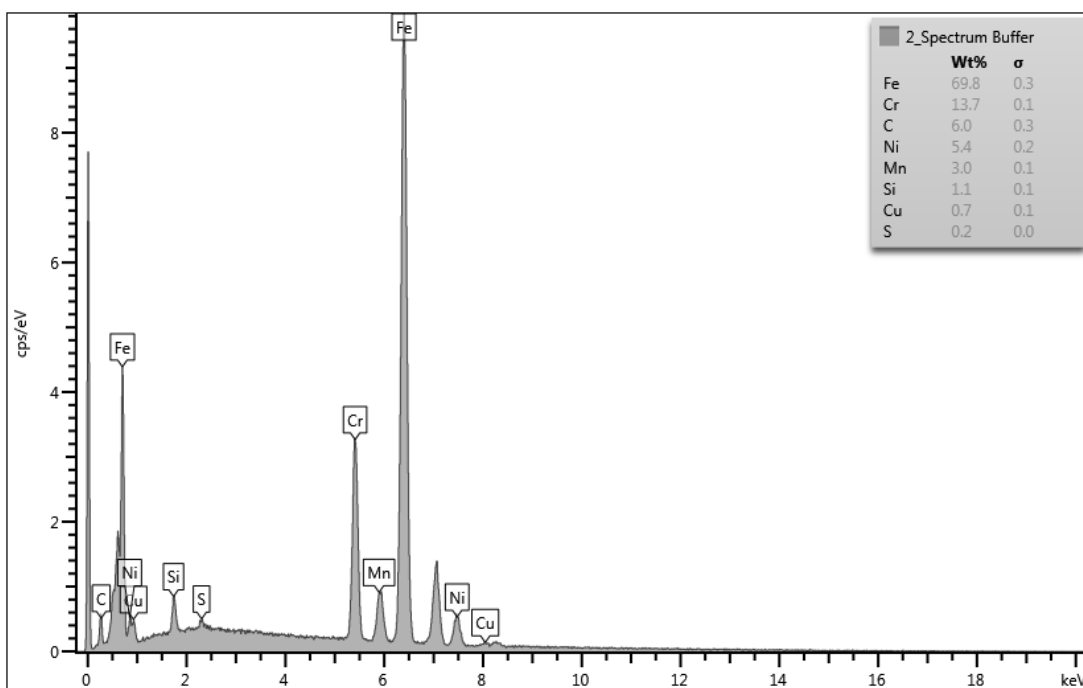
รูปที่ ข.13 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1



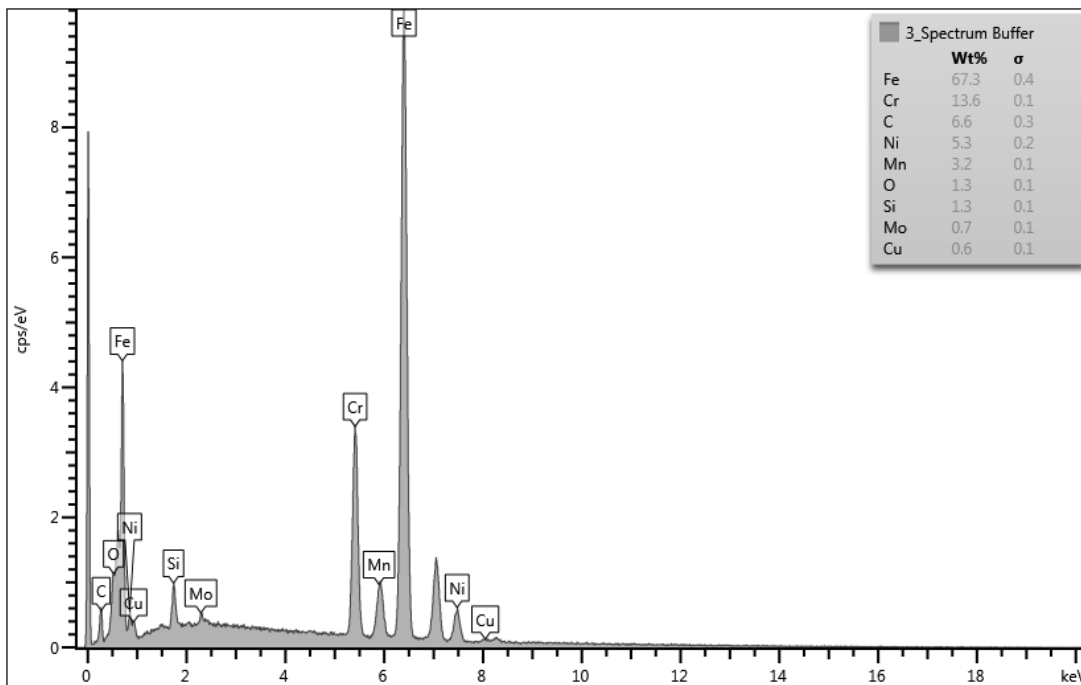
รูปที่ ข.14 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น



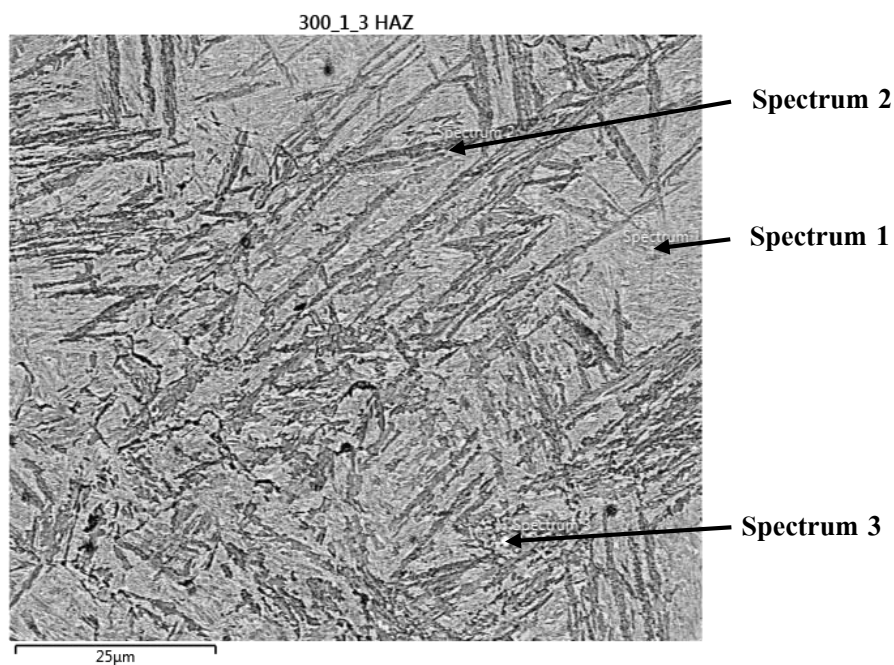
รูปที่ ข.15 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น



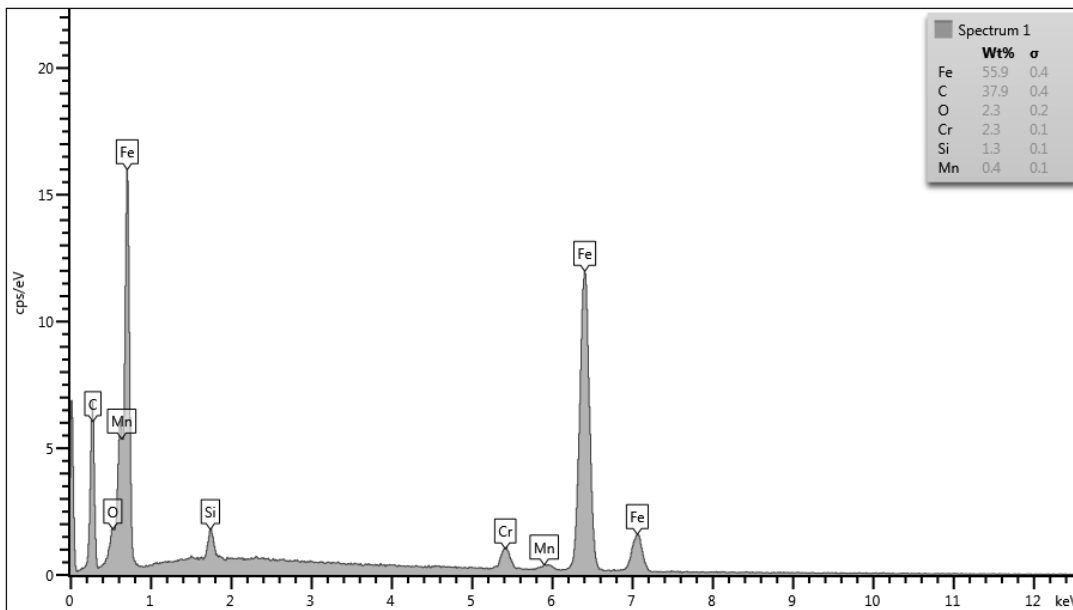
รูปที่ ข.16 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น



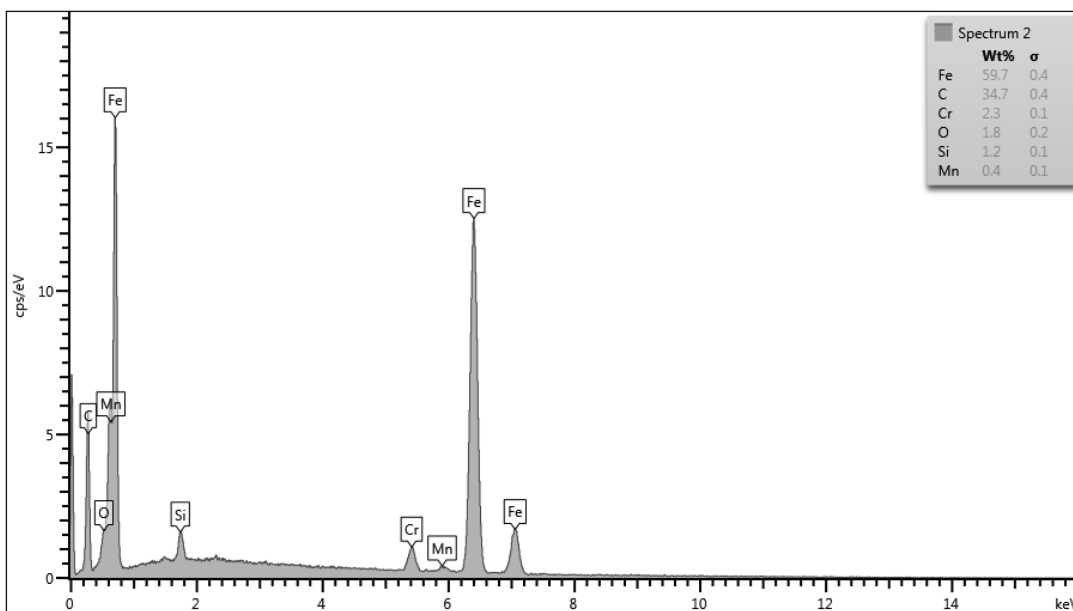
รูปที่ ข.17 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น



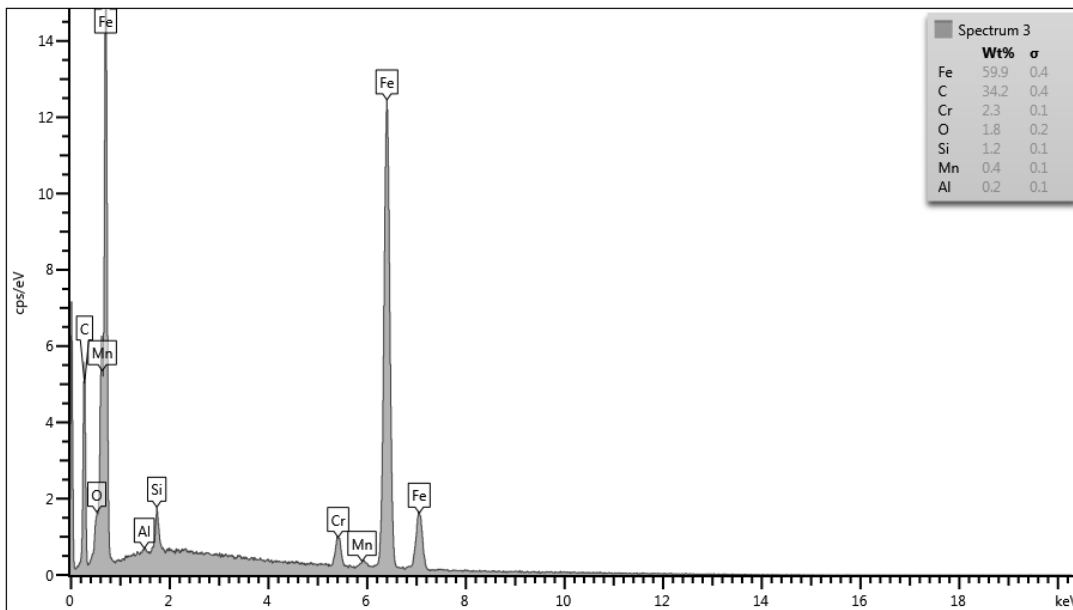
รูปที่ ข.18 โครงสร้างบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน



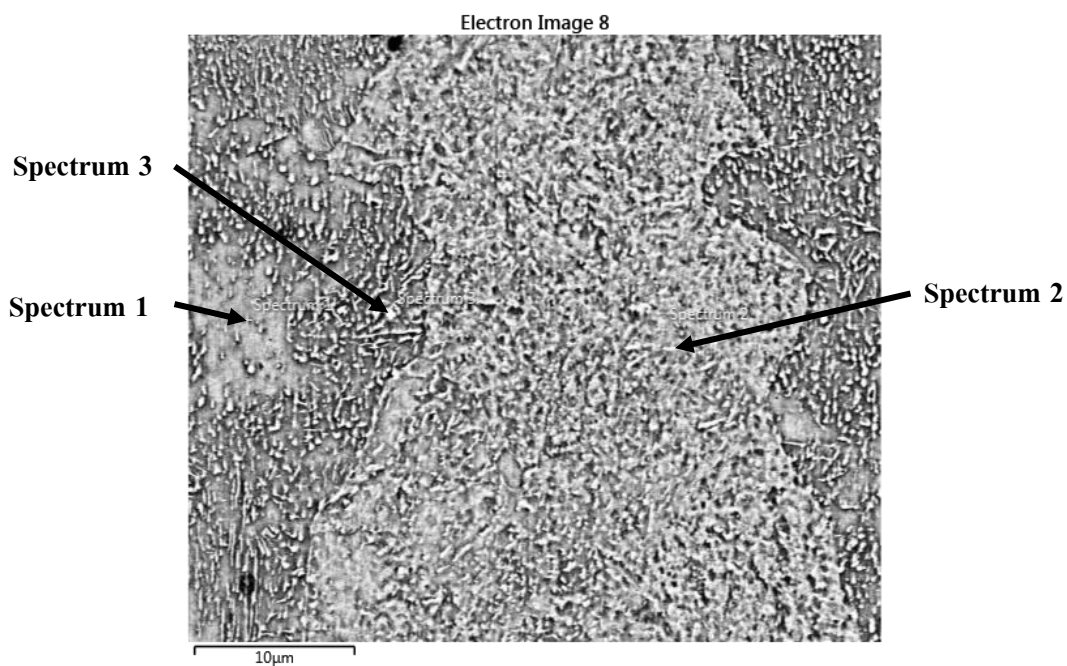
รูปที่ ข.19 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน



