

อิทธิพลของการพรีฮีทรางต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเทอร์มิตในรางรถไฟ

Influence of Preheat on the Quality of Thermit Welded Rail



นาย พิธีวัต มรกตศรีวรรณ

นางสาว พิมพกานต์ อนุวงศ์กุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการพรีฮีทรางต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเทอร์มิตในรางรถไฟ

Influence of Preheat on the Quality of Thermit Welded Rail



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Influence of Preheat on the Quality of Thermit Welded Rail



Pitiwat Morakotsriwan  
Pimpakarn Anuvongkul

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของการพรีฮีทรางต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเทอร์มิตในรางรถไฟ  
Influence of Preheat on the Quality of Thermit Welded Rail

ผู้จัดทำ

1. นาย พิธิวัต มรกตศรีวรรณ รหัสประจำตัว 56010860
2. นางสาว พิมพ์กานต์ อนุวงศ์กุล รหัสประจำตัว 56010867



จิตรภรณ์ วงศ์งาม

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.จิตรภรณ์ วงศ์งาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการพรีฮีทรางต่อคุณภาพของรอยเชื่อมเทอร์มิตในรางรถไฟ

นายพิริวัต                      มรกดศรีวรรณ 56010860  
 นางสาวพิมพ์กานต์    อนุวงศ์กุล                      56010867  
 ดร.จิตราภรณ์                      วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2559

## บทคัดย่อ

รางที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นรางเชื่อมแบบต่อเนื่องแทนการใช้รางที่ต่อกันแบบประกบ การเชื่อมเทอร์มิตเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในหน่วยงานเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถเคลื่อนย้ายสะดวก และใช้งานง่าย แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของรอยเชื่อมก็เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงในระหว่างกระบวนการเชื่อมเพราะคุณภาพของรางเกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยในการเดินรถไฟ ในโครงการวิจัยนี้ ราง UIC60 ถูกนำมาเชื่อมด้วยวิธีเทอร์มิตโดยทำการแปรผันเวลาในการพรีฮีททั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 3, 6 และ 10 นาที ผลกระทบของเวลาพรีฮีทต่อคุณภาพรอยเชื่อมถูกพิจารณาด้วย 4 วิธี วิธีแรกใช้วิธีอัลตราโซนิคหารอยบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นในแต่ละกรณี วิธีที่สองความเค้นตกค้างถูกตรวจสอบโดยใช้วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน วิธีที่สามเป็นการตรวจโครงสร้างระดับมหภาคโดยทำการผ่ารางทางแนวยาวเพื่อพิจารณาบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน วิธีที่สี่เป็นการตรวจสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่เงื่อนไขการพรีฮีทที่ต่างๆ กันโดยการทดสอบความแข็ง ผลการทดลองพบว่า เวลา พรีฮีท มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมรางแบบเทอร์มิต โดยพบว่าที่เวลาพรีฮีทน้อยที่สุด 3 นาที พบจุดบกพร่องในรอยเชื่อมอย่างชัดเจนซึ่งอาจเนื่องมาจากการพรีฮีทที่ไม่เพียงพอ นอกจากนี้พบว่าที่เวลาพรีฮีท 10 นาที โครงสร้างจุลภาคมีสัดส่วนของเบนไนต์สูงสุดซึ่งส่งผลให้ความแข็งและสภาพเปราะมากขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า ในการพรีฮีทที่ 6 นาที เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมเทอร์มิตของราง UIC 60 ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Influence of Preheat on the Quality of Thermit Welded Rail

Pitiwat            Morakotstiwon    56010860  
Pimpakarn        Anuvongkul        56010867  
Dr.Jittraporn     Wongsangam        Advisor  
Year 2559

### ABSTRACT

Most railways use continuous welded rail (CWR); instead of jointed rail, in which the rails are welded together. The thermite welding method is one of the railway welding technology that widely used in field welding because it has a simple structure, good mobility and does not need specialized skill. However, the welding quality is essential to be controlled because it is directly related to the safety of railways. In present research, the UIC60 rail is selected and the thermit welding method is employed with three different preheating time of 3, 6 and 10 minutes. The influence of preheating on the quality of thermite welded rail is evaluated by using four main methods. First, the ultrasonic testing is used to determine the defects in weld. Second, the residual stress is examined using X-ray diffraction (XRD) technique. Third, after XRD the thermit welded rail is cut in longitudinal direction to observe macro-structure such as heat-affected zone (HAZ). Fourth, the mechanical property is examined using hardness measurement. From experimental result, preheating time significantly affect to the quality of thermit welded rail. The minimum preheating time of 3 minutes reveals the defects at rail toe resulting from the insufficient preheating time. However, at preheating time of 10 minute the fraction of bainite structure is higher than 3 minute and 6 minute preheating time. This leads to the higher hardness values but brittleness in this condition. According to present results, preheating time of 6 minutes is the best suitable condition for this thermite welding UIC 60 rail standard.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด จาก ดร. จิตราภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ ขอขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน) บริษัท อัลสตอม ประเทศไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์การเชื่อมรางรถไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบชิ้นงาน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ ข้าพเจ้า นายพิริวัต มรกตศรีวรรณ และนางสาวพิมพ์กานต์ อนุวงศ์กุล มีวันนี้ ขอมอบความกตัญญูกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายพิริวัต มรกตศรีวรรณ

นางสาวพิมพ์กานต์ อนุวงศ์กุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การเชื่อมในรางรถไฟ	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม	4
2.2.1 จุดบกพร่องในรอยเชื่อม	4
2.2.2 คุณสมบัติทางกล	6
2.3 การตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อม	8
2.3.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า	8
2.3.2 การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิค	8
2.3.3 การวัดความเค้นตกค้าง	11
2.3.4 โครงสร้างจุลภาค	13
2.3.5 ความแข็ง	13
2.4 การเกิดเฟสไดอะแกรมของเหล็ก	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	29
3.1 ชิ้นงานทดสอบ	29
3.2 วิธีการทดสอบและตรวจสอบชิ้นงาน	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการทดสอบด้วยตาเปล่า	40
4.2 ผลการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	43
4.3 ผลการวัดความเค้นตกค้างด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	45
4.4 โครงสร้างมหภาค	48
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	52
4.6 ผลการวัดค่าความแข็ง	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความเร็วของคลื่นเสียงตามชนิดของวัสดุ	10
2.2 แสดงค่าความแข็งบริเนลล์ตามขนาดแรงกดและความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง	14
2.3 แสดงการเทียบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E140-07	22
3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของราง UIC60	30
3.2 แสดงค่าความแข็งของราง UIC60	30
4.1 แสดงผลการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโดยวัดจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม	44
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค	56
5.1 แสดงการสรุปผลคะแนนจากการทดสอบต่างๆ	57



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงบริเวณต่างๆ ในการเชื่อม	4
2.2 แสดงขั้นตอนการเกิด cold-lap อย่างง่าย	5
2.3 แสดงโพรงที่เกิดจากการหดตัว	5
2.4 แสดงการกระจายตัวของรูพรุน	6
2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้าง	7
2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเสียง	9
2.7 แสดงการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง	11
2.8 ภาพตัดขวางหลอดเอ็กซ์เรย์	12
2.9 แสดงการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	14
2.10 แสดงลักษณะแรงกด	19
2.11 แสดงรอยกุดที่เกิดขึ้นจากการวัดแบบวิกเกอร์	21
2.12 แสดงเฟสไดอะแกรมของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์	24
2.13 แสดงแผนผังการเปลี่ยนแปลงเฟสของออสเทนไนต์	25
2.14 แสดงแผนภาพแสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลา (TTT)	26
2.15 แสดงโครงสร้างเพอไรต์	27
2.16 แสดงโครงสร้างเบนไนต์	27
3.1 แสดงเหล็กวางรถไฟฟ้าขนาด UIC60	29
3.2 แสดงการเชื่อมแบบเทอร์มิต	31
3.3 แสดงแผนภาพการทดสอบ	32
3.4 แสดงเครื่องทดสอบด้วยคลื่นเสียง	33
3.5 แสดงหัวตรวจสอบแบบหัวตรง 4 MHz	33
3.6 แสดงลักษณะของ Ultrasonic couplant	34
3.7 แสดงจุดอ้างอิงในการทดสอบอัลตราโซนิก	34
3.8 แสดงเครื่องวัดความเค้นตกค้าง	35
3.9 แสดงตำแหน่งการวัดความเค้นตกค้าง	35
3.10 แสดงความเค้นที่รับแรงกระทำจากตัวรถ	36
3.11 แสดงการจัดชิ้นงานวัดความเค้นตกค้างตามแนวราง	36
3.12 แสดงการจัดชิ้นงานวัดความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวาง	37
3.13 แสดงเครื่องมือในการตั้งชิ้นงานให้ตั้งฉาก	37
3.14 แสดงรางที่ผ่าตามแนวราง	38
3.15 แสดงจุดวัดความแข็งบนหัวรางอย่างง่าย	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์	39
4.1 แสดงภาพระหว่างการเชื่อมและหลังเชื่อม	41
4.2 แสดงตัวอย่างกราฟ Ultrasonic Test ที่ระยะเวลาพรีฮีทต่างกัน ณ จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม	43
4.3 แสดงตำแหน่งการวัดความเค้นตกค้าง	45
4.4 แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวาง	46
4.5 แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวราบ	47
4.6 แสดงโครงสร้างมหภาคที่ระยะเวลาพรีฮีทต่างๆ	51
4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 3 นาที.	52
4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 6 นาที	53
4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 10 นาที	54
4.10 แสดงค่าความแข็ง	55