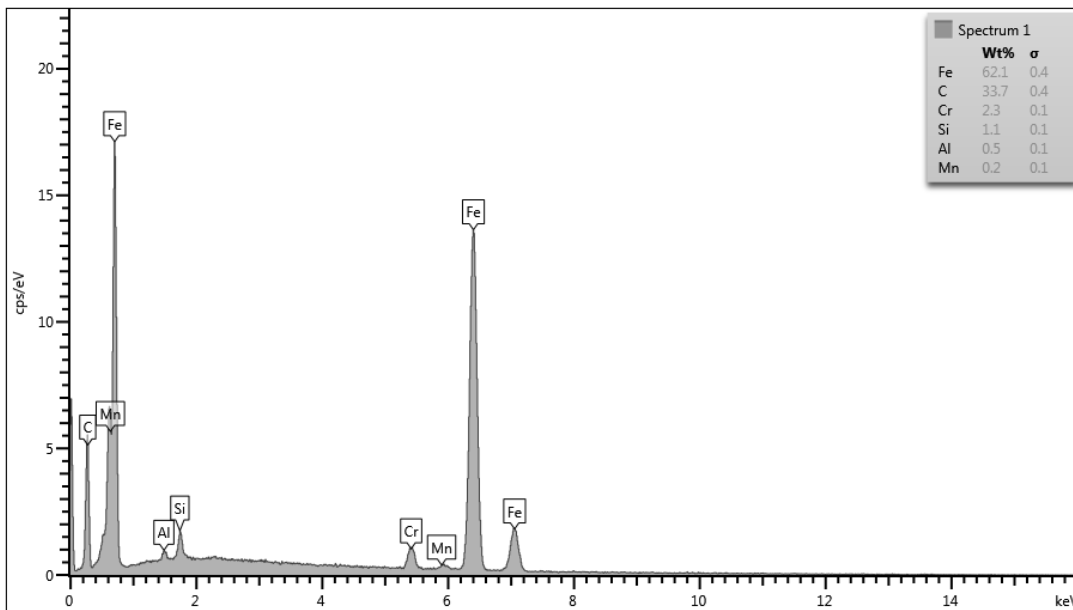
รูปที่ ข.20 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน



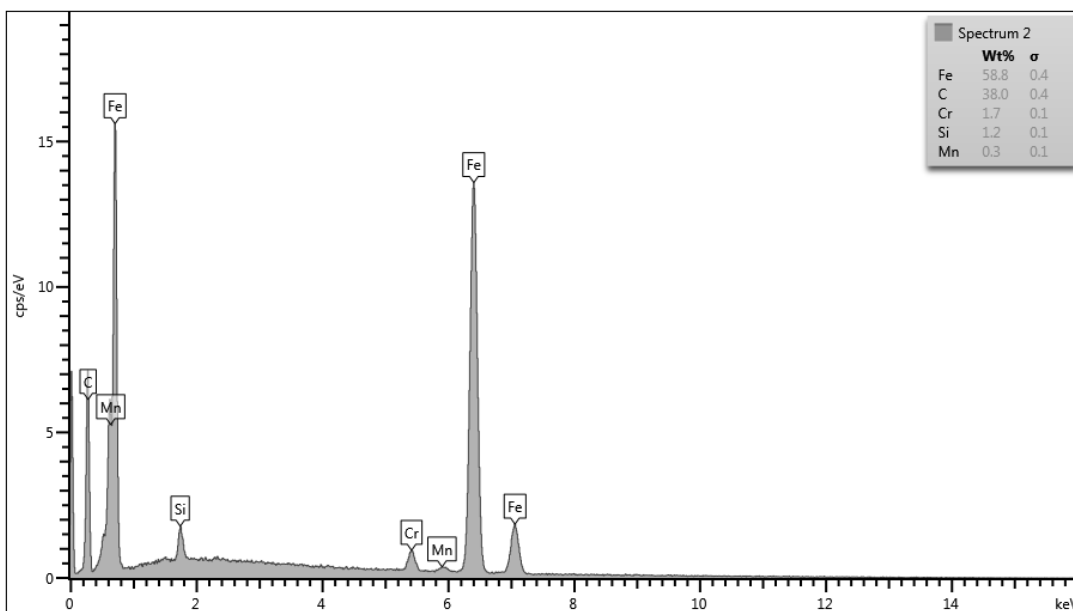
รูปที่ ข.21 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน



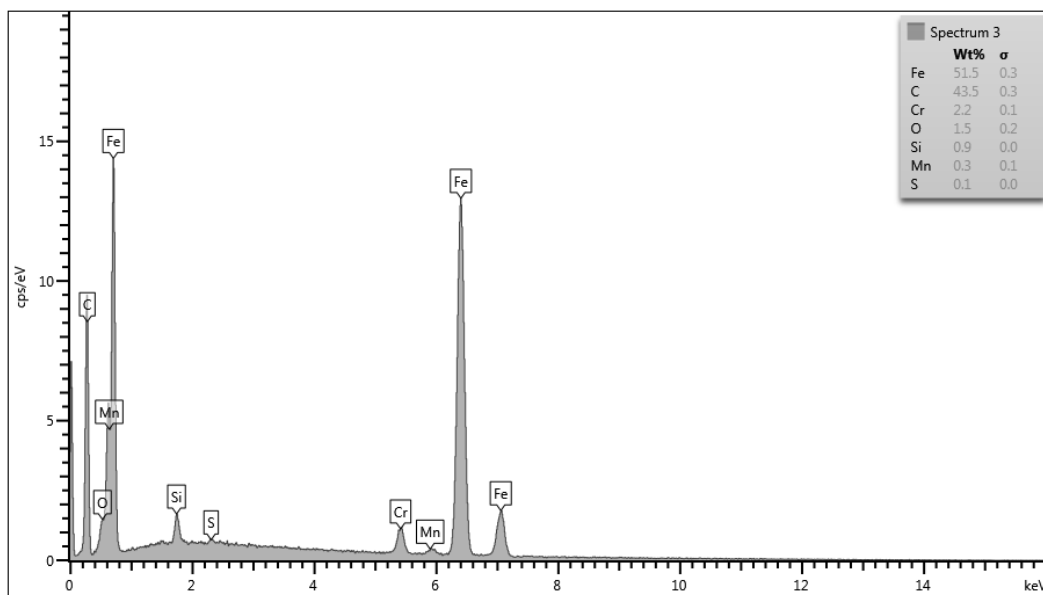
รูปที่ ข.22 โครงสร้างบริเวณโลหะฐาน



รูปที่ ข.23 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 ของโลหะฐาน



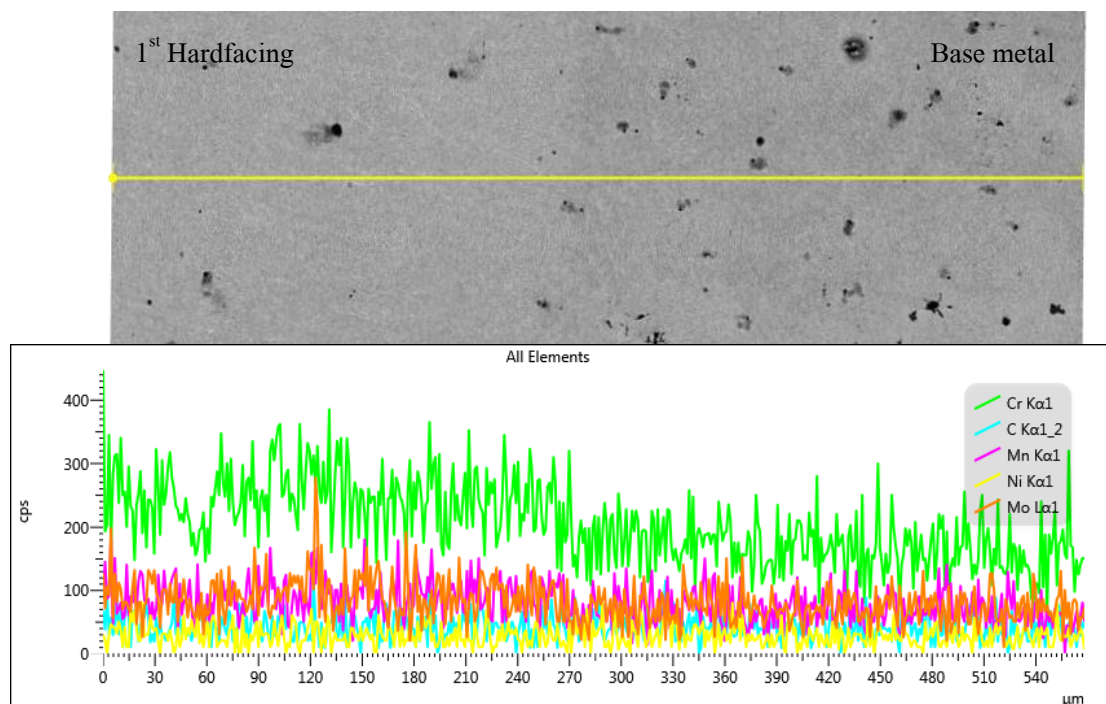
รูปที่ ข.24 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ของโลหะฐาน



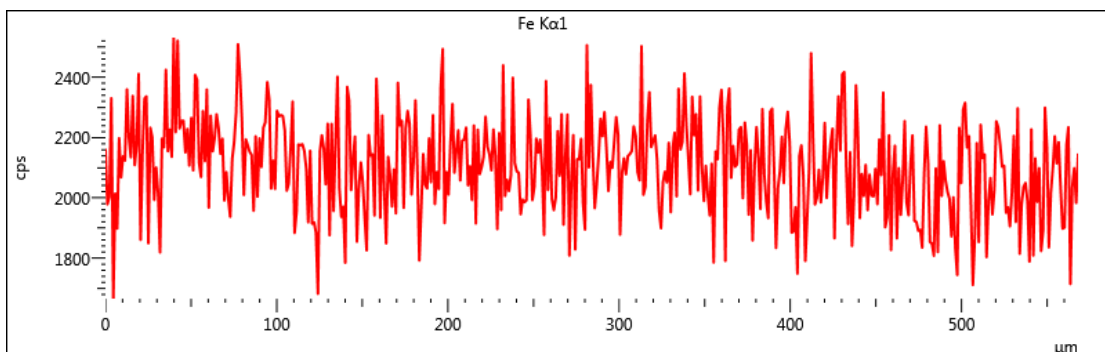
รูปที่ ข.25 ปริมาณธาตุตำแหน่งสเปกตรัมที่ 3 ของโลหะฐาน

2. ผลการทดสอบ EDX line scan

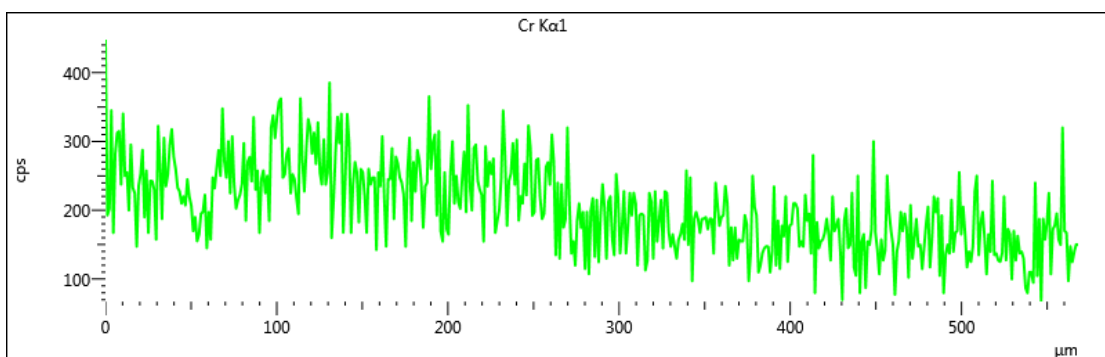
การเชื่อมเงื่อนไข (3H) RT



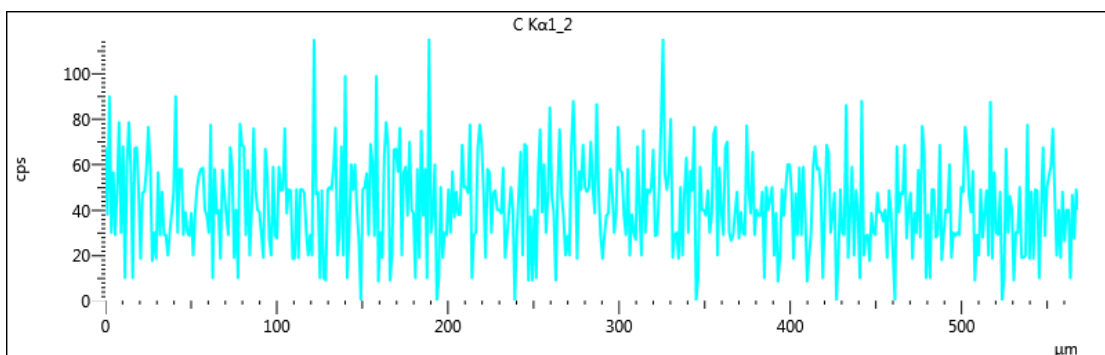
รูปที่ ข.26 การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับ โลหะฐาน



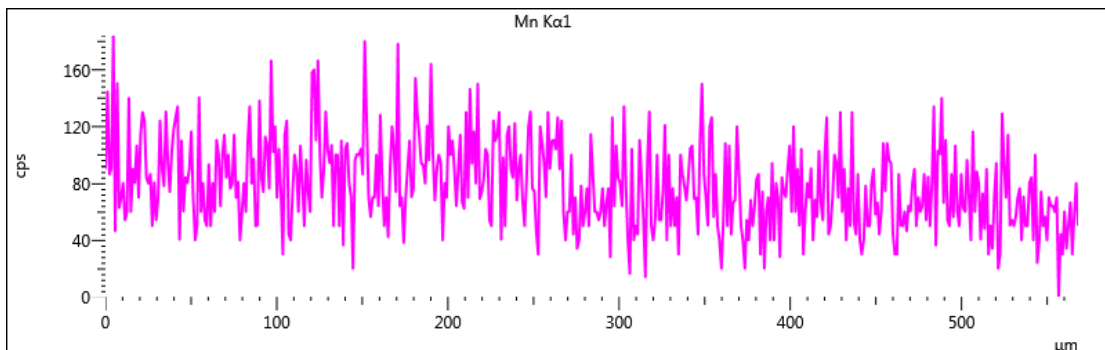
รูปที่ ข.27 การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน



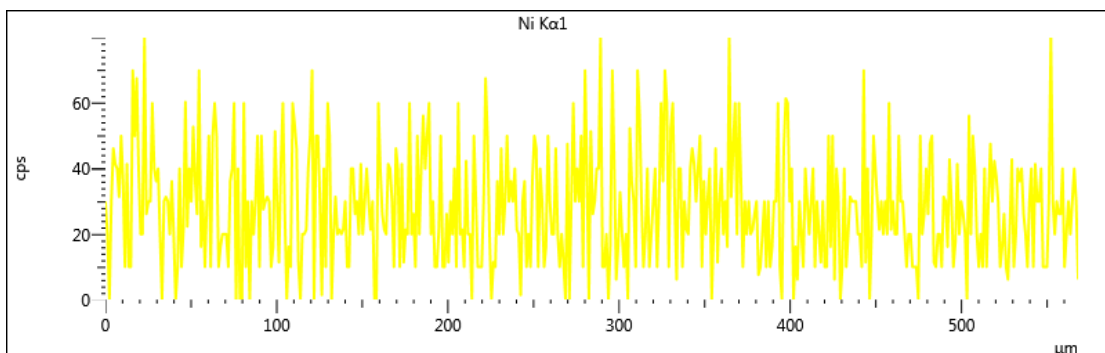
รูปที่ ข.28 การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน



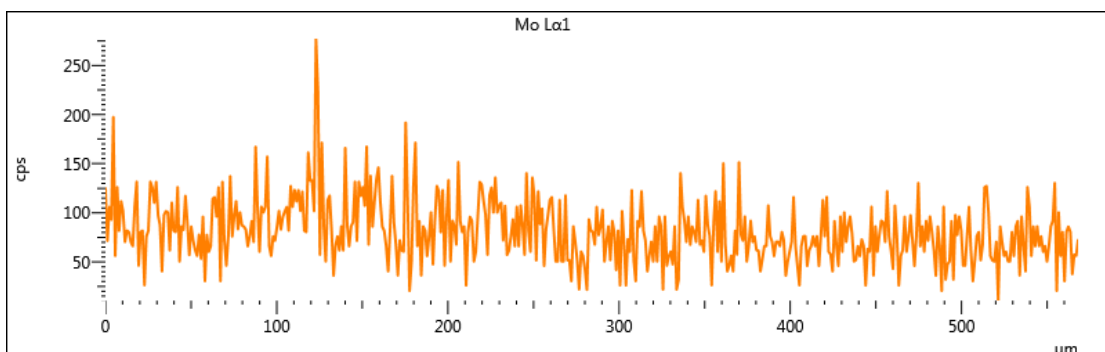
รูปที่ ข.29 การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน



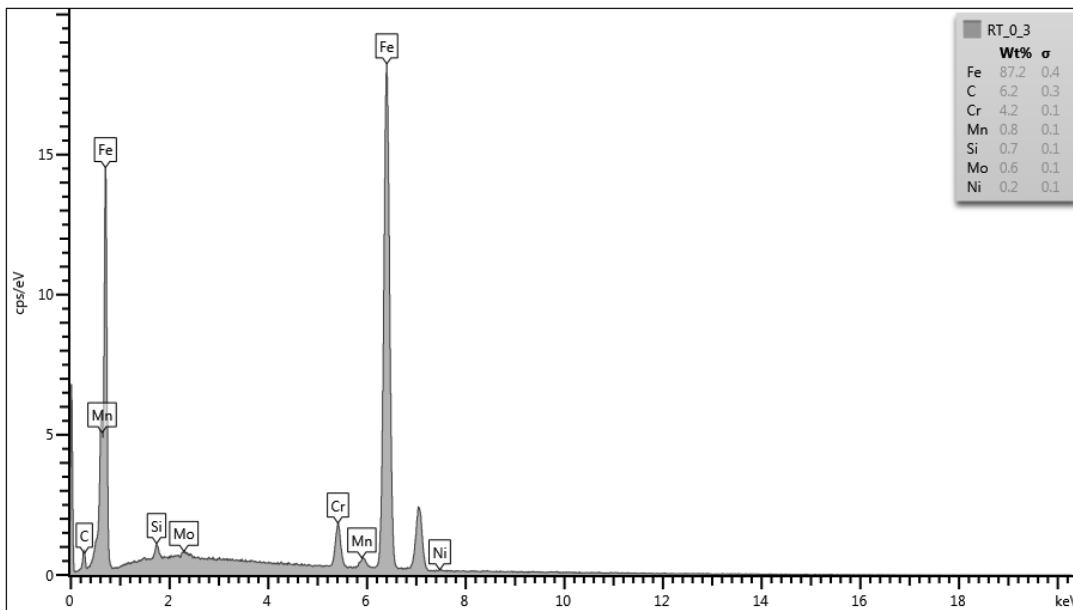
รูปที่ ข.30 การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน



รูปที่ ข.31 การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน

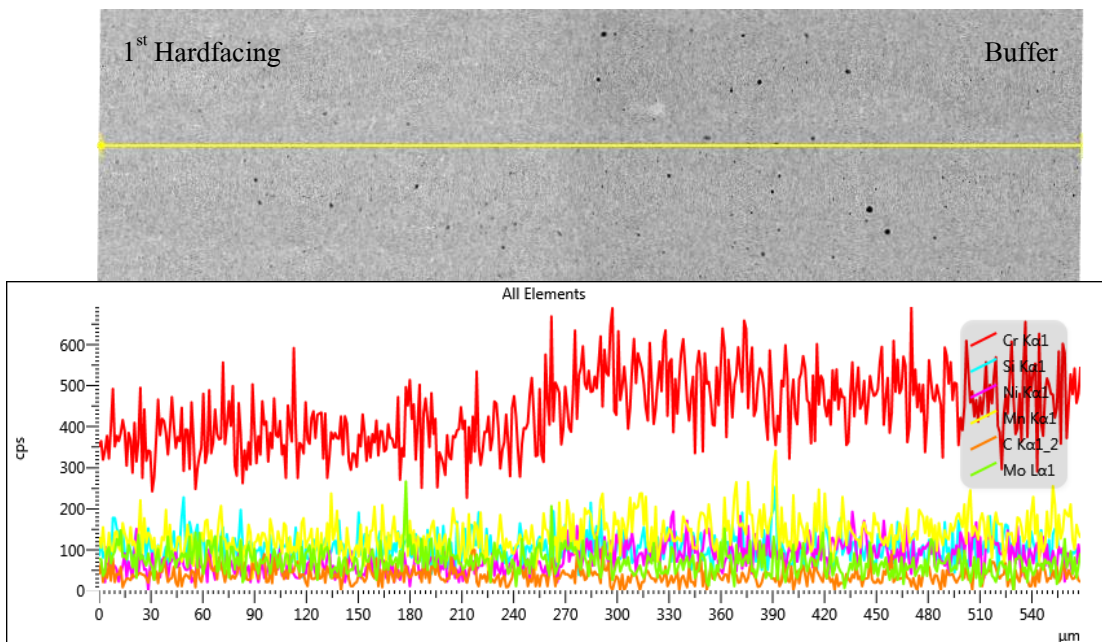


รูปที่ ข.32 การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะฐาน

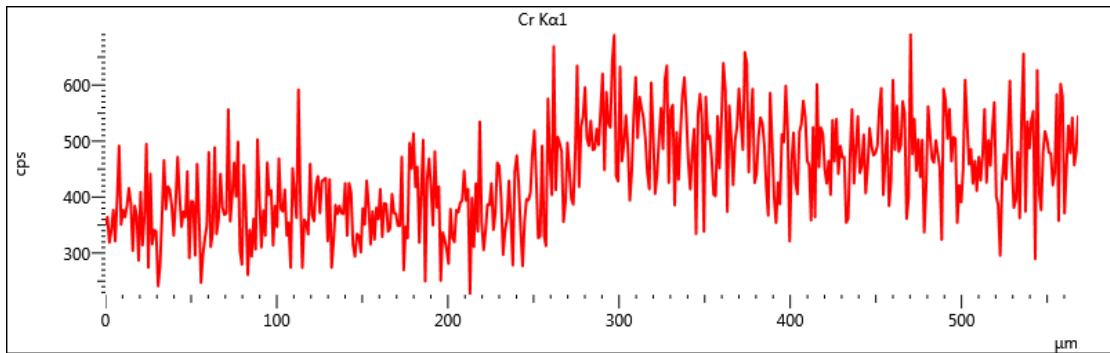


รูปที่ ข.33 ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับ โลหะฐาน

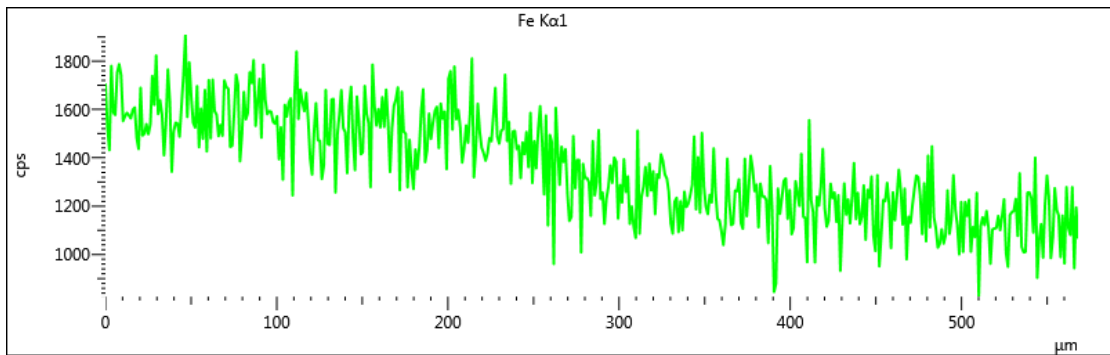
การเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) RT



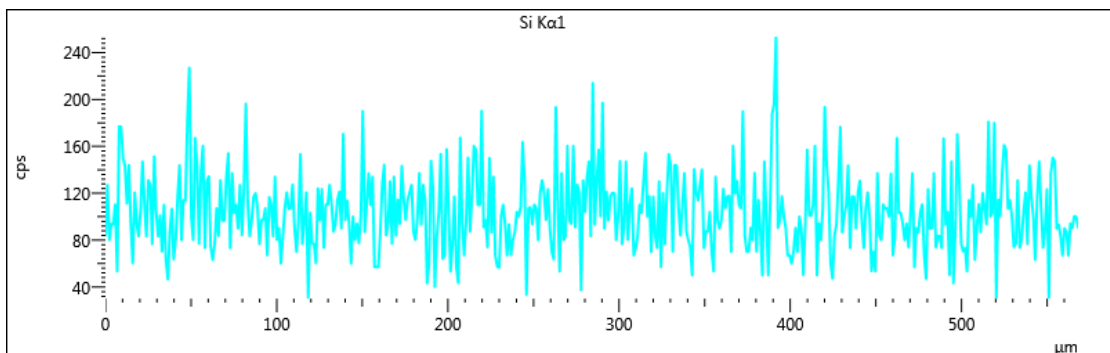
รูปที่ ข.34 การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



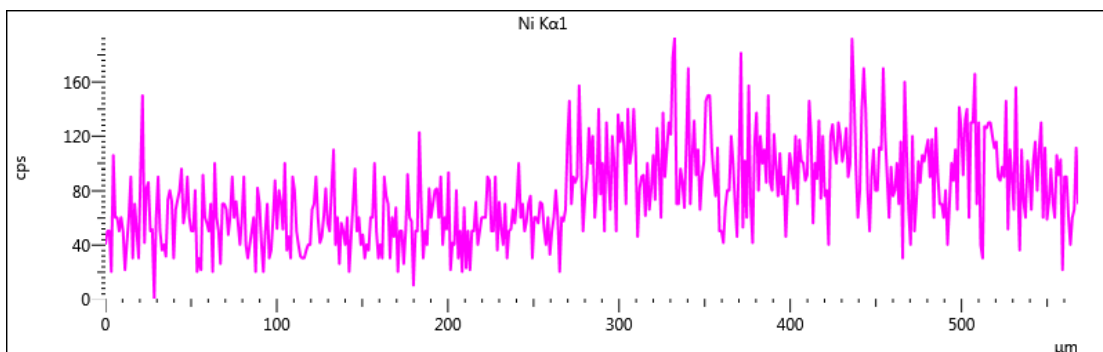
รูปที่ ข.35 การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



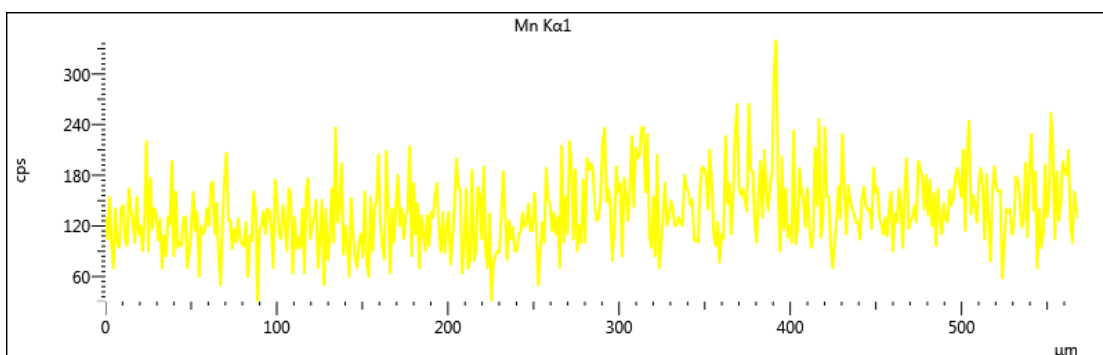
รูปที่ ข.36 การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



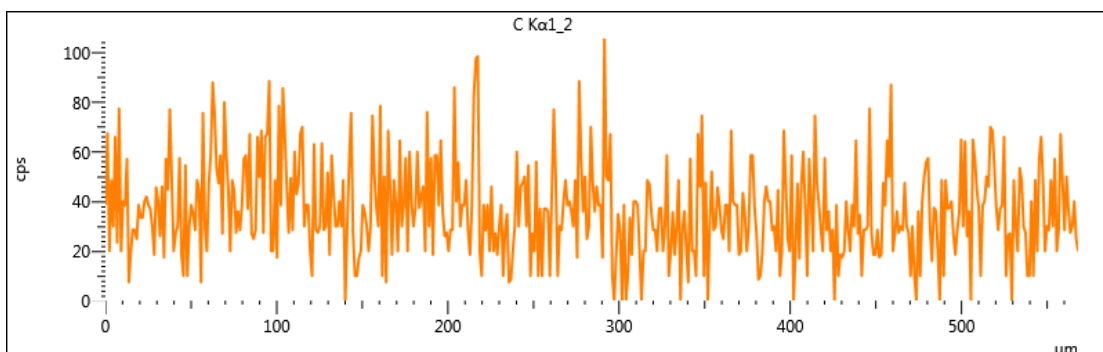
รูปที่ ข.37 การกระจายตัวของซิลิกอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



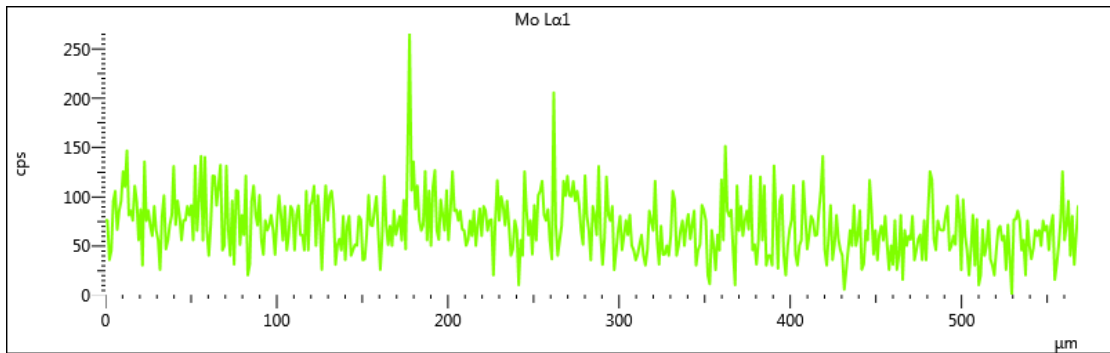
รูปที่ ข.38 การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