## สัญลักษณ์

F	คือ	แรงกด
A	คือ	พื้นที่รอยกดเฉลี่ย
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด
d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย
t	คือ	ความลึกของรอยกด
e	คือ	ความลึกที่เกิดจากการเสีรูปร่างอย่างถาวรจากการกด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ระบบการขนส่งมีหลายประเภท ทั้งรถยนต์ เครื่องบิน เรือ และรถไฟ การขนส่งแต่ละประเภทนั้นมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป แต่ในด้านการใช้ทรัพยากรนั้นรถไฟจะสิ้นเปลืองทรัพยากรน้อยที่สุด จึงทำให้การขนส่งมีความคุ้มค่าและเป็นที่ยอมรับมากที่สุด

ในการสร้างทางรถไฟนั้น รอยเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรกๆ เนื่องจากความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดที่รอยเชื่อมและตัวยึดตรึง (Fastener) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงและน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่ากว่า 45% ของความเสียหายทั้งหมดเกิดขึ้นที่รอยเชื่อมแบบเทอร์มิต [1] เพราะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเหล็กหล่อที่หยาบและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ง่าย ทำให้เกิดความเสียหายจากความล้าง่ายยิ่งขึ้น ผู้จัดทำจึงสนใจในการศึกษารอยเชื่อมแบบเทอร์มิต โดยจะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคในเงื่อนไขที่ต่างกัน

การเชื่อมเทอร์มิต จะต้องทำการพรีฮีทเพื่อเพิ่มอุณหภูมิทั้งรางและแม่พิมพ์ อีกทั้งยังสามารถกำจัดความชื้นที่ตกค้างจากแม่พิมพ์ได้อีกด้วย ผู้จัดทำสนใจศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจุดบกพร่องในรอยเชื่อม โดยการเพิ่มระยะเวลาการพรีฮีทและอุณหภูมิของโลหะเชื่อม จะช่วยยับยั้งการเกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อม

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของรอยเชื่อม ไม่ว่าจะเป็นจุดบกพร่องในรอยเชื่อม คุณสมบัติทางกล บริเวณ heat affected zone (HAZ) หรือโครงสร้างจุลภาค เมื่อปรับระยะเวลาการพรีฮีทโดยมีระยะเชื่อม (Weld gap) 25 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน)

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเชื่อมและคุณภาพรอยเชื่อม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการพรีฮีทที่มีต่อคุณภาพรอยเชื่อม
- 1.2.3 เพื่อเป็นแหล่งค้นคว้าและอ้างอิงให้กับผู้ที่สนใจเกี่ยวกับรอยเชื่อมแบบเทอร์มิตในทางรถไฟ 60E1

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาอิทธิพลที่เกิดจากการปรับระยะเวลาพรีฮีทในรอยเชื่อมแบบเทอร์มิตที่มีระยะเชื่อม 25 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน) เท่านั้น
- 1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกลของรอยเชื่อมที่ระยะเวลาการพรีฮีทต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 3 นาที, 6 นาที และ 10 นาที

## 1.4 แผนการดำเนินงาน

หัวข้อ	เดือน									
	AUG	SEP	OCT	NOV	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	
ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	←→									
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→									
ออกแบบเงื่อนไขของรอยเชื่อม เช่น การพรีฮีท			←→							
ทำการทดสอบ					←→					
วิเคราะห์การทดสอบ						←→				
สรุปผลการทดสอบ							←→			

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อพัฒนากระบวนการเชื่อมเทอร์มิต
- 1.5.2 ทราบผลกระทบที่เกิดบนรอยเชื่อมจากระยะเวลาการพรีฮีทที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเชื่อมในระบบราง

การเชื่อม คือ กระบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุ ส่วนใหญ่เป็นโลหะและเทอร์โมพลาสติก โดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลาย และการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในบ่อหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อนหรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งแตกต่างกับการบัดกรีอ่อน และการบัดกรีแข็ง ซึ่งไม่มีการหลอมละลายของชิ้นงาน มีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในการเชื่อม เช่น การใช้เปลวไฟ แก๊สออกซิเจน, การอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า, ลำแสงเลเซอร์, การใช้ไอเล็ครอนบีม, การเสียดสี และการใช้คลื่นเสียง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมมีการเชื่อมในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การเชื่อมในพื้นที่โล่ง, พื้นที่อับอากาศ, การเชื่อมใต้น้ำ, การเชื่อมในพื้นที่อันตราย เช่น ถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่, ภายในโรงงานผลิตสารเคมี และวัตถุไวไฟ การเชื่อมมีอันตรายเกิดขึ้นได้ง่าย จึงควรมีความระมัดระวังเพื่อป้องกันอันตราย เช่น เกิดจากกระแสไฟฟ้า, ความร้อน, สะเก็ดไฟ, ควันเชื่อม, แก๊สพิษ, รังสีอาร์ค, ชิ้นงานร้อน และฝุ่นละออง ซึ่งการเชื่อมในระบบรางจะถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การเชื่อมแฟลชบัท และการเชื่อมเทอร์มิต ซึ่งจะมีกรรมวิธีแตกต่างกันออกไป

#### 2.1.1 การเชื่อมแบบแฟลชบัท (Flash butt Welding)

การเชื่อมแบบแฟลชบัท คือ การเชื่อมชนแบบใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า โดยไม่ต้องมีโลหะเติม ชิ้นส่วนของโลหะที่เชื่อมกันจะถูกแยกออกจากกันตามระยะห่างที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุและคุณสมบัติที่ต้องการของรอยเชื่อมหลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว เมื่อความร้อนถึงระดับหนึ่งช่องว่างระหว่างชิ้นงานทั้งสองจะสร้างความต้านทานขึ้น เมื่อชิ้นงานมีความร้อนที่เหมาะสมจะถูกกดเข้าด้วยกันเพื่อให้ชิ้นงานทั้งสองต่อกันเป็นชิ้นเดียว

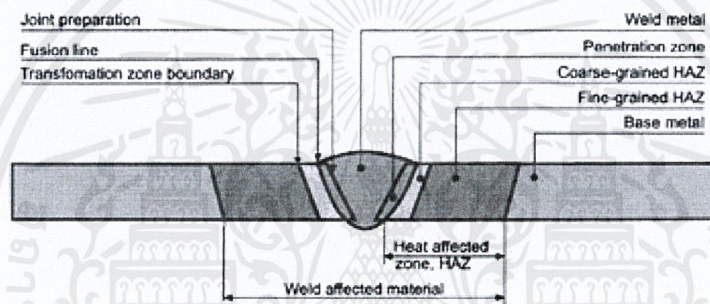
#### 2.1.2 การเชื่อมแบบเทอร์มิต (Thermit Welding)

การเชื่อมด้วยวิธีเทอร์มิต มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการเชื่อมต่อรางรถไฟที่มีคุณภาพของการเชื่อม โดยกรรมวิธีทางเคมีของผงเทอร์ไมต์บริสุทธิ์ โดยเป็นส่วนผสมโลหะมีคาร์บอนและโลหะผสมเป็นเนื้อเหล็กที่เกือบหลอมเหลวบริสุทธิ์ เพื่อให้การเชื่อมต่อรางมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ต่อเนื่อง ปลายของรางที่ต่อจะถูกทำให้ร้อนจนเป็นสีส้มด้วยหัวเผาหรือเรียกอีกอย่างได้ว่าการทำพรีฮีท เพื่อให้แน่ใจว่าเหล็กหลอมเหลวไม่ได้เย็นตัวในช่วงที่เทน้ำเหล็ก เพราะการเกิดปฏิกิริยาทางเทอร์ไมต์กับเหล็กบริสุทธิ์ทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรง ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มคาร์บอนและโลหะผสมสูงในรูปแบบเม็ดเล็กหรือแท่ง ที่จะผสมรวมในผงเชื่อมเทอร์ไมต์โลหะผสมเหล่านี้จะละลายจากความร้อนของปฏิกิริยาเทอร์ไมต์และผสมลงในเนื้อโลหะเชื่อมเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป ตามชนิดของรางรถไฟที่จะทำการการเชื่อม ก่อนการเชื่อมและการพรีฮีทจะต้องมีการประกอบแม่พิมพ์เข้ากับ