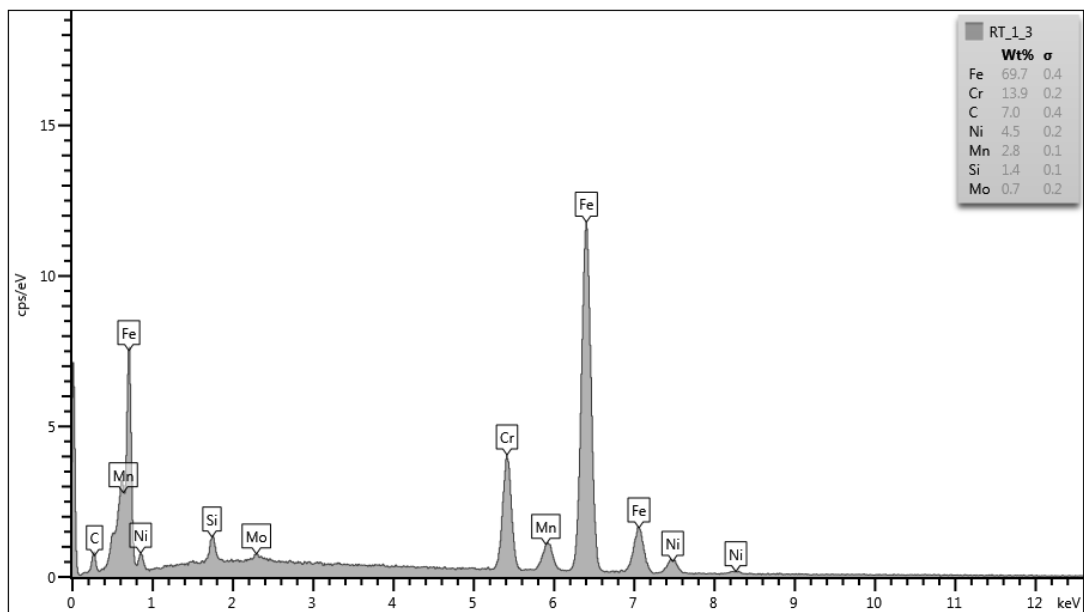
รูปที่ ข.39 การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



รูปที่ ข.40 การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น

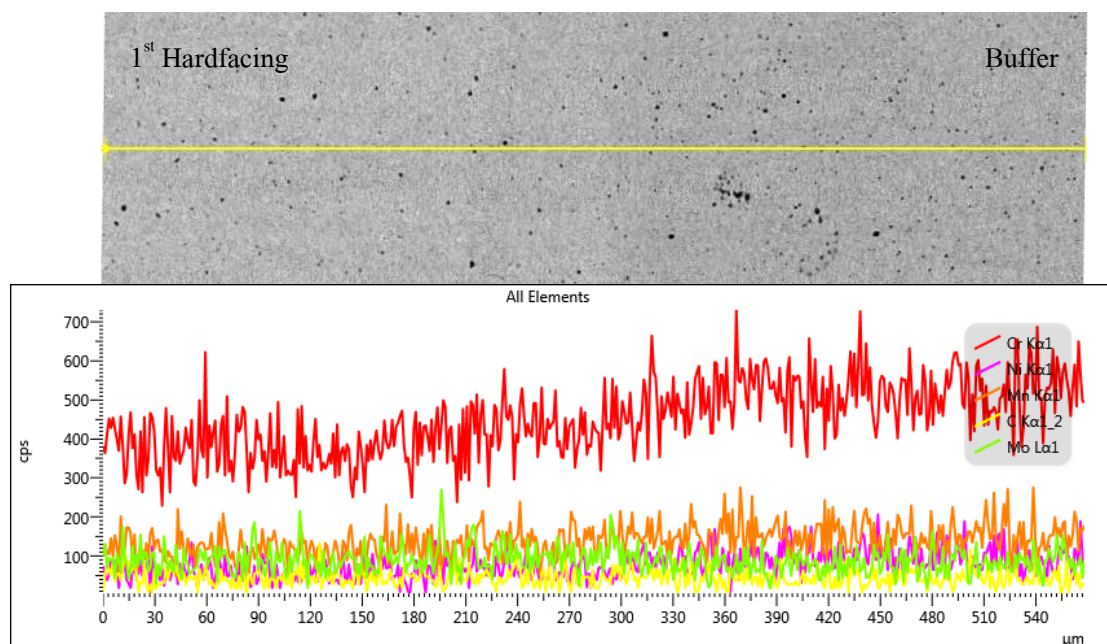


รูปที่ ข.41 การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น

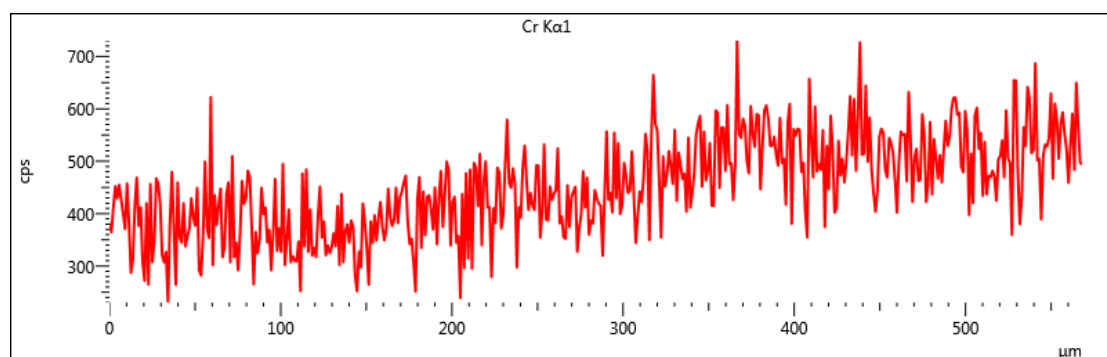


รูปที่ ข.42 ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น

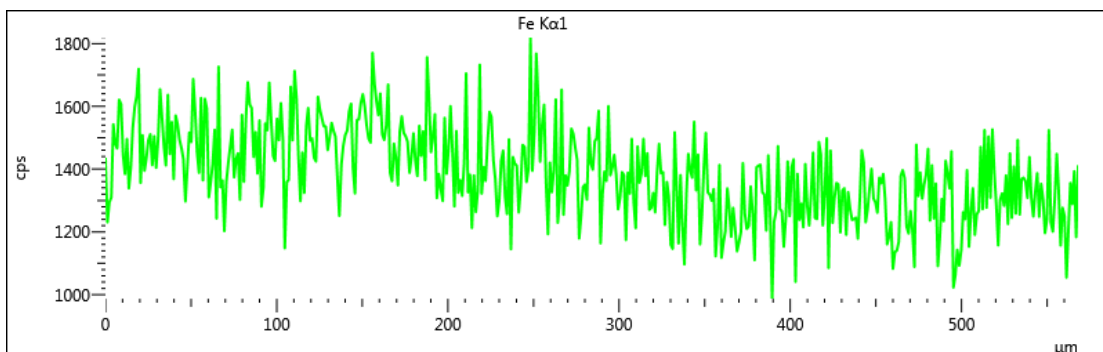
การเชื่อมเงื่อนไข (1B-3H) 300



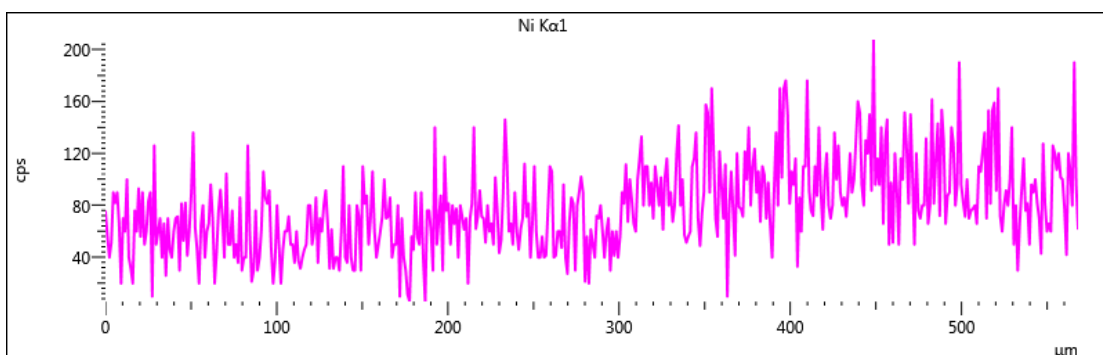
รูปที่ ข.43 การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



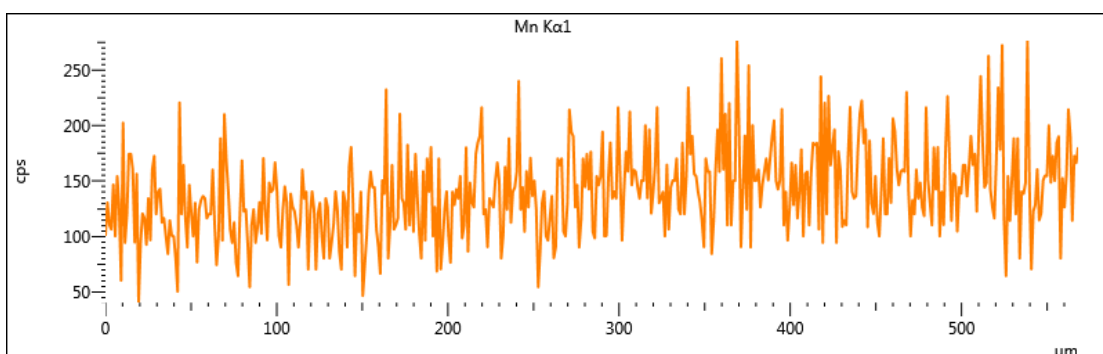
รูปที่ ข.44 การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



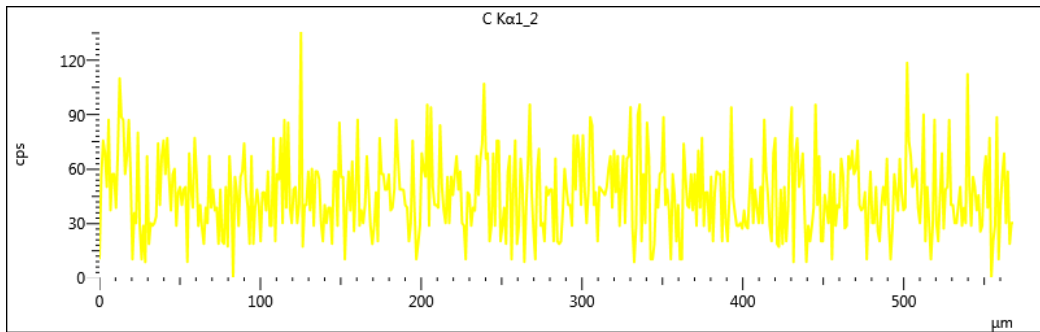
รูปที่ ข.45 การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



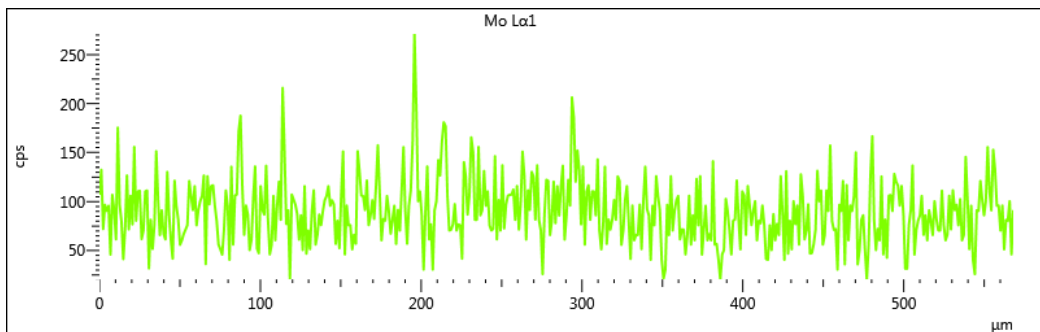
รูปที่ ข.46 การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



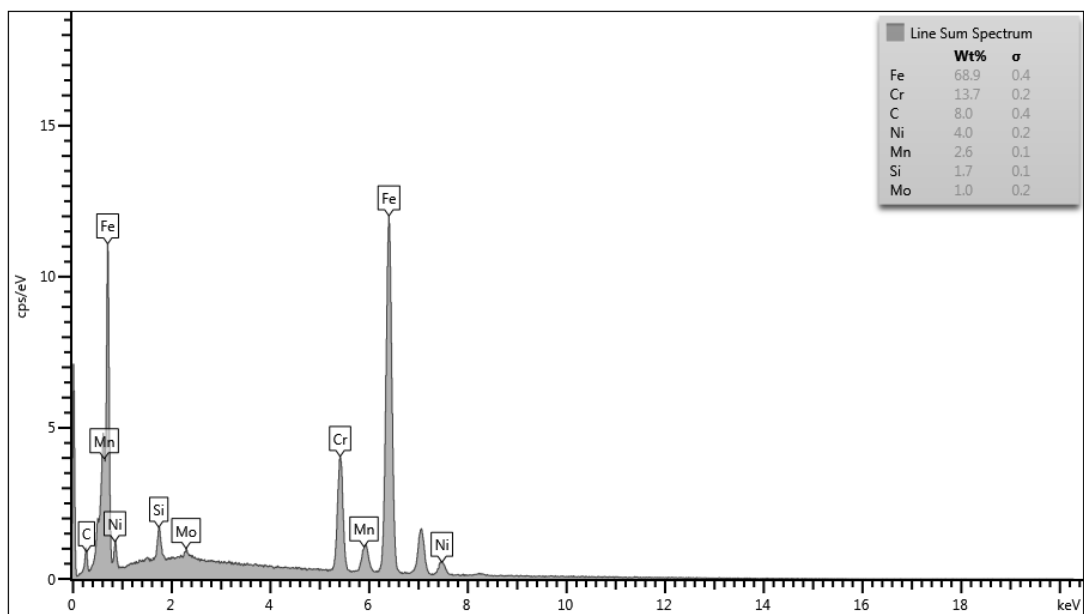
รูปที่ ข.47 การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



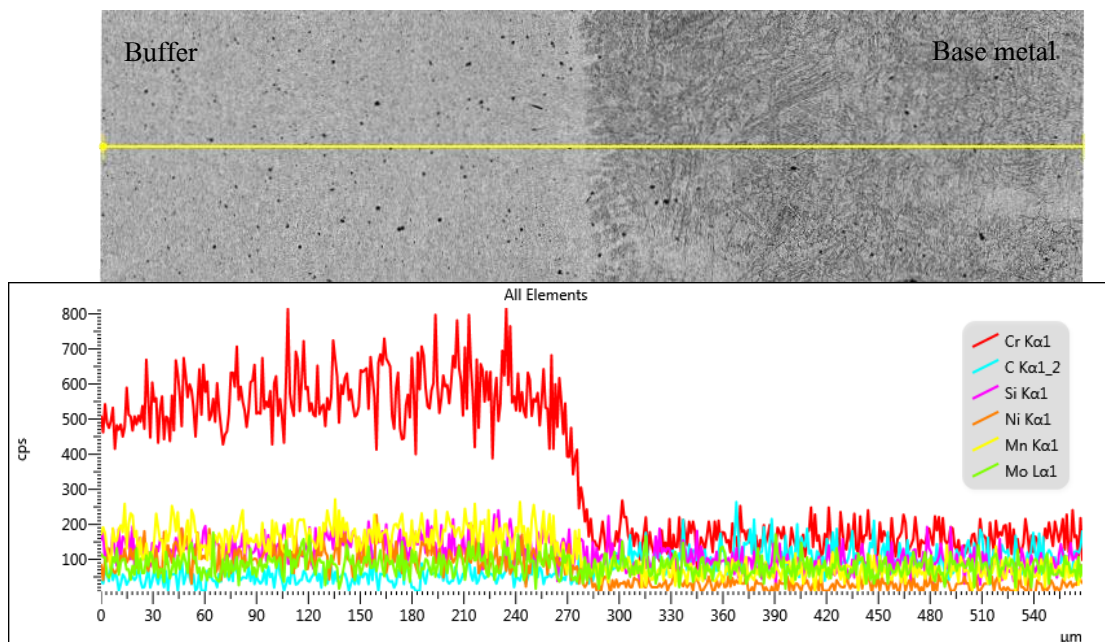
รูปที่ ข.48 การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