รางรถไฟก่อนเมื่อนำแม่พิมพ์มาประกอบแล้ว จะมีช่องว่างตามรอยขอบแม่พิมพ์เหลืออยู่จึงต้องใช้ชุดตั้งพาส (Luting paste) ที่มีลักษณะคล้ายดินเหนียวมาปิดช่องว่างต่างๆที่เหลืออยู่

### 2.1.3 บริเวณกระทบร้อน

การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเนื่องจากผลของความร้อนจากการเชื่อมจะเกิดที่บริเวณเนื้อโลหะ งานที่ติดใกล้กับเนื้อเชื่อมเรียกว่า บริเวณผลกระทบร้อนการเชื่อม นิยมเรียกกันทั่วไปว่า HAZ ซึ่งจะกินบริเวณกว้างหรือแคบนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ ความร้อนเข้า (Heat Input) จากกระบวนการเชื่อม ความหนา และค่าสมบัติการนำความร้อนของโลหะงาน โลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูง (High thermal conductivity) จะมีบริเวณผลกระทบร้อนกว้าง ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพรอยเชื่อมโดยส่วนมากจุดเริ่มต้นของความเสียหายของรอยเชื่อมจะเกิดขึ้นที่บริเวณกระทบร้อนเป็นอันดับแรก



รูปที่ 2.1 แสดงบริเวณต่างๆ ในการเชื่อม [2]

## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม

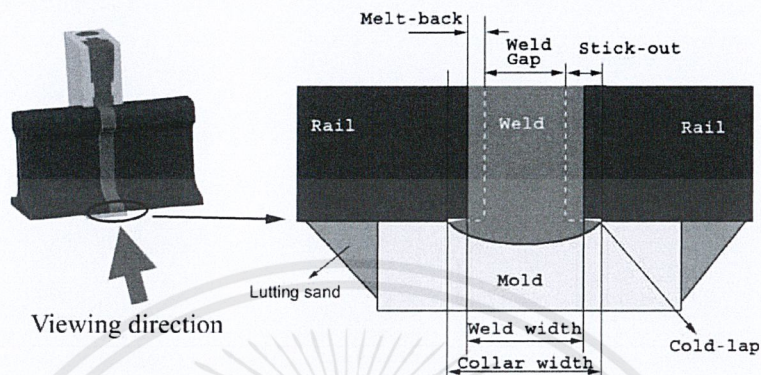
ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเทอร์มิตขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุโลหะ เช่น แมงกานีส คาร์บอน ที่ถูกใส่เข้าไป รอยเชื่อมที่ดีจะต้องไม่มีจุดบกพร่องหรือมีน้อยมาก โดยอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ เพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดความเสียหาย ดังนั้น การตรวจสอบจุดบกพร่องจึงจำเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

### 2.2.1 จุดบกพร่องในรอยเชื่อม

#### 2.2.1.1 จุดบกพร่องแบบ Cold-lap

Cold-lap จะถูกพบที่ปลายรอยเชื่อมในตินราง เกิดขึ้นเนื่องจากการผสมที่ไม่เพียงพอของโลหะเชื่อมและหน้าตัดของปลายราง รูปที่ 2.2 เป็นรูปแสดงการเกิด cold-lap ระหว่างการแข็งตัว รูปด้านข้างแสดงส่วนของปลายรางที่อยู่ในแม่พิมพ์ ซึ่งถูกเรียกว่า stick-out จะละลายเมื่อเหล็กเชื่อมไหลลงสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ ระยะเวลาที่ปลายรางถูกหลอมจะเรียกว่า melt-back ถ้าระยะ melt-back น้อยกว่า stick-out จะเกิดโลหะเหลวทรงสามเหลี่ยมเล็กๆ อยู่ใต้ตินรางทิศทางการไหล

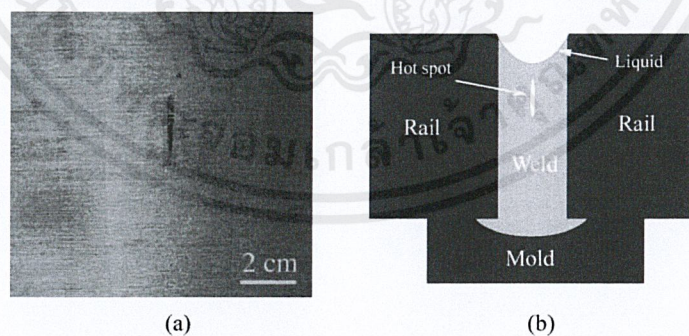
ของความร้อนส่วนมากจะไหลจากโลหะเชื่อมไปทางแม่พิมพ์ ในทางกลับกัน ถ้าระยะ melt-back มากกว่า ทิศทางของความร้อนจะไหลจากกึ่งกลางรางไปตามแนวราง



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการเกิด cold-lap อย่างง่าย [3]

#### 2.2.1.2 โพรงที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage cavity)

โดยส่วนมากจะถูกพบในเอวรางของรอยเชื่อมเป็นผลมาจากการกระจายตัวของความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้ปริมาตรของโลหะเชื่อมลดลง นำไปสู่การเกิดแรงหดตัวภายในโลหะเชื่อม ในขั้นตอนสุดท้ายของการแข็งตัว ส่วนของโลหะเหลวถูกล้อมรอบด้วยโลหะที่แข็งตัวแล้ว ทำให้โลหะเหลวจากส่วนอื่นไม่สามารถไหลเข้าไปเพื่อชดเชยปริมาตรที่ลดลงได้ ดังนั้นแรงหดตัวที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดโพรงในรอยเชื่อมดังรูปที่ 2.3

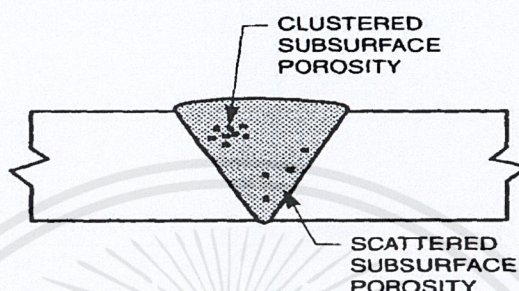


รูปที่ 2.3 แสดงโพรงที่เกิดจากการหดตัว [3]

#### 2.2.1.3 การกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็ก (Distributed microporosity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กบ่งบอกถึงการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบของรูเล็ก ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกพบในส่วนของโลหะเชื่อม ขนาดของรูสามารถมีได้ตั้งแต่ใหญ่จนถึงเล็กมาก (100 ไมครอน) รูปร่างของรูจะเป็นได้ทั้งทรงกลมและรูปร่างที่ผิดปกติไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4 การก่อตัวของรูพรุนจะเกิดจากการขยายตัวของแก๊ส ระหว่างการเย็นตัวของเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายตัวของรูพรุน [4]

## 2.2.2 คุณสมบัติทางกล

### 2.2.2.1 ความแข็งของรอยเชื่อม

ความแข็ง คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด ความแข็งอาจรวมถึง ความต้านทานต่อการตัด การขีด การขีด และการตัด ตามมาตรฐานแล้วการวัดความแข็งสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งโครงการวิจัยนี้ใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

### 2.2.2.2 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

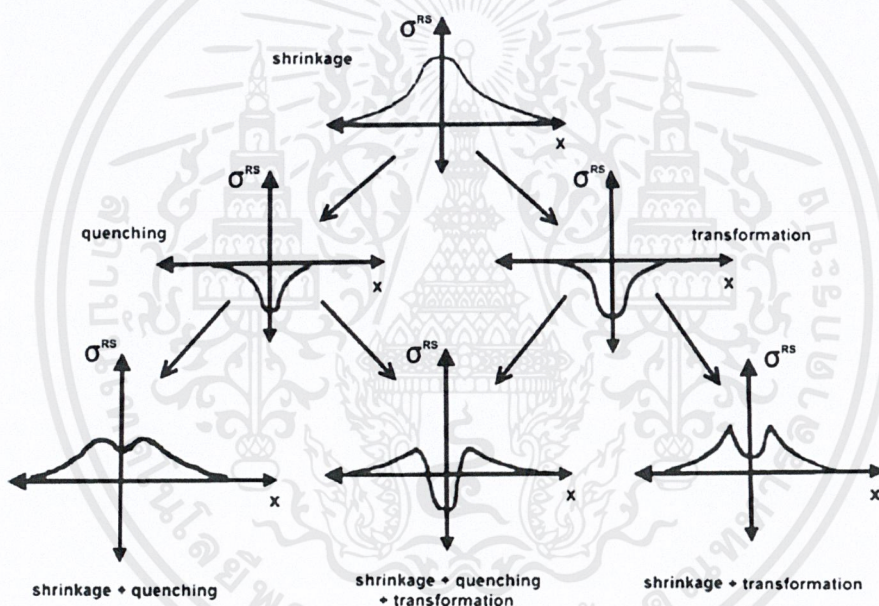
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรมสูงสุดในแผนภาพความเค้นและความเครียด ค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทางวิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรขึ้นอย่างมากก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าโลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่าความแข็งลดลง

### 2.2.2.3 ความเค้นตกค้างในรอยเชื่อม

ความเค้นตกค้าง คือ ความเค้นที่เหลืออยู่ในวัสดุหรือชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการผลิตโดยปราศจากแรงภายนอก มักเกิดในโครงสร้างขณะเกิดการหดตัวที่ต่างกัน เช่น โลหะเชื่อมที่กำลังแข็งตัว และการเย็นตัวสู่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ในการเชื่อมความร้อนที่ให้แก่วัสดุนั้นสูงมาก เป็นผลให้การกระจายความร้อนไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เกิดการเสียรูปแบบถาวร และ

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (Phase transformation) ในเนื้อวัสดุขั้นตอนการเกิดความเค้นตกค้างที่แตกต่างกันในพื้นที่การเชื่อม และบริเวณกระทบร้อน

ความเค้นตกค้างที่จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เช่น ต้านทานความล้าได้ดีขึ้น ผิวแข็งขึ้น ทนทานการสึกหรอได้ดี เช่น สแตนเลสสามารถช่วยต้านการเกิด SCC ได้ดี ทั้งนี้ความเค้นตกค้างต้องอยู่ในทิศทางอัดเท่านั้น แต่ในการผลิตชิ้นงานยากที่จะมีเฉพาะความเค้นอัด ยกเว้นการรีดเย็น ถ้ามีความเค้นตกค้างแบบดึงในปริมาณที่สูงเกินค่ากำลังคราก (Yield strength) หมายความว่า ในระดับโครงสร้างอนุภาคเกิดการแตกร้าแล้ว และพร้อมจะขยายตัวหากมีแรงที่มากระทำมากพอ การออกแบบจะไม่ได้มีการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน หลายนๆ ครั้งพบว่าความเค้นจากการผลิตมีปริมาณค่อนข้างสูง เมื่อชิ้นงานถูกนำไปปรับโหลดสลักจะทำให้เกิดความเสียหายได้รวดเร็วไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้าง [5]

รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดความเค้นตกค้างที่มีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นตกค้างโดยความเค้นตกค้างที่เกิดจากการหดตัวของพื้นที่หลอมเหลวจะเป็นแรงดึงจะชักนำให้ความเค้นอัดตกค้างที่เกิดขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน บริเวณที่อุณหภูมิสูงเกินค่าวิกฤต ผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจึงเกิดความเค้นตกค้างแบบดึง

## 2.3 การตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อม

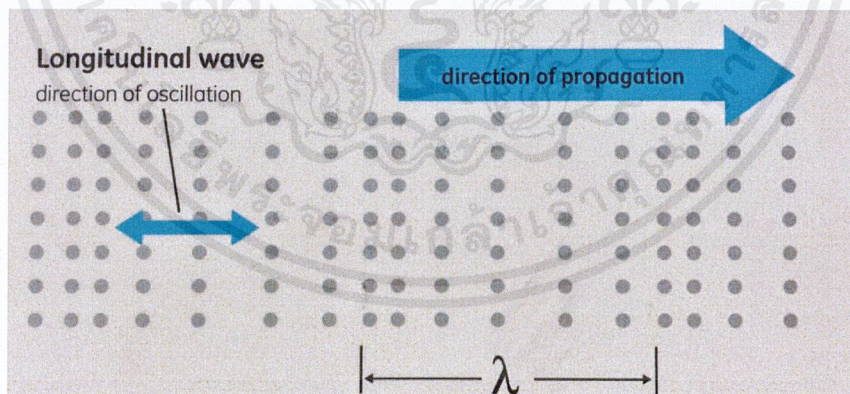
### 2.3.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual test)

การทดสอบด้วยตาเปล่า (Visual examination test) เป็นการใช้สายตามองสภาพภายนอกของวัสดุ เช่น การเชื่อมติด สภาพรอบบริเวณรอยเชื่อม การเกิดสะเก็ด รอยร้าว สีของรอยเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง

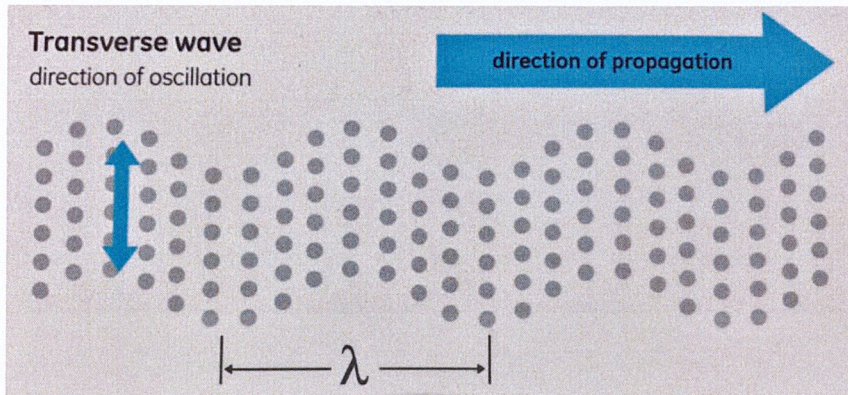
### 2.3.2 การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic test)

การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยวิธีการอัลตราโซนิก เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Test : NDT) ที่อาศัยการส่งผ่านและสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งคลื่นเสียงจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ อินฟราโซนิก (ความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์), เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (ความถี่ระหว่าง 20 – 20,000 เฮิรตซ์) และ อัลตราโซนิก (ความถี่มากกว่า 20,000 เฮิรตซ์)

คลื่นอัลตราโซนิก หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น แต่เด็กที่อายุยังน้อยอาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่า อัลตราโซนิก จึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ใช้ในการตรวจสอบจุดบกพร่องในชิ้นงานนั้นจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ คลื่นตามยาว (Longitude wave) และ คลื่นตามขวาง (Transverse wave or Shear wave) โดยแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงตามรูปที่ 2.6 ซึ่งมีการใช้งานแตกต่างกัน คลื่นตามยาวจะใช้ในหัวตรวจสอบแบบตรง แต่คลื่นตามขวางใช้ในหัวตรวจสอบแบบมุม



ก) แสดงลักษณะของคลื่นเสียงตามยาว (Longitude wave)



ข) แสดงลักษณะของคลื่นเสียงตามขวาง (Transverse wave)

### รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเสียง

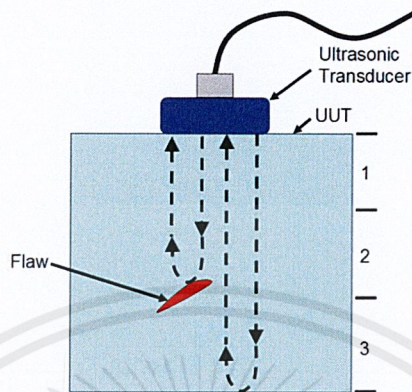
ความเร็วของคลื่นเสียง (Wave velocity) ความเร็วของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านซึ่งจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของวัสดุตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความเร็วของคลื่นเสียงตามชนิดของวัสดุ

Material	Density Kg/m <sup>3</sup>	V <sub>L</sub> m/s	V <sub>t</sub> m/s	Z x 10 <sup>3</sup> Kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
air	1.3	330	-	430
aluminium	2700	6320	3130	17064
aluminium oxide	3600	9000	5500	32400
barium titanate	5400	5000	-	27000
brass	8100	4430	2120	35883
cast iron	6900	5300	2200	24150
concrete	2000	4600	-	9200
copper	8900	4700	2260	41830
epoxy resin	1170	2650	1100	3150
glass	3600	4260	2560	15336
glycerine	1300	1920	-	2496
grey casting	7200	4600	2650	33120
lead	11400	2660	700	24624
magnesium	1700	5770	3050	9809
motor oil	870	1740	-	1514
nickel	8800	5630	2960	49544
nylon	1140	2700	-	3000
olive oil	900	1400	-	1300
teflon	2200	1350	550	3000
perspex(plexiglass)	1180	2730	1430	3221
polyamide(nylon)	1100	2620	1080	2882
polyethylene	940	2340	925	2200
polystyrol	1060	2380	1150	2523
polyvinylchloride(pvc hard)	1400	2395	1060	3353
quartz	2650	5760	-	15264
quartz glass	2600	5570	3515	14482
rubber vulcanized	1200	2300	-	2800
silver	10500	3600	1590	37800
steel(low alloy)	7850	5940	3250	46620
steel(calibration block)	7850	5920	3250	46472
steel(stainless)	7800	5740	3130	44800
titanium	4500	5990	3120	27000
tungsten	19300	5170	2880	100000
tungsten avaldite	10500	2060	-	21650
uranium	18700	3370	2020	63000
water(ช้ากว่าเหล็ก 4 เท่า)	1000	1480	-	1480
zirconium	6400	4650	2300	20800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบด้วยวิธี Ultrasonic จะอาศัยหลักการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงตามรูปที่ 2.7 ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นกราฟพลูกคลื่นบนจอแสดงผลของเครื่อง Ultrasonic