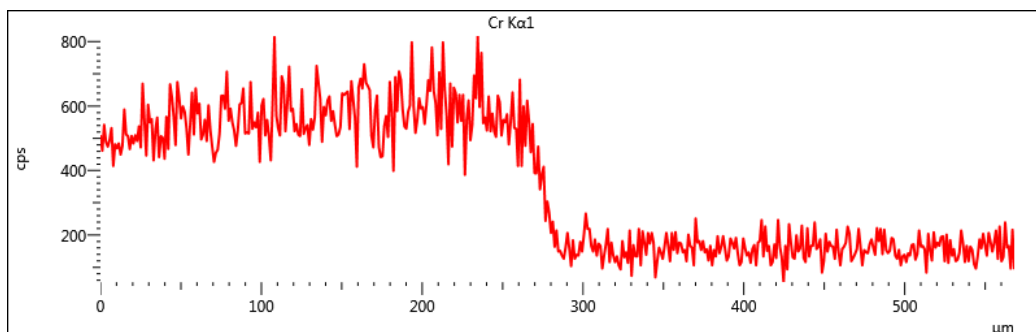
รูปที่ ข.49 การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



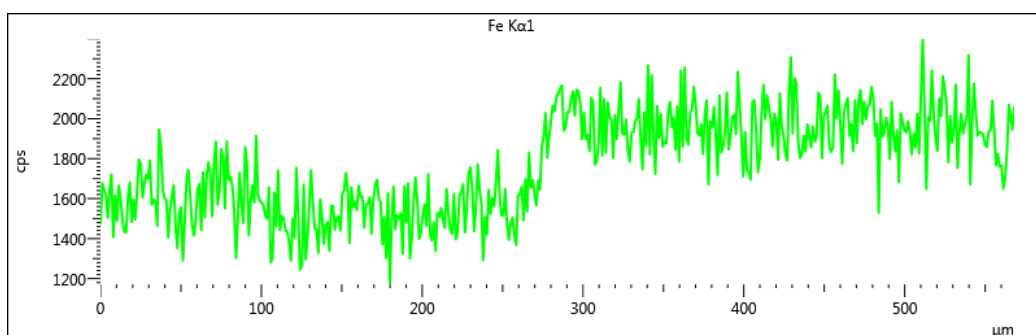
รูปที่ ข.50 ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 กับชั้นรองพื้น



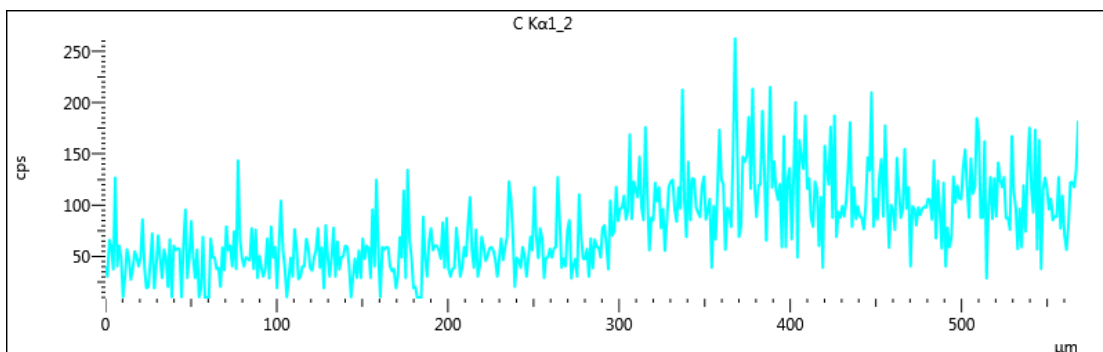
รูปที่ ข.51 การกระจายตัวของธาตุบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



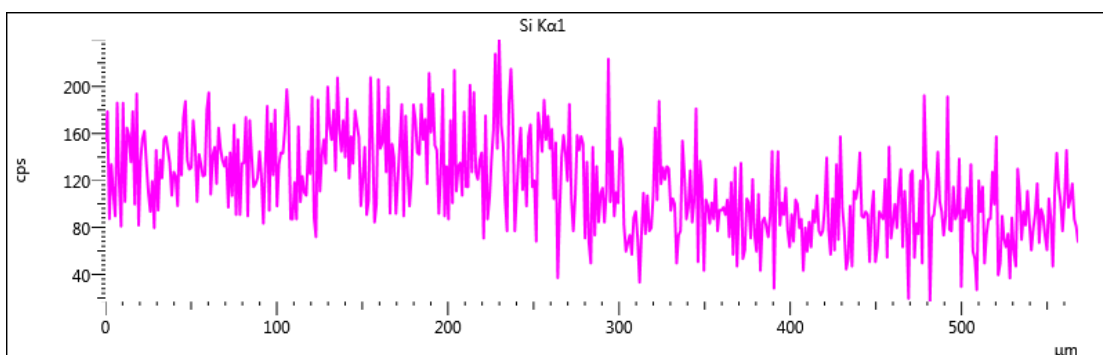
รูปที่ ข.52 การกระจายตัวของโครเมียมบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



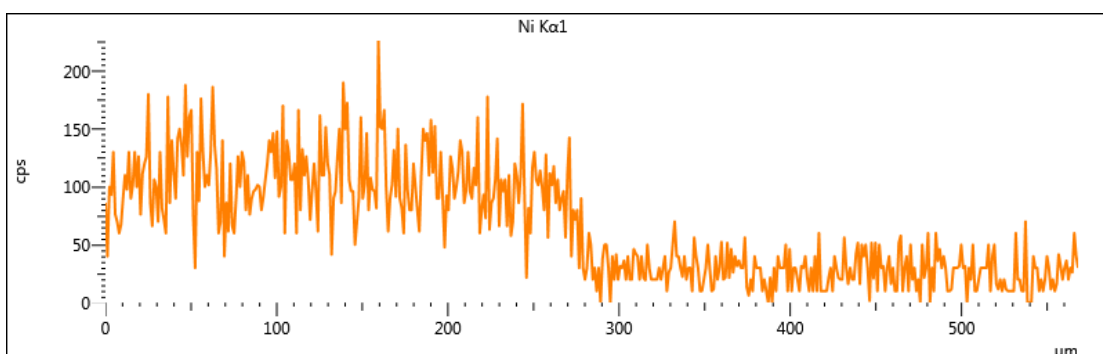
รูปที่ ข.53 การกระจายตัวของเหล็กบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



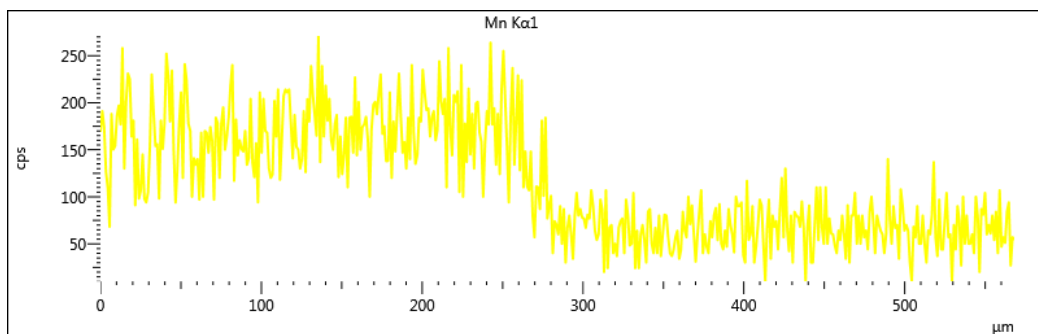
รูปที่ ข.54 การกระจายตัวของคาร์บอนบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



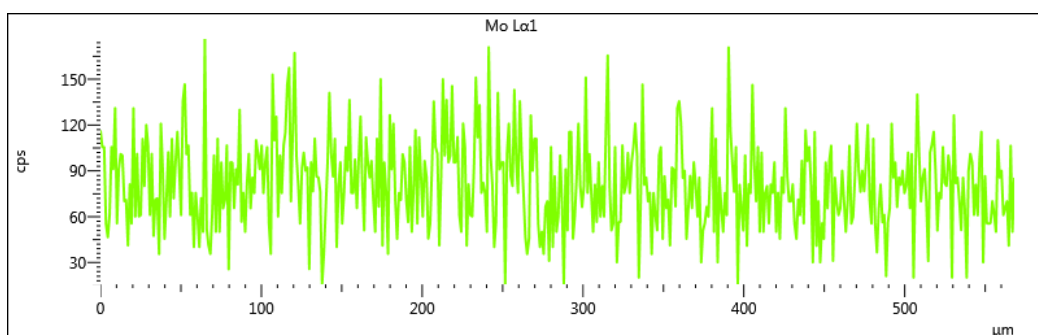
รูปที่ ข.55 การกระจายตัวของซิลิกอนบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



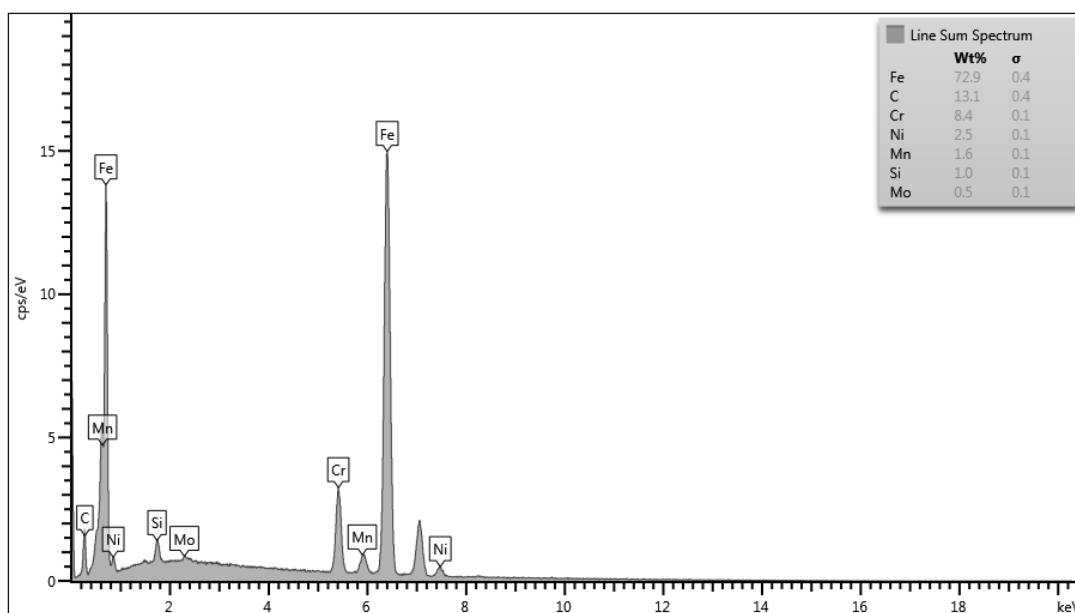
รูปที่ ข.56 การกระจายตัวของนิกเกิลบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



รูปที่ ข.57 การกระจายตัวของแมงกานีสบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



รูปที่ ข.58 การกระจายตัวของโมลิบดีนัมบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน



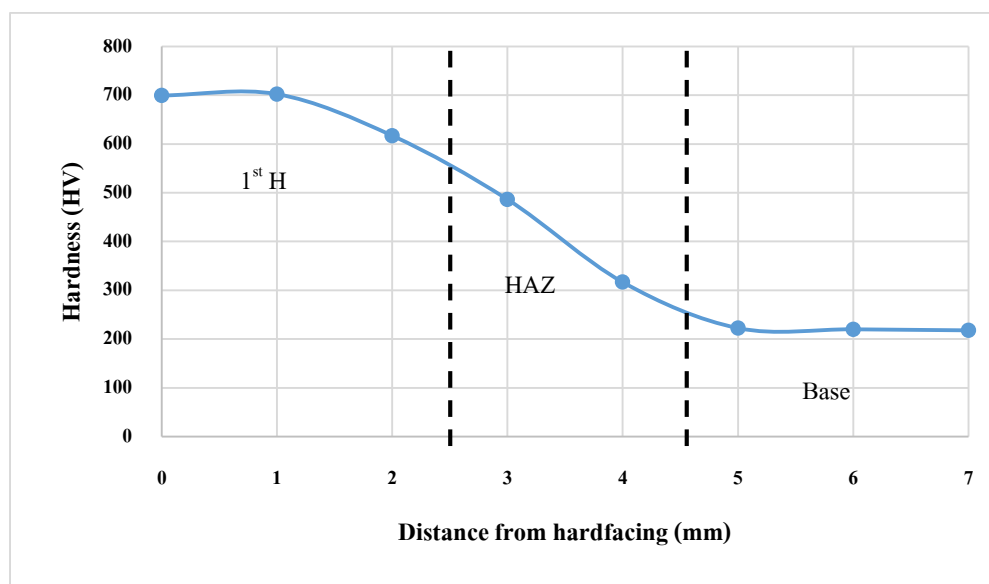
รูปที่ ข.59 ปริมาณธาตุที่กระจายตัวบริเวณชั้นรองพื้นกับโลหะฐาน

ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1H) RT

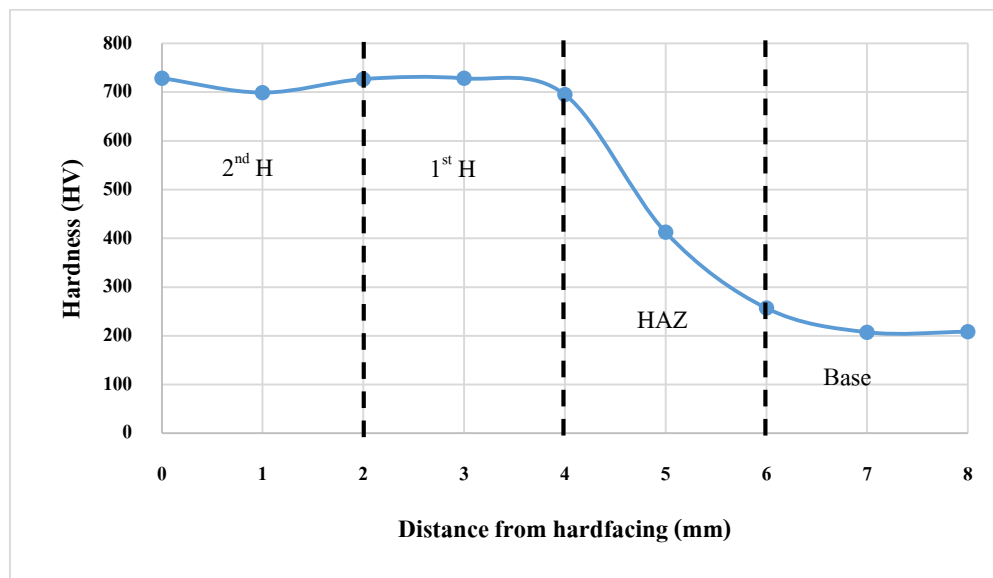
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	714.9	683.9	699.4
1	709.3	695.1	702.2
2	706.8	527.3	617.05
3	413.8	558.7	486.25
4	288.7	344.6	316.65
5	211.5	233.4	222.45
6	216.3	223.6	219.95
7	218.8	216.8	217.8