รูปที่ 2.7 แสดงการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง [6]

### 2.3.3 การวัดความเค้นตกค้าง

#### 2.3.3.1 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction)

การวัดความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน อาศัยหลักการของการหักเหของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำมาทำการศึกษา รูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันขึ้นในปี 1948 และพัฒนามาเรื่อย จนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์ มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

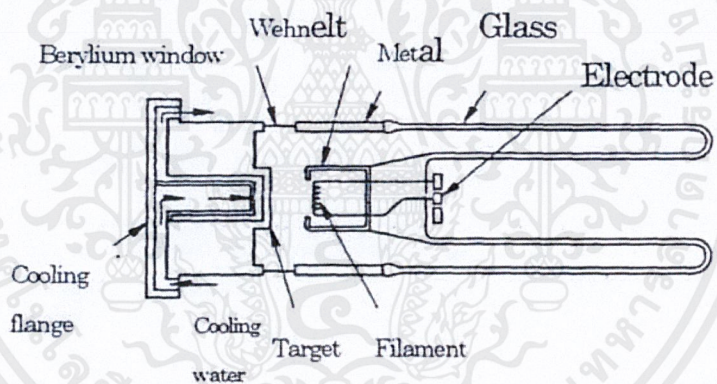
เครื่องมือทดสอบประกอบด้วย ชุดแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray source) ชุดเปลี่ยนมุม (Goniometer) สำหรับวัดความเค้น และชุดอุปกรณ์ประมวลผลพร้อมโปรแกรมการวิเคราะห์เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีในมุมที่ต่างๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ และสามารถนำมาหาความเค้นของสารประกอบในชิ้นงานได้ [7]

สมบัติทางกายภาพของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาคและการจัดเรียงตัวของอะตอมในโลหะ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหมายถึงการจำแนกชนิดของเฟส (Phase) ที่ปรากฏอยู่ รวมถึงรูปร่างและขนาดของเฟสนั้นๆ การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) เป็นการหาค่าความเค้นที่ผิวของชิ้นงานลึกลงไปในผิวงานโดยใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น เท่ากับระยะทางระหว่างระนาบแลตทิซ (Lattice Planes) ของผลึกซึ่งมีความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.25 nm เมื่อให้ลำแสงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากหลอดเอ็กซ์เรย์ โดยฉายรังสีให้แพร่กระจายเป็น บริเวณ 1-2 มิลลิเมตร ลึกลงไปในผิวงาน 10-30  $\mu\text{m}$  และได้ถึง 0.5 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและ แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์รังสีเอ็กซ์จะชนเข้ากับอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของผลึกแล้วทำให้รังสีเอ็กซ์ นั้นเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น มีความเข้มต่างๆ กันและมีมุมต่างๆ กัน ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกเพื่อหาความเค้นตกค้างได้

เครื่องมือที่ให้แหล่งกำเนิดลำแสงรังสีเอ็กซ์ใช้หลอดเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Tube) โครเมียม (A-40-Cr) ซึ่งให้ความยาวคลื่น 2.2897 อังสตรอม (Angstrom) ความต่างศักย์ที่ให้กับขดลวดเพื่อจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์จะต้องใช้แรงเคลื่อน 30 KV กระแส 30 mA ต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบที่ทำด้วยโลหะและอยู่ ในสุญญากาศเมื่อใช้ขดลวดโครเมียมเป็นขั้วลบแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ขดลวดร้อนขึ้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาและถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นด้วยการใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วมากๆ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนเป้า (Target) ที่ทำด้วยโลหะต่างกันจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้น โดยพลังงาน 99 % จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งตัวเป้าจะต้องทำให้เย็นลงโดยการหล่อเย็นตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางหลอดเอ็กซ์เรย์ [8]

### 2.3.3.2 เทคนิคเจาะรู (Hole-drilling technique)

การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค เจาะรู เป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและเร็ว เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ทดสอบซึ่งจัดอยู่ในการทดสอบประเภท กึ่งทำลายชิ้นงาน (Semi-destructive methods) เนื่องจากในการทดสอบจะต้องทำการเจาะรูชิ้นงานเพื่อหาค่าความเครียดที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกวัดโดย สเตรนเกจ (Strain gauge) และนำมาแปลงเป็นค่าความเค้นที่ตกค้างอยู่ภายในชิ้นงาน

### 2.3.4 โครงสร้างจุลภาค

วัสดุโลหะจำพวกเหล็กกล้า เหล็กหล่อ ทองแดง ทองเหลือง และอะลูมิเนียมผสม เป็นวัสดุวิศวกรรมที่ถูกนำมาใช้งานมากในการผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องจักรกล รวมไปถึงวัสดุโลหะสำหรับ งานโครงสร้างอาคาร ซึ่งโลหะเหล่านี้ได้ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การทุบขึ้นรูป การรีด การหล่อ การเชื่อม เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscopic Examination) คือ เพื่อให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นของชิ้นงานโลหะ เช่น ลักษณะการเรียงตัวของเกรน ลักษณะของรอยต่อเนื้อโลหะที่เกิดจากการเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโลหะ (Macroscopic Examination) ซึ่งทำได้โดยการนำชิ้นโลหะไปกัดกรดด้วย Etchant แล้วตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่า หรือกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ วิธีนี้จะเป็นการตรวจสอบพื้นที่บริเวณกว้าง ๆ ของผิวโลหะ ในขณะที่การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscopic Examination) คือ สภาพหรือลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ณ กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่า ในทางปฏิบัติ โครงสร้างจุลภาคของโลหะมักจะประกอบไปด้วยเกรน (Grain) และเฟสต่างๆ ซึ่งหากเป็นเนื้อหลักจะเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) แต่หากเป็นก้อนเล็กๆในเนื้อหลักจะเหมาเรียกรวมๆว่าอนุภาค (Particle) ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบที่กำลังขยายสูงกว่าและในบริเวณแคบ ๆ เท่านั้น

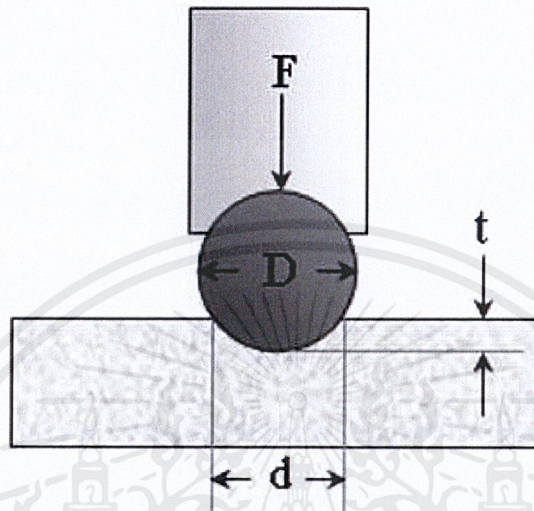
### 2.3.5 ความแข็ง

ค่าความแข็งของวัสดุถือได้ว่าเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่สามารถชี้ให้เห็นคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้นได้ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความเหนียว การทนต่อแรงเสียดสีและการสึกหรอ เป็นต้น ปัจจุบันการวัดค่าความแข็งสามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์วัดความแข็งล้วนแต่เป็นระบบอัตโนมัติ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับงานที่จะทดสอบ เพราะว่าวิธีทดสอบความแข็งนั้นมีหลายประเภท สำหรับวิธีการวัดความแข็งที่นิยมใช้ในงานโลหะนั้นมี 3 วิธี คือ

#### 1. การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

หลักการ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด  $F$  ดังรูป โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาทีสำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค่าแรงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีสำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และทองเหลือง เป็นต้น ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก  $t$  และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย  $d$  ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด นั่นคือ

$$\text{ค่าความแข็งบริเนลล์} = \frac{F}{A} = \frac{0.102F}{0.5\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ [9]

แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (d) และขนาดแรงกดที่ใช้เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

โดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์คือ BHN หรือ HB

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความแข็งบริเนลล์ตามขนาดแรงกดและความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง

เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)	ค่าความแข็งบริเนลล์ขนาดน้ำหนักต่างๆ					
	500 kgf	1000 kgf	1500 kgf	2000 kgf	2500 kgf	3000 kgf
2.00	158	316	473	632	788	945
2.05	150	300	450	600	750	899
2.10	143	286	428	572	714	856
2.15	136	272	408	544	681	817

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20	130	260	390	520	650	780
2.25	124	248	372	496	621	745
2.30	119	238	356	476	593	712
2.35	114	228	341	456	568	682
2.40	109	218	327	436	545	653
2.45	104	208	313	416	522	627
2.50	100	200	301	400	500	601
2.55	96.3	193	289	385	482	578
2.60	92.6	185	278	370	462	555
2.65	89.0	178	267	356	445	534
2.70	85.7	171	257	343	429	514
2.75	82.6	165	248	330	413	495
2.80	79.6	159	239	318	398	477
2.85	76.8	154	230	307	384	461
2.90	74.1	148	222	296	371	444
2.95	71.5	143	215	286	358	429
3.00	69.1	138	207	276	346	415
3.05	66.8	134	200	267	334	401
3.10	64.6	129	194	258	324	388
3.15	62.5	125	188	250	313	375
3.20	60.5	121	182	242	303	363
3.25	58.6	117	176	234	293	352
3.30	56.8	114	170	227	284	341
3.35	55.1	110	165	220	276	331
3.40	53.4	107	160	214	267	321
3.45	51.8	104	156	207	259	311
3.50	50.3	101	151	201	252	302
3.55	48.9	97.8	147	196	244	293
3.60	47.5	95.0	142	190	238	285
3.65	46.1	92.2	138	184	231	277
3.70	44.9	89.8	135	180	225	269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.75	43.6	87.2	131	174	218	262
3.80	42.4	84.8	127	170	212	255
3.85	41.3	82.6	124	165	207	248
3.90	40.2	80.4	121	161	201	241
3.95	39.1	78.2	117	156	196	235
4.00	38.1	76.2	114	152	191	229
4.05	37.1	74.2	111	148	186	223
4.10	36.2	72.4	109	145	181	217
4.15	35.3	70.6	106	141	177	212
4.20	34.4	68.8	103	138	172	207
4.25	33.6	67.2	101	134	167	201
4.30	32.8	65.6	98.3	131	164	197
4.35	32.0	64.0	95.9	128	160	192
4.40	31.2	62.4	93.6	125	156	187
4.45	30.5	61.0	91.4	122	153	183
4.00	38.1	76.2	114	152	191	229
4.05	37.1	74.2	111	148	186	223
4.10	36.2	72.4	109	145	181	217
4.15	35.3	70.6	106	141	177	212
4.20	34.4	68.8	103	138	172	207
4.50	29.8	59.6	89.3	119	149	179
4.55	29.1	58.2	87.2	116	145	174
4.60	28.4	56.8	85.2	114	142	170
4.65	27.8	55.6	83.3	111	139	167
4.70	27.1	54.2	81.4	108	136	163
4.75	26.5	53.0	79.6	106	133	159
4.80	25.9	51.8	77.8	104	130	156
4.85	25.4	50.8	76.1	102	127	152
4.90	24.8	49.6	74.4	99.2	124	149
4.95	24.3	48.6	72.8	97.2	122	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.00	23.8	47.6	71.3	95.2	119	143
5.05	23.3	46.6	69.8	93.2	117	140
5.10	22.8	45.6	68.3	91.2	114	137
5.15	22.3	44.6	66.9	89.2	112	134
5.20	21.8	43.6	65.5	87.2	109	131
5.25	21.4	42.8	64.1	85.6	107	128
5.30	20.9	41.8	62.8	83.6	105	126
5.35	20.5	41.0	61.5	82.0	103	123
5.40	20.1	40.2	60.3	80.4	101	121
5.45	19.7	39.4	59.1	78.8	98.5	118
5.50	19.3	38.6	57.9	77.2	96.5	116
5.55	18.9	37.8	56.8	75.6	95.0	114
5.60	18.6	37.2	55.7	74.4	92.5	111
5.65	18.2	36.4	54.6	72.8	90.8	109
5.70	17.8	35.6	53.5	71.2	89.2	107
5.75	17.5	35.0	52.5	70.0	87.5	105
5.80	17.2	34.4	51.5	68.8	85.8	103
5.85	16.8	33.6	50.5	67.2	84.2	101
5.90	16.5	33.0	49.6	66.0	82.5	99.2
5.95	16.2	32.4	48.7	64.8	81.2	97.3
6.00	15.9	31.8	47.7	63.6	79.5	95.5
6.05	15.6	31.2	46.8	62.4	78.0	93.7
6.10	15.3	30.6	46.0	61.2	76.7	92.0
6.15	15.1	30.2	45.2	60.4	75.3	90.3
6.20	14.8	29.6	44.3	59.2	73.8	88.7
6.25	14.5	29.0	43.5	58.0	72.6	87.1
6.30	14.2	28.4	42.7	56.8	71.3	85.5
6.35	14.0	28.0	42.0	56.0	70.0	84.0
6.40	13.7	27.4	41.2	54.8	68.8	82.5
6.45	13.5	27.0	40.5	54.0	67.5	81.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีการวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึก เพราะหัวกดมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทางจุลภาคจึงมีผลน้อยต่อค่าการทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบ

ข้อเสียค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บางมากๆได้

ค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บางมากๆได้

ข้อจำกัด

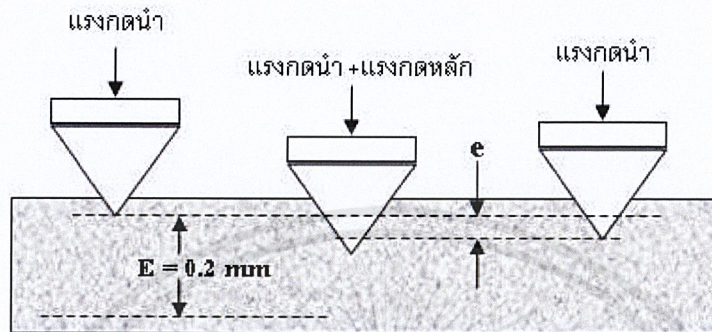
- การทดสอบแบบบริเนลล์ไม่ควรใช้วัดความแข็งเกิน 450 HB เพราะค่าความแข็งที่สูงกว่านี้อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปของหัวกด ทำให้รอยกดใหญ่กว่าความเป็นจริงหรือความแข็งที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดหรือระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดจากขอบของชิ้นงานควรมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (2d)
- ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมีค่ามากกว่าสิบเท่าของความลึกรอยกด (10t) หรืออาจพิจารณาจากแรงกดให้เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทางด้านหลังของชิ้นงาน
- ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (d) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.2D – 0.7D หรือประมาณ 2 – 7 มิลลิเมตรสำหรับลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพราะหากรอยกดเล็กเกินไปจะทำให้ขอบของรอยกดไม่คมชัด ส่งผลให้วัดความยาวได้ยากและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการอ่านค่าความยาวจะมาก ในทางกลับกัน หากรอยกดมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการกดตัวของเนื้อชิ้นงานด้านข้างมาก

## 2. การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (Minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ รอกเวลล์ซี (Rockwell – C) , รอกเวลล์บี (Rockwell – B) และรอกเวลล์เอ (Rockwell – A)

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120° ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก

(Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดน้ำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแรงกด [9]

ในการคิดเป็นค่าความแข็งนั้น ถ้าให้  $E$  คือค่าคงที่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 mm และ  $e$  คือความลึกที่เกิดจากการเสียรูปร่างอย่างถาวรจากการกด ก็จะสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ดังนี้

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์ซี} = 100 - \frac{e}{0.002} \text{HRC}$$

ฉะนั้นวัสดุที่ถูกกดเข้าไปลึกมากกว่า 0.2 mm หรือวัสดุอ่อน จะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีหรือเอแทน

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีมีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่ใช้หัวกดที่ทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1/16$  นิ้ว หรือ 1.59 มม. ใช้แรงกดหลัก 90 kgf เหมาะกับการทดสอบวัสดุอ่อน เพราะมีการยืดช่วงของ  $E$  เป็น 0.26 มม. และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 มม. ฉะนั้นค่าความแข็งจึงคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์บี} = 130 - \frac{e}{0.002} \text{HRB}$$

ในขณะที่การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอจะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี คือใช้หัวกดเพชรทรงกรวย และกำหนดระยะ  $E = 0.2$  มม. แต่ใช้แรงกดหลัก 60 kgf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนลง

ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็ง หรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ สามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขโดยตรง

ข้อดีเป็นการทดสอบค่าความแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทดสอบวัสดุได้ครอบคลุมเกือบทุกชนิด การทดสอบทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยเพราะสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ สามารถใช้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบบรินเนลล์ เพราะหัวกดมีขนาดเล็กกว่า

ข้อเสียต้องเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะผิวชิ้นงานทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมากเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กและไม่ลึกมาก (รอยกดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 0.2 – 1 มิลลิเมตร)