รูปที่ ค.1 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1H) RT

ตารางที่ ค.2 ค่าความแข็งของการเชื่อม (2H) RT

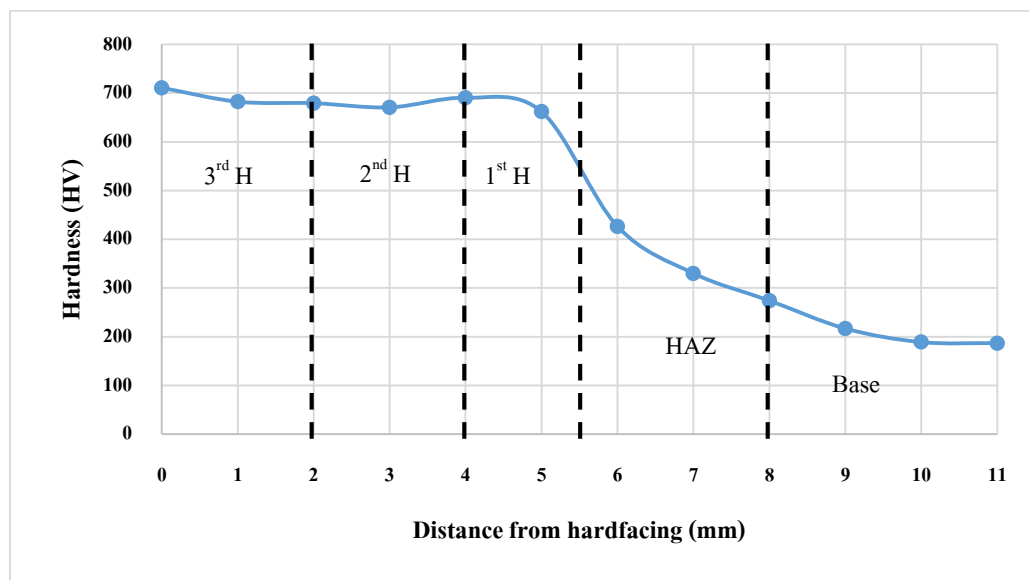
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	733.2	724.2	728.7
1	742.6	655.7	699.15
2	737.9	715.7	726.8
3	741.1	715.4	728.25
4	713.7	676.3	695
5	502.1	322.9	412.5
6	272.5	241.1	256.8
7	212.6	202.2	207.4
8	218.8	197.9	208.35



รูปที่ ค.2 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (2H) RT

ตารางที่ ค.3 ค่าความแข็งของการเชื่อม (3H) RT

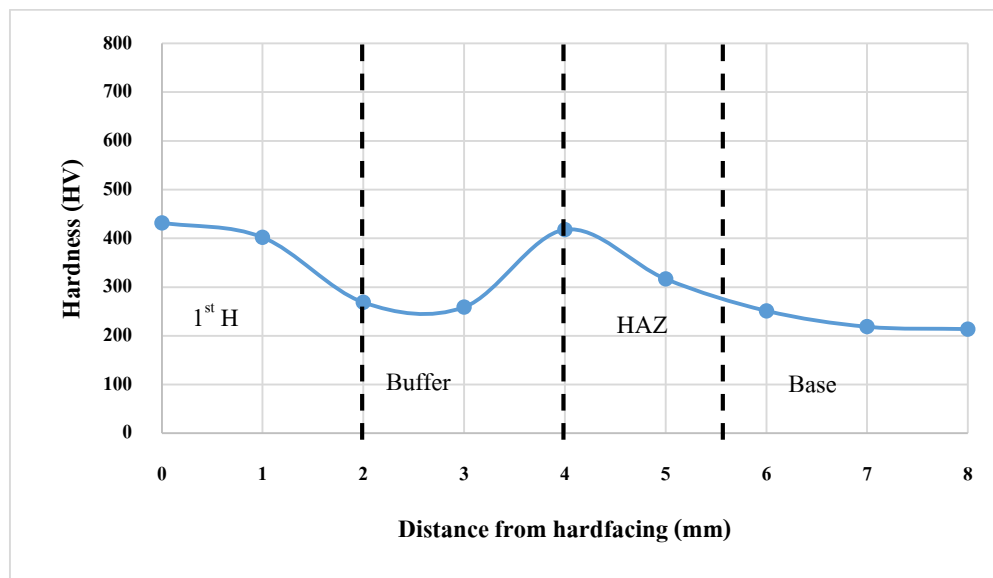
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	700.2	721.4	710.8
1	632.6	731.9	682.25
2	637.1	721.4	679.25
3	641.1	700.2	670.65
4	648.7	731.9	690.3
5	654.2	669.4	661.8
6	397.4	455.4	426.4
7	367.7	292.5	330.1
8	306.3	241.9	274.1
9	232	201.7	216.85
10	191.5	186.4	188.95
11	191.5	182.2	186.85



รูปที่ ค.3 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (3H) RT

ตารางที่ ค.4 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) RT

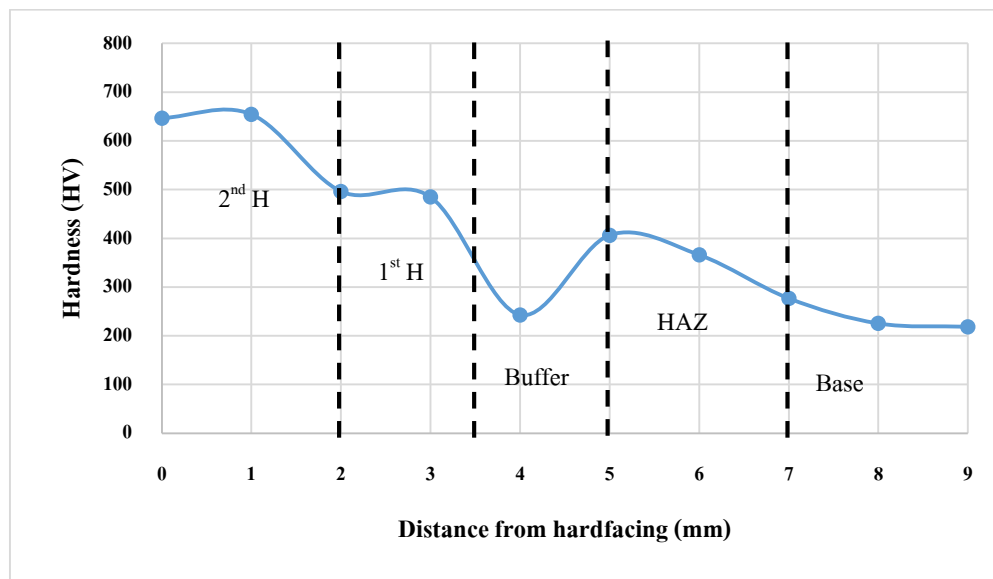
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	340.4	523.4	431.9
1	467.7	336.3	402
2	296	241.3	268.65
3	241.7	275.9	258.8
4	447.6	387.9	417.75
5	357.4	275.9	316.65
6	289.2	213.3	251.25
7	228.2	209	218.6
8	213.3	214.3	213.8



รูปที่ ค.4 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) RT

ตารางที่ ค.5 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) RT

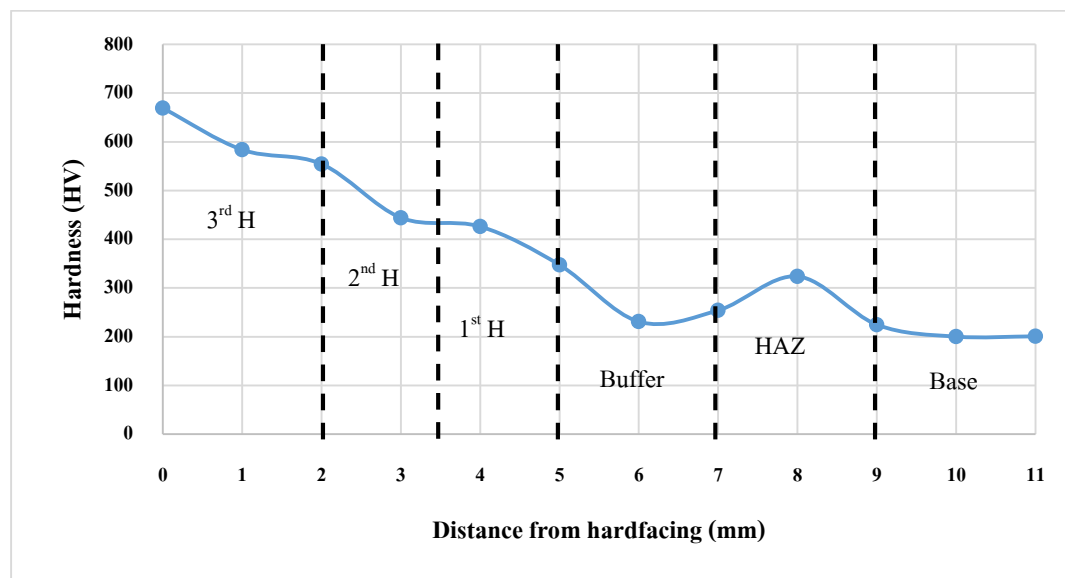
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	671.5	621.8	646.65
1	653.4	655.4	654.4
2	524.4	468.2	496.3
3	496.2	473.3	484.75
4	240.1	245.6	242.85
5	405.6	407.4	406.5
6	326	405.9	365.95
7	259	294.5	276.75
8	225.7	225	225.35
9	225.2	211.8	218.5



รูปที่ ค.5 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) RT

ตารางที่ ค.6 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) RT

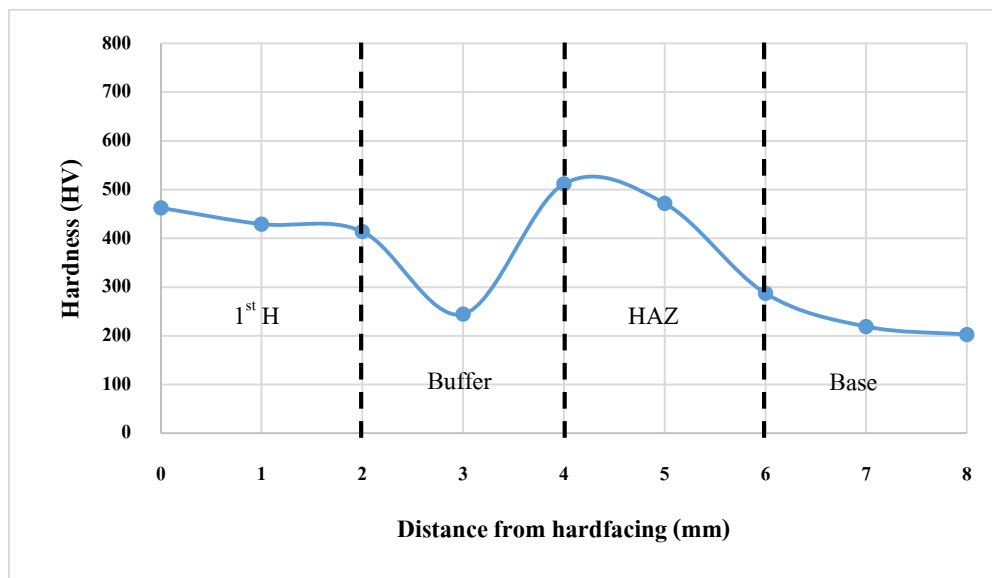
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	673.8	664.4	669.1
1	579.4	587.9	583.65
2	562.4	546.5	554.45
3	405.3	483.3	444.3
4	423.3	429	426.15
5	373.6	321.3	347.45
6	220.5	241.4	230.95
7	232	276.3	254.15
8	355.3	292.2	323.75
9	225.2	224.2	224.7
10	197.3	203.1	200.2
11	200.1	201.5	200.8



รูปที่ ค.6 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) RT

ตารางที่ ค.7 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 250

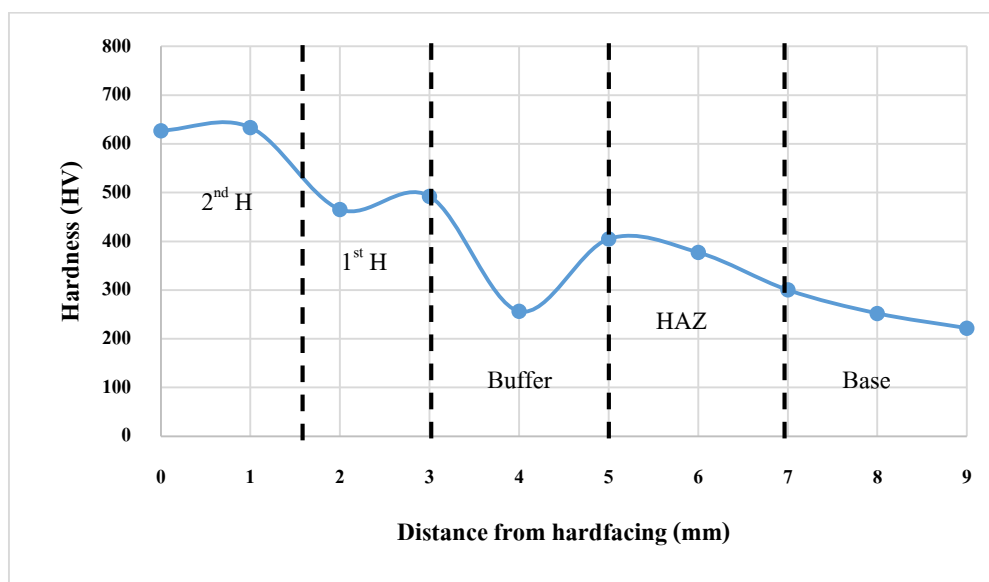
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	451.1	473.9	462.5
1	384.4	473.9	429.15
2	418.1	409.6	413.85
3	254.7	234.2	244.45
4	526.4	496.8	511.6
5	428.4	515.1	471.75
6	267.3	307.4	287.35
7	211	227	219
8	199.6	205.5	202.55



รูปที่ ค.7 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 250

ตารางที่ ค.8 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 250

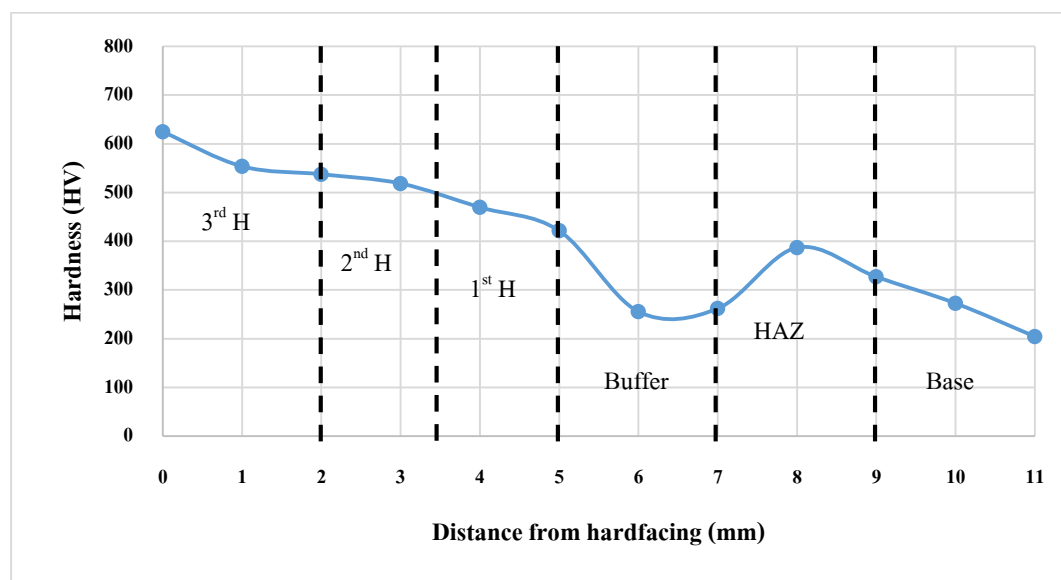
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	605.2	649	627.1
1	602.8	664.4	633.6
2	492.3	438.9	465.6
3	524.1	460.8	492.45
4	250.9	261.9	256.4
5	388.2	421.3	404.75
6	396	358.5	377.25
7	324.4	276.1	300.25
8	270.2	234.2	252.2
9	230.4	213.3	221.85



รูปที่ ค.8 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 250

ตารางที่ ค.9 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 250

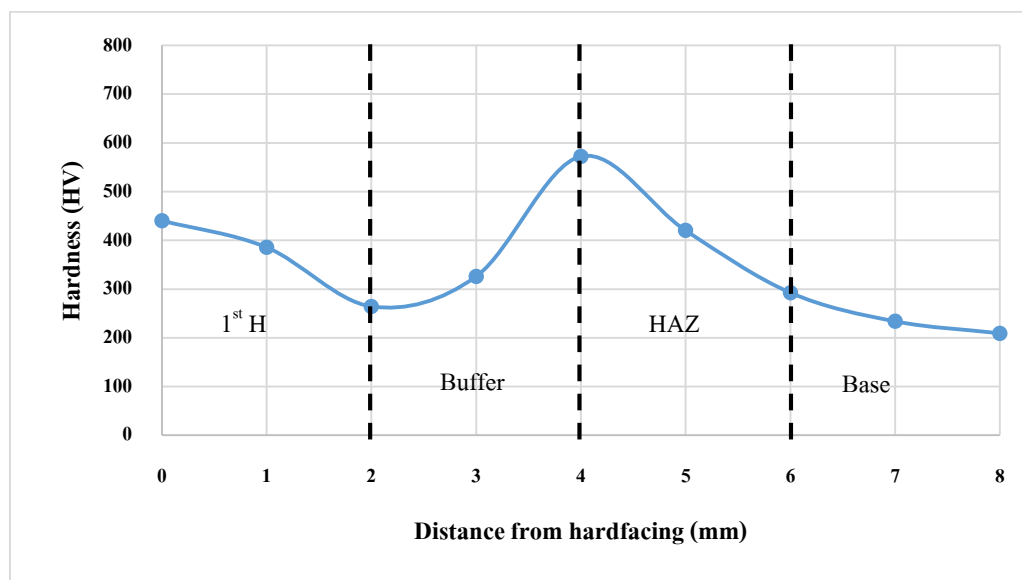
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	599.4	649.8	624.6
1	530.7	576.8	553.75
2	503.9	571.1	537.5
3	531.4	505.6	518.5
4	466.3	472.9	469.6
5	422.6	420.5	421.55
6	280.6	230.6	255.6
7	258.9	265	261.95
8	401.6	372.5	387.05
9	392.6	261.3	326.95
10	318.4	226.9	272.65
11	228.9	180.3	204.6



รูปที่ ค.9 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 250

ตารางที่ ค.10 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 300

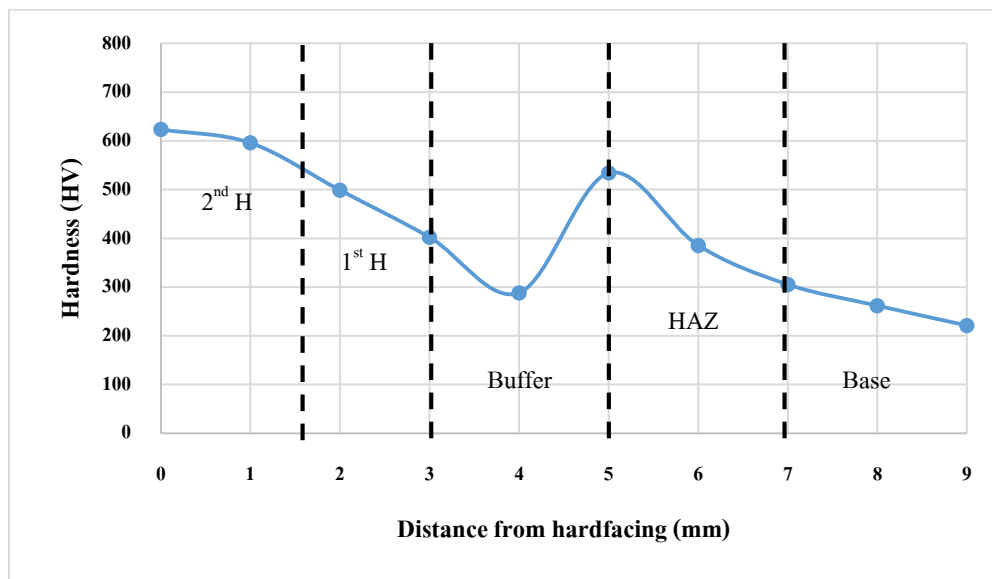
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	467.9	412.9	440.4
1	364.5	406.7	385.6
2	244.9	283.9	264.4
3	237.2	414.6	325.9
4	588.7	555.8	572.25
5	414.4	426	420.2
6	304.3	280.8	292.55
7	223	244.6	233.8
8	195	223.3	209.15



รูปที่ ค.10 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 300

ตารางที่ ค.11 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 300

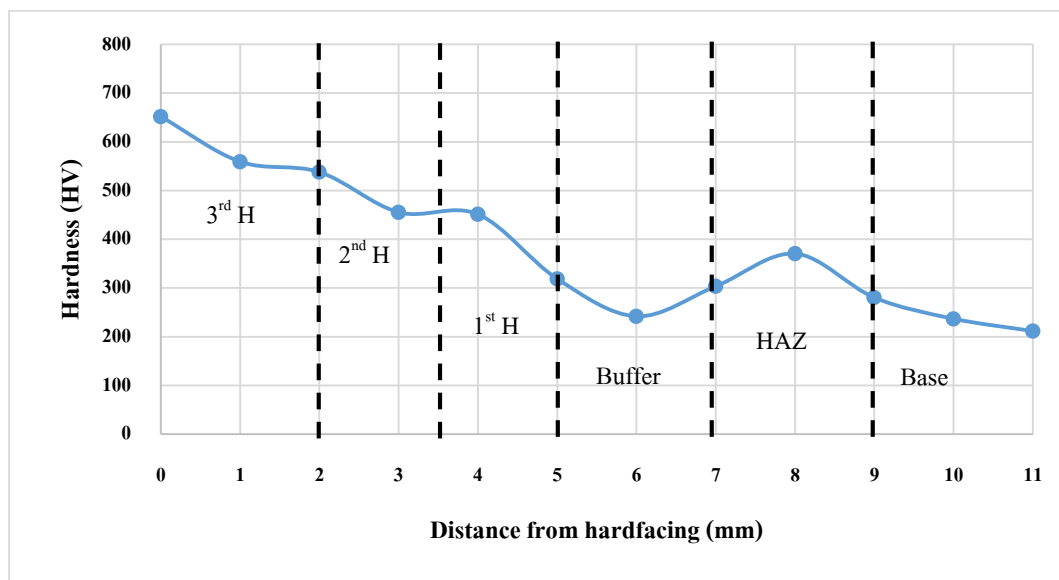
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	625.9	620.8	623.35
1	627	564.5	595.75
2	477	520.6	498.8
3	422.2	382.3	402.25
4	276	300.2	288.1
5	529.2	538.9	534.05
6	405.3	365.7	385.5
7	290.4	320.2	305.3
8	240.8	282.9	261.85
9	222.2	220.1	221.15



รูปที่ ค.11 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 300

ตารางที่ ค.12 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 300

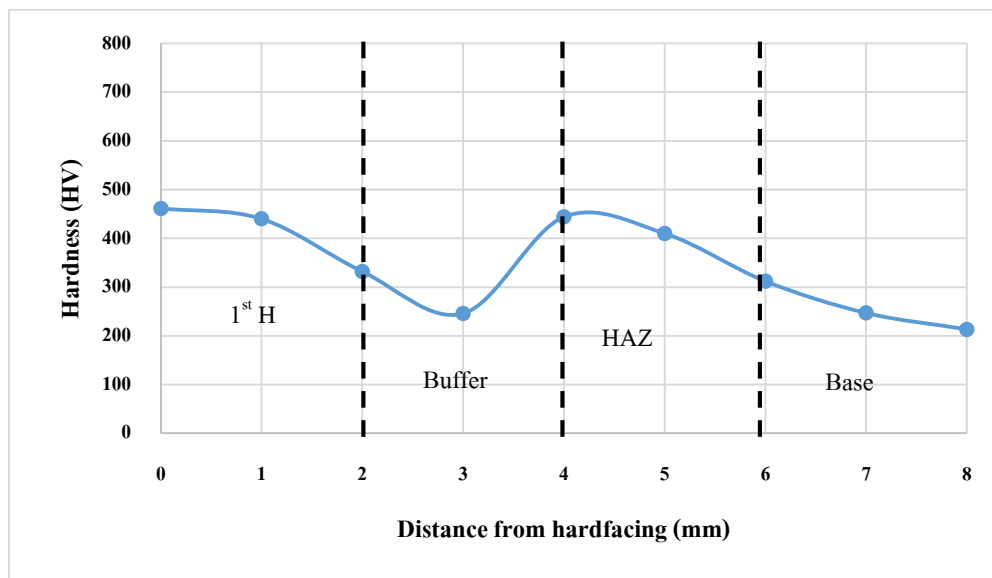
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	678.8	624.5	651.65
1	545	573.5	559.25
2	526.2	549.7	537.95
3	420.3	490.4	455.35
4	412.7	489.9	451.3
5	224.8	412.7	318.75
6	237.1	246.9	242
7	331.6	275.3	303.45
8	365.3	375.6	370.45
9	278.4	282.2	280.3
10	230.5	243.2	236.85
11	209.4	213.7	211.55



รูปที่ ค.12 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 300

ตารางที่ ค.13 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 350

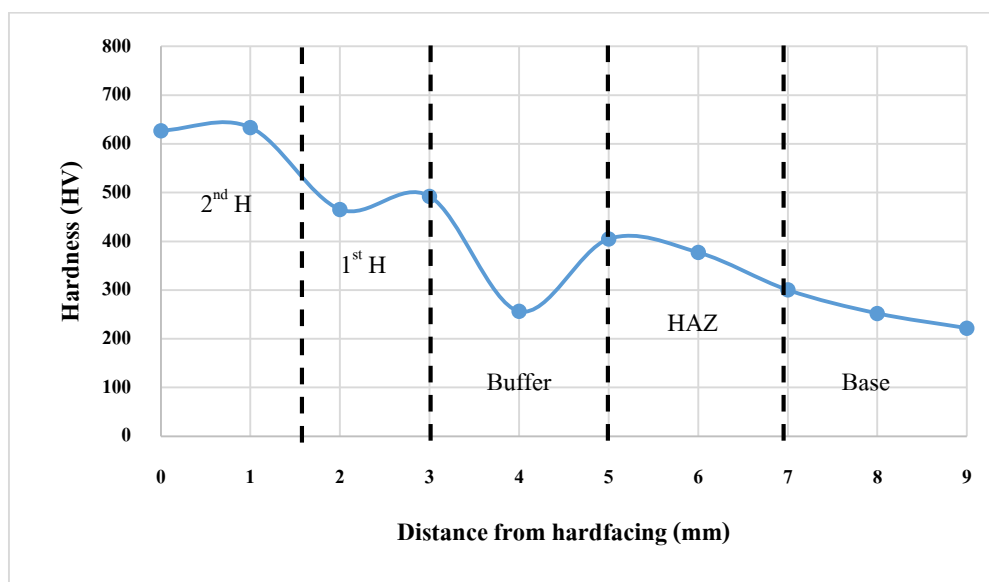
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	479	443.8	461.4
1	383.9	496	439.95
2	360.6	303.3	331.95
3	265.9	225.5	245.7
4	562.2	325.6	443.9
5	370.4	449.7	410.05
6	291.7	332.3	312
7	238.5	255.2	246.85
8	212.1	214.4	213.25



รูปที่ ค.13 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-1H) 350

ตารางที่ ค.14 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 350

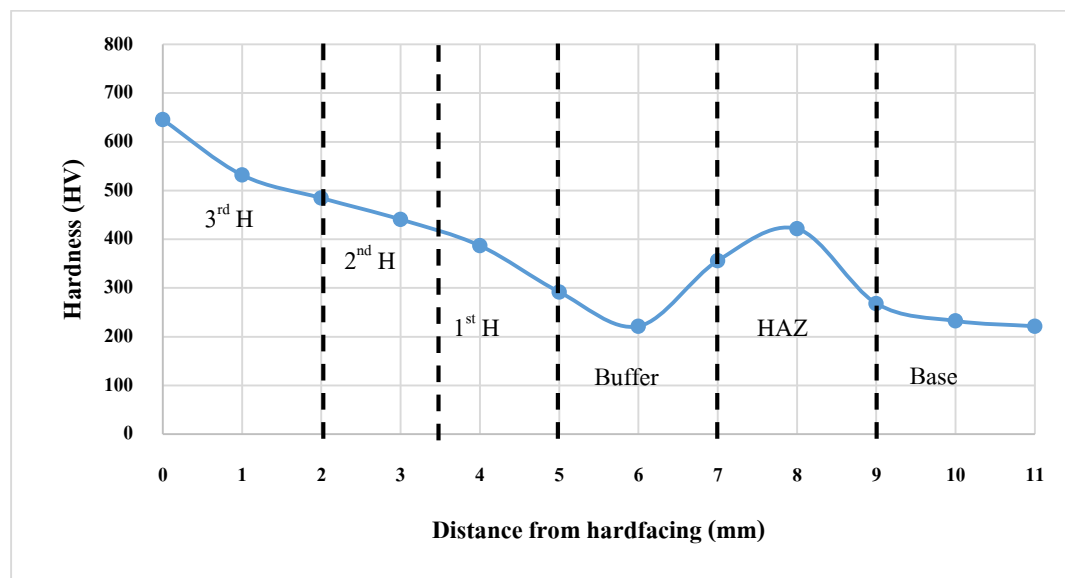
ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	629.8	663.1	646.45
1	613.9	589.2	601.55
2	591.9	570.3	581.1
3	342.7	570.3	456.5
4	321.7	294.1	307.9
5	523.4	385.6	454.5
6	496	320.2	408.1
7	354.9	285.2	320.05
8	279.4	258.9	269.15
9	222.5	234.1	228.3



รูปที่ ค.14 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-2H) 350

ตารางที่ ค.15 ค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 350

ระยะทางจากชั้นพอก แข็ง (mm)	ความแข็ง (HV)		
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	645.4	645.4	645.4
1	529.8	533.9	531.85
2	495.9	473.2	484.55
3	427.2	454	440.6
4	349.6	423.9	386.75
5	234.7	349.1	291.9
6	230.8	212.2	221.5
7	386	326	356
8	426.2	416.6	421.4
9	281.9	254.7	268.3
10	234.7	230.1	232.4
11	227.1	215.9	221.5



รูปที่ ค.15 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม (1B-3H) 350

ภาคผนวก ง
บทความวารสาร

Wear Behavior of Hardfacing Deposits on 3.5 % Chromium cast steel

Buntoeng Srikarun^{1, a}, Prapas Muangjunburee^{2, b *}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

^abuntoeng@hotmail.com, ^bmprapas@eng.psu.ac.th

Keywords 3.5 % chromium cast steel, Hardfacing, Buffer, Abrasive wear

Abstract. The objective of this research is to develop the welding procedure for multilayer hardfacing of 3.5 % chromium cast steel and study wear behavior of hardfacing deposits. Austenitic stainless steel and martensitic hardfacing electrodes were selected as buffer and hardfacing, respectively. Four types of welding procedures were investigated, using shielded metal arc welding (SMAW) process. Three different preheatings were applied in this study. Characteristic of the macro, microstructure and worn surface deposits was investigated by optical microscope. The hardfacing deposits were also determined by the dry sand rubber wheel machine according to procedure A of the ASTM G65 standard. The results indicated that the multilayer hardfacing with and without preheating revealed no crack or defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and other regions. The wear resistance of hardfacing presented a little difference. The best abrasive wear resistance was obtained from sample without preheating. This was due to the full martensitic microstructure of the hardfacing.

Introduction

Hardfacing is a commonly employed technique in order to improve surface properties of components for mining operation such as crusher and earthmoving equipment [1]. It is applied of hard; wear resistant material to the surface to reduce loss of material by wearing using several coating methods. Shielded metal arc welding (SMAW) is commonly applied due to the low cost of electrode and practical operation. Hardfacing is mainly used in maintenance to reclaim machinery parts by repairing the surface worn in service life [2]. Based on statistic of cause responsible for the wear of mechanical part, approximately 50 % is abrasive wear [3].