ข้อจำกัด

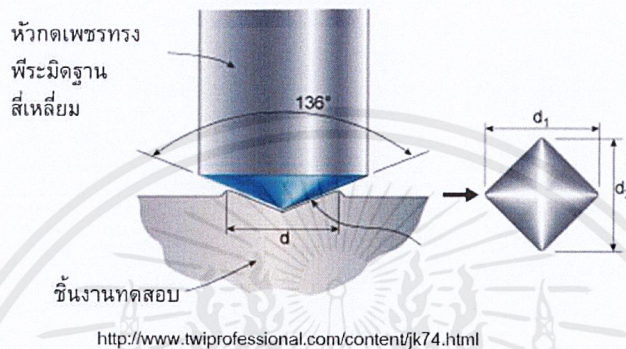
- ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด หรือมีมากพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปทรง
- ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดกับจุดศูนย์กลางรอยกดถัดไปหรือจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรมีระยะไม่น้อยกว่า 3 มม.
- การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี เหมาะกับการทดสอบวัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์ซีอยู่ในช่วง 20 – 67 HRC
- การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บี เหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์บีอยู่ในช่วง 35 – 100 HRB

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอก็มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่จะใช้แรงกดหลักต่ำกว่า คือ 60 kgf ด้วยน้ำหนักกดที่น้อยกว่านี้เอง ทำให้รอยกดของการทดสอบกับวัสดุเดียวกันตื้นกว่าเมื่อเทียบกับรอกเวลล์ซีและจึงสามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ในวงที่กว้างกว่าตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงเซรามิกส์ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ข้อเสียในทางกลับกันก็คือความละเอียดในการแจกแจงระดับความแข็งจะหยาบกว่าเล็กน้อย เช่น ความแข็งในระดับ 28 และ 30 รอกเวลล์ซี อาจวัดแล้วได้ค่าไม่ต่างกันถ้าวัดด้วยรอกเวลล์เอ อย่างไรก็ตามรอกเวลล์เอสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานบางที่ความหนาต่ำสุดน้อยกว่ากรณีรอกเวลล์ซีทั้งนี้ขึ้นกับค่าความแข็งของวัสดุด้วย ถ้าความแข็งมากรอยกดจะตื้นและความหนาต่ำสุดที่จะทดสอบได้ก็จะมีค่าน้อย

### 3. การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136° ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การ

เคลื่อนที่ของหัวกดที่ตกลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม  $d_1$  และ  $d_2$  ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูป ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม ( $d$ ) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงรอยกดที่เกิดขึ้นจากการวัดแบบวิกเกอร์ส [9]

$$\begin{aligned} \text{ความแข็งวิกเกอร์} &= \frac{\text{แรงกด/พื้นที่ผิวรอยกด}}{d^2} \\ &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\ &= \frac{0.189F}{d^2} \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่างๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN

ข้อดีหัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสียต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

ค่าความแข็งจากการทดสอบหนึ่งๆนั้น สามารถเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบในหน่วยอื่นๆได้ ดังได้แสดงในส่วนของตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบค่าความแข็งในกรณีที่ชิ้นงานผ่านการทดสอบจากเครื่องมือทดสอบที่ต่างกัน [9]

ตารางที่ 2.3 แสดงการเทียบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E140-07

Rockwell C, 150 kgf (HRC)	Rockwell A, 60 kgf (HRA)	Rockwell B, 100 kgf (HRB)	Brinell 10-mm Standard Ball 3000-kgf (HB)	Brinell 10-mm Carbide Ball 3000-kgf (HB)	Vickers Hardness Number(HV)
68	85.6	...	...	...	940
67	85.0	...	...	...	900
66	84.5	...	...	...	865
65	83.9	...	...	(739)	832
64	83.4	...	...	(722)	800
63	82.8	...	...	(705)	772
62	82.3	...	...	(688)	746
61	81.8	...	...	(670)	720
60	81.2	...	...	(654)	697
59	80.7	...	...	634	674
58	80.1	...	...	615	653
57	79.6	...	...	595	633
56	79.0	...	...	577	613
55	78.5	...	...	560	595
54	78.0	...	...	543	577
53	77.4	...	...	525	560
52	76.8	...	(500)	512	544
51	76.3	...	(487)	496	528
50	75.9	...	(475)	481	513
49	75.2	...	(464)	469	498
48	74.7	...	451	455	484
47	74.1	...	442	443	471

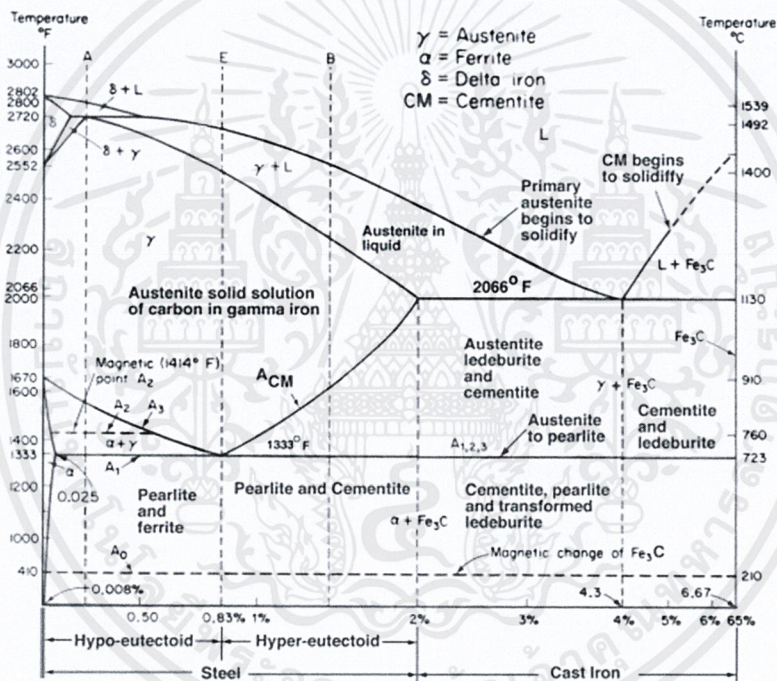
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46	73.6		432	432	458
45	73.1		421	421	446
44	72.5		409	409	434
43	72.0		400	400	423
42	71.5		390	390	412
41	70.9		381	381	402
40	70.4		371	371	392
39	69.9		362	362	382
38	69.4		353	353	372
37	68.9		344	344	363
36	68.4		336	336	354
35	67.9		327	327	345
34	67.4		319	319	336
33	66.8		311	311	327
32	66.3		301	301	318
31	65.8		294	294	310
30	65.3		286	286	302
29	64.8		279	279	294
28	64.3		271	271	286
27	63.8		264	264	279
26	63.3		258	258	272
25	62.8		253	253	266
24	62.4		247	247	260
23	62.0		243	243	254
22	61.5		237	237	248
21	61.0		231	231	243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4 การเกิดเฟสไดอะแกรมของเหล็ก

โลหะผสมเหล็ก - คาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 0.03 - 1.2 % แมงกานีส 0.25 - 1.00 % และธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อย จะเรียกว่า เหล็กกล้าประเภท plain carbon (plain - carbon steels ) เมื่อโลหะผสมเหล็ก - คาร์บอนถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ จะเกิดเฟสต่างๆ ขึ้นที่ อุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ดังแสดงในเฟสไดอะแกรมของ Fe -Fe<sub>3</sub>C ดังรูปที่ 2.12 เฟสไดอะแกรมนี้เป็นไดอะแกรมที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลจริง เพราะสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ ( Fe<sub>3</sub> C ) ที่เรียกว่า cementite นี้ สามารถสลายตัวไปเป็นเหล็กและคาร์บอน (แกรไฟต์) ได้ ดังนั้นเราจึงอาจเรียกสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์นี้ว่า Mettastable phase เฟสไดอะแกรมของ Fe - Fe<sub>3</sub>C จะประกอบด้วย ferrite, Austenite, Cementite ( Fe<sub>3</sub> C ) และ ferrite



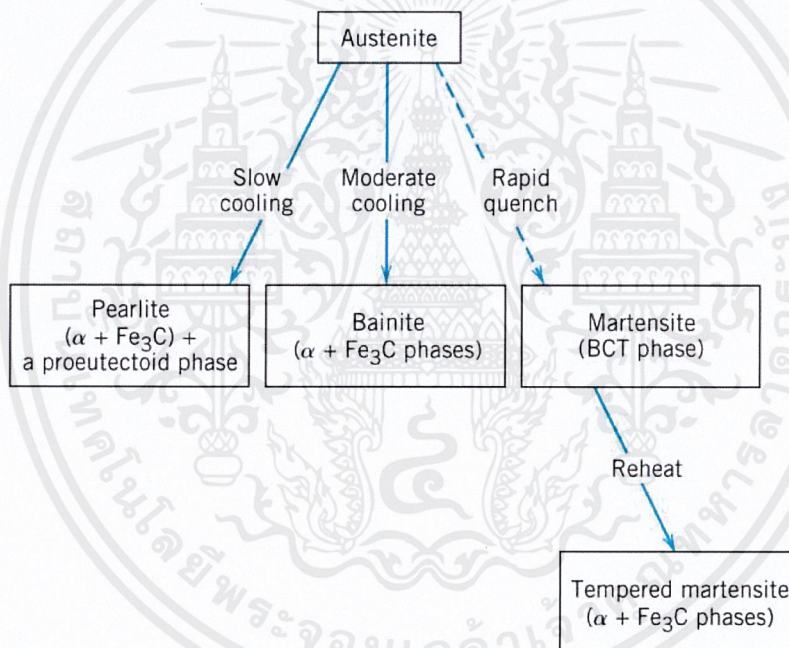
รูปที่ 2.12 แสดงเฟสไดอะแกรมของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์