Both hardness and toughness play the important roles for wear resistance. The microstructure should be hard enough and ductile. In some applications where impacts are severe, martensitic structure may not suitable; therefore, tough buffer layer is needed [4]. The hardfacing deposits are usually applied by single or double layers to avoid the formation of cracks due to welding contraction strain in weld. In addition, a tough buffer layer is necessary before hardfacing layer [5, 6].

Chromium steel is very sensitive to crack in the heat affected zone. The metallurgical and mechanical properties in the region of heat affected zone (HAZ) can be degraded by welding. It has generally been accepted that hardness of low alloy steel is significantly affected by heat affected zone microstructure. The preheating is some of the process variables of relevance that control the microstructural development and hence influence of final properties [7]. In this work, the microstructure and wear behavior of hardfacing deposits on the 3.5 % chromium steel substrate with different preheating temperatures weld by shielded metal arc welding (SMAW) was studied and compared.

Experimental

Materials and welding condition

As cast chromium steels were supplied in an annealed condition. Chromium steel plates with dimension of 150 mm × 100 mm × 10 mm were used as base metal. The composition of the steel is shown in table 1. The commercial hardfacing electrode and buffer electrode were applied in this work for shielded metal arc welding (SMAW). The chemical composition of electrode is shown in table 2.

Table 1 Chemical composition of 3.5 % Chromium steel plate (wt %)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.41	0.68	0.66	0.17	3.10	0.28	0.15	Balance

Table 2 Chemical composition of hardfacing electrode and buffer electrode (wt %)

Electrode	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe
Hardfacing	0.5	0.8	1.3	7	-	1.3	0.5	Balance
Buffer	0.11	1.2	4.2	19.2	8.5	0.7	-	Balance

Four different types of samples were prepared by hardfacing deposited onto chromium steel, as illustrated in Fig. 1. Each coupon was welded under different condition, varying preheating and hardfacing deposition layer. In addition, only the first sample was welded with no buffer layer. The welding parameters employed can be seen in table 3. The welding positions were flat, preheatings were no preheating, 250 °C and 300 °C. After deposition, the samples were cool in air.

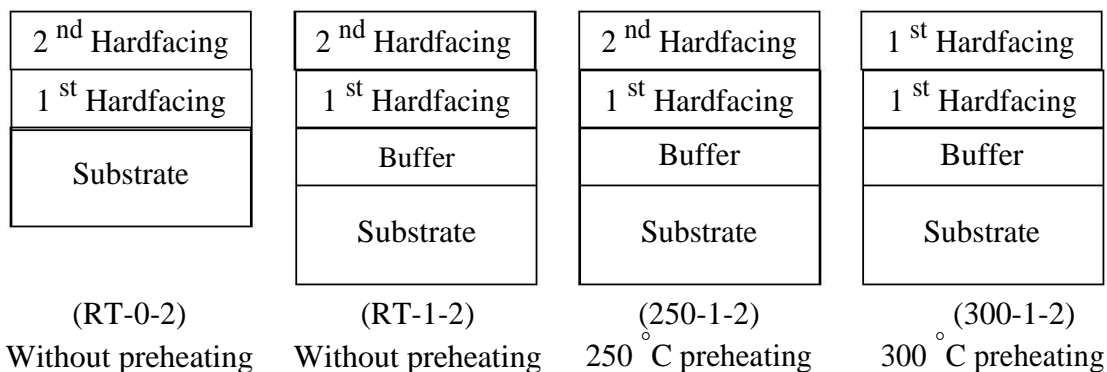


Fig. 1. Layer of four specimens prepared by hardfacing.

Macro and microstructure analysis

Optical microscopy (OM) was used to analyze the macrostructure and microstructure of specimens. Cross sections of the weld were polished and etched with Nital 2 % (Hardfacing and substrate) and Kalling's reagent (Buffer). Different types of microstructures were first identified on the standard of morphologies and confirmed by chemical compositions and hardness values.

Hardness test

Hardness values of hardfacing deposits were measured by Vickers hardness (testing load 100 kgf.) on transverse cross section. More than eight reading were taken at close proximity estimate 1 mm from base metal to second hardfacing deposits.

Abrasive wear test

The hardfacing deposit plates were section for wear test as 12.7 mm × 25.4 mm × 76.2 mm. Before the abrasive wear test, all specimens were weighed on an electronic balance with accuracy of 0.1 mg. The tests were carried out using the dry sand-rubber wheel machine (Procedure A) under ASTM G65 standard. Round quartz sand was used as abrasive particle of size 212-300 μm. The sands were backed at 120 °C in a furnace for 1 h. The normal load, duration the tested were 130 N,

sand flow rate 300 g/min, wheel rotation 200 rpm, wheel diameter 228.6 mm and total revolution of the wheel was 4309 m for each test. The abrasive wear resistance was determined from mass loss result.

Table 3 Welding parameters

Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
Hardfacing	155-158	20-23	13-15	10.82
Buffer	130-133	19-22	16-18	7.14

Results and discussion

Macrostructure and microstructure

The hardfacing macrostructure and microstructure of weld, heat affected zone (HAZ) and base metal is depicted in Fig. 2. In addition, the microstructures of various locations of the multilayer deposits were studied in some details. Fig. 2 (a) shows macrostructure of sample without buffer layer. It revealed fusion is good and no crack or pore. Fig. 2 (b) base metal used 3.5 % Chromium steel showed a bainitic microstructure [4]. The heat affected zone (HAZ) microstructure (Fig. 2 (c)) clearly reveals the presence of martensitic microstructure. The needle-shape grains are martensitic phase, and the white regions are austenite. The high cooling rate of base metal transformed the austenite into martensite. Fig. 2 (d) and (e) show full martensitic microstructure of two hardfacing layers which it is clearly that same microstructure due to no dilution from base metal.

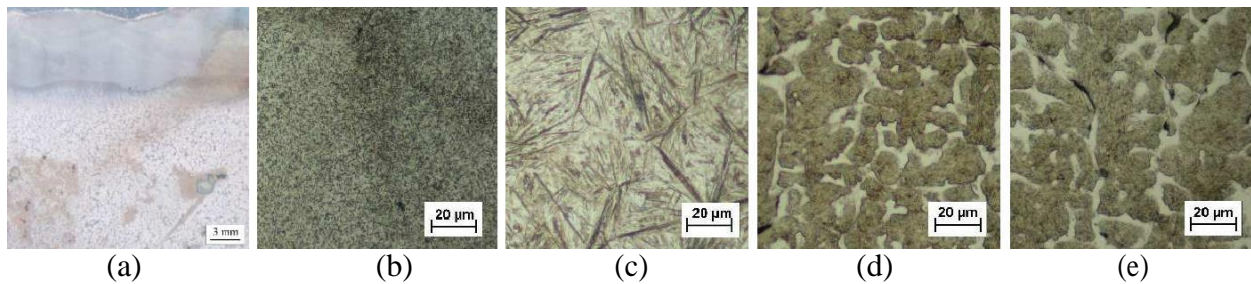


Fig. 2. Macro and microstructure of sample without buffer layer

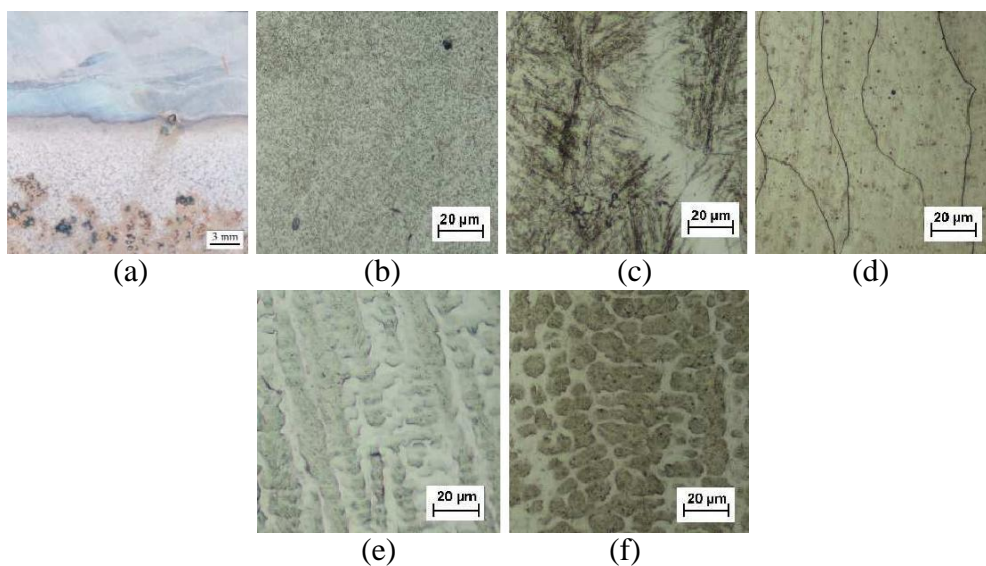


Fig. 3. Macro and microstructure of various locations of hardfacing deposits

Fig. 3 (a) shows the macrograph of two layers hardfacing with a buffer layer. It is clear that hardfacing has sound joint integrity between layers. Furthermore, the absence of any crack and other defects at the heat affected zone (HAZ), buffer layer and hardfacing layers was clear. Base metal used 3.5 % Chromium steel showed a bainitic microstructure (Fig. 3 (a)). The HAZ

microstructure (Fig. 3 (c)) clearly reveals the presence of martensitic microstructure with needle shape grain. The microstructure of a buffer layer (Fig. 3 d)) comprised of δ in the austenitic matrix [6]. The hardfacing layer revealed martensitic microstructure and retained austenite. Fig. 3 (e) and (f) shows the microstructure of hardfacing deposits layers, all of these layers indicated microstructure composed of martensitic and retained austenite, with a pattern of dendritic segregation [7]. which a second hardfacing layer became more refined than first hardfacing layer. This was due to the dilution with buffer layer. These observations were consistent with what was expected for this type of material and confirmed by hardness.

Hardness

Fig. 4 shows hardness profile of each specimens. RT-0-2 specimen showed highest hardness of hardfacing deposit due to include full martensitic microstructure and also highest hardness of heat affected zone (HAZ) due to high cooling rate after welding. In the other samples showed resemble hardness profile. First hardfacing layer revealed low hardness due to this layer direct contact with buffer layer and were dilution each other. Second hardfacing layer shows hardness decrease were also remain dilution influence. In addition specimens without preheating revealed higher hardness in the region of heat affected zone than specimens with preheating.

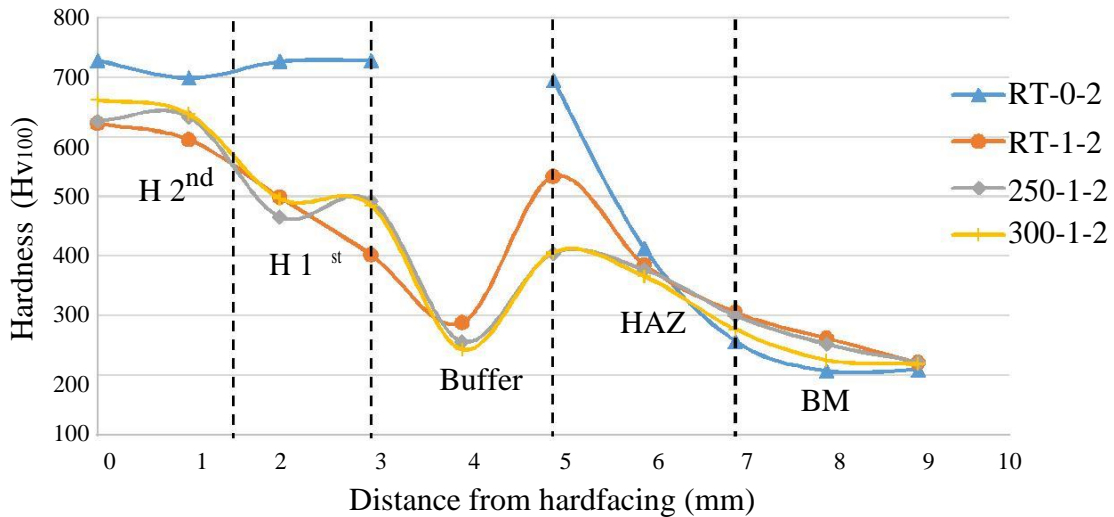


Fig. 4. Hardness profile across weld

Wear resistance

Table 4 shows results of abrasive wear test. The result all of specimens indicated that hardness of hardfacing increases, weight loss decreases. Weld without buffer layer showed lower mass loss than specimens with buffer layer due to no dilution and full martensitic microstructure. The hardfacing layer which welded onto buffer layer showed high mass loss due to this layer receive some diluted element from buffer layer as a result low hardness and high wear rate. Fig. 5 (a) and (b) show the worn surface, where micro-ploughing, micro-cutting and brittle fracture were the main abrasive micro-mechanism, but the grooves were no deep.

Table 4 Abrasion resistance

Specimen designation	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight loss (g)	Abrasive wear resistance $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}$
BM	181.9646	179.2033	2.7613	1.5604
RT-0-2	164.7163	162.6981	2.0182	2.1350
RT-1-2	167.2215	164.7518	2.4697	1.7447
250-1-2	161.6071	158.7842	2.8229	1.5264
300-1-2	168.6447	165.9631	2.6816	1.6068



(a) (b) **Fig. 5.** Aspects of worn surfaces

Summary

1. The main hardness of heat affected zone (HAZ) depends on preheating temperature.
2. Dilution affect to microstructure and mechanical properties of hardfacing layer.
3. The mechanisms of abrasive wear founded on the worn surfaces such as micro-ploughing, micro-cutting and brittle fracture.
4. In the term of hardness and abrasive wear resistance, they was related each other. In a result of the fact, the properties of microstructure were more important than hardness in the abrasion resistance of the material.

Acknowledgement

The authors wish to thank EGAT Mae Moh Mine for financial support, In addition, partially supported by Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University in Thailand.

References

- [1] KenchiReddy KM, Jayadeva CT. The effect of microstructure on 3 body abrasive wear behavior of hardfacing alloys. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*. 2014; 4(1): 14-23.
- [2] Yamamoto S. *Arc welding of specific steels and cast irons*. 3th ed. Japan: Shinko Welding Service Co.,Ltd.; 2008.
- [3] Adamiak M, Gorka J, Kik T. Comparaision of abrasion resistance of selected constructional materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009; 37(2): 375-80.
- [4] Shafiee A, Nili-Ahmadabadi M, Ghasemi HM, Hossein-Mirzaei E. Wear behavior of a Cr-Mo steel with different microstructures, in comparison with austempered ductile iron (ADI). *Int J Mater Form*. 2009; 2(1): 237-41.
- [5] Kiran VTB, Krishna M, Natraj JR, Kumar S. Development and characterization of a electrode deposition procedure for crack-free hardfacing of low carbon steel. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*. 2012; 4(1): 18-25.
- [6] Balakrishnan M, Balasubramanian V, Reddy GM. Effect of hardfacing consumables on ballistic performance of Q&T steel joints. *ScienceDirect*. 2013; 9: 249-58.
- [7] Gualco A, Svoboda HG, Surian ES, De Vedia LA. Effect of welding procedure on wear behaviour of modified martensitic tool steel hardfacing deposit. *Material and Design*. 2010; 31: 4165-173.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายบันเทิง ศรีคะรัน
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120060
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

1. ทุนการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT)
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2557
3. ทุนผู้ช่วยสอน ปีงบประมาณ 2557

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน (ถ้ามี)

Buntoeng Srikarun, Prapas Muangjunburee. Wear behavior of hardfacing deposits on 3.5 % chromium cast steel. Key Engineering Materials 2015; 658: 167-71.