เฟอร์ไรต์ (Ferrite) เฟสนี้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็กแบบ BCC คาร์บอนจะสามารถละลายใน ferrite ได้เพียงเล็กน้อย กล่าวคือ จะมีความสามารถในการละลาย Solid Solubility สูงสุดเพียง 0.02 % ที่อุณหภูมิ 723 °C และความสามารถในการละลายจะลดลงเป็น 0.005 % ที่อุณหภูมิ 0 °C

ออสเทนไนต์ (Austenite) เฟสนี้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของ คาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็ก Austenite มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จะมีความสามารถในการละลายของคาร์บอนสูงกว่า แบบ ferrite ความสามารถในการละลายของคาร์บอนใน Austenite ( ) จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.08 % ที่อุณหภูมิ 1148 °C และลดลงเป็น 0.8 % ที่อุณหภูมิ 723 °C

ซีเมนไทต์ (Cementite:  $Fe_3C$ ) สารประกอบ Intermetallic  $Fe_3C$  จะเรียกว่า Cementite สารประกอบ cementite จะมีปริมาณของคาร์บอน 6.67 % และเหล็ก 93.3 % Cementite จะมีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ [10]

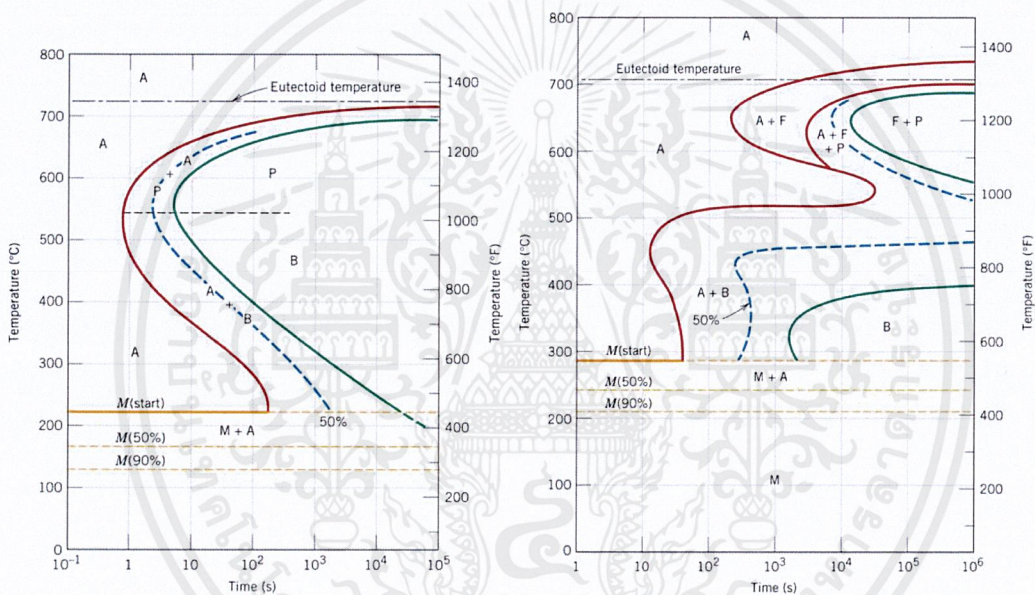
ออสเทนไนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสได้ 3 ลักษณะ คือ เพอไรต์, เบนไนต์ และมาเทนไนต์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนผังการเปลี่ยนแปลงเฟสของออสเทนไนต์ [11]

รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพแสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลา (Isothermal transformation diagram, IT or time-temperature transformation diagram, TTT) มีลักษณะเส้นโค้งคู้ คล้ายๆ กับคู่ของตัว C โดยเส้นโค้งแรกแสดงเวลาที่ออสเทนไนต์เริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสหากชุบเหล็กกล้าไว้ที่อุณหภูมิคงที่ ส่วนเส้นโค้งหลังเป็นเส้นแสดงเวลาที่การเปลี่ยนเฟส ณ อุณหภูมิคงที่นั้นสิ้นสุด โดยทั่วไปคู่ตัว C อาจจะมีเพียง 1 คู่ หรือ 2 คู่ ซ้อนเหลื่อมกันในช่วงอุณหภูมิสูงกับต่ำหรืออาจจะแยกกันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับธาตุผสมรองเป็นสำคัญ โดยคู่ตัว C บนสุดแสดงการเปลี่ยนเฟสเป็นเพอ

โรต์และเพอโรต์ (Hypoeutectoid steel) หรือเพอโรต์ (Eutectoid steel) หรือซีเมนไทต์และเฟิร์ลไลต์ (Hypereutectoid steel) คู่ตัว C ที่อยู่ต่ำลงมาแสดงการเปลี่ยนเฟสเป็นเบนไนต์ (Bainitic transformation) โดยอาจมีแยกย่อยเป็น 2 คู่ ซึ่งเป็นการเกิดเบนไนต์อุณหภูมิสูง (Upper bainite) และการเกิดเบนไนต์อุณหภูมิต่ำ (Lower bainite) ใต้คู่ตัว C สุดท้ายลงมาจะเป็นเส้นแสดงอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ ( $M_s$ ) และมีเส้นแสดงอุณหภูมิที่จะได้เป็นมาร์เทนไซต์ในปริมาณต่างๆ กัน ตามอุณหภูมิที่ลดต่ำลง เช่น เส้น 50%  $M_s$  เป็นต้น เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสเป็นมาเทนไซต์นั้นเกิดขึ้นได้เร็วมากและปริมาณมาร์เทนไซต์ขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น เส้นเริ่มการเปลี่ยนเฟสเป็นมาเทนไซต์จึงเป็นเส้นแนวนอนและส่งผลให้เส้นเริ่มการเปลี่ยนเฟสตลอดทั้งเส้นดูแล้วคล้ายตัว S จึงนิยมเรียกว่า เส้นโค้ง S (S-curve)



รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพแสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลา (TTT)

โครงสร้างเพอโรต์เป็นการผสมของโครงสร้างเพอโรต์และซีเมนไทต์ มีสภาพแข็งอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพอโรต์ดูเหมือนจะเป็นลำดับของชั้น คล้ายกับเกลียวคลื่นบนพื้นผิวน้ำ แนวเส้นดำคือซีเมนไทต์ และแนวขาวคือเพอโรต์ ดังนั้นเพอโรต์เป็นการผสมผสานกับแบบสลับไปมาของเพอโรต์และซีเมนไทต์ดังรูปที่ 2.15

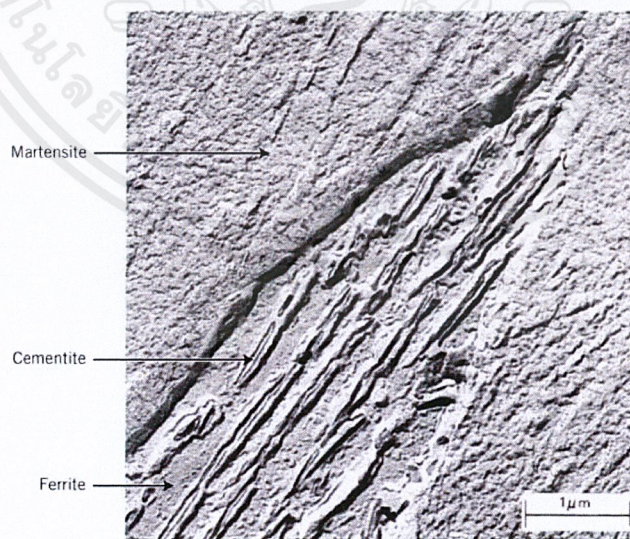


ก) เพอไรต์หยาบ

ข) เพอไรต์ละเอียด

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างเพอไรต์ [11]

เบนไนต์ประกอบด้วยเพอไรต์และซีเมนไทต์ ซึ่งจะมีรูปร่างที่เรียวยาวแหลมหรือมีรูปร่างที่แบนก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะที่เปลี่ยนโครงสร้างนั้น ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างเบนไนต์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nenad *et al.* [1] ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ก่อนและหลังการ heat treatment ของการเชื่อมแบบเทอร์มิต ผลคือการ heat treatment รอยเชื่อมนั้น ทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้นและเพิ่มความเหนียวให้กับรอยเชื่อม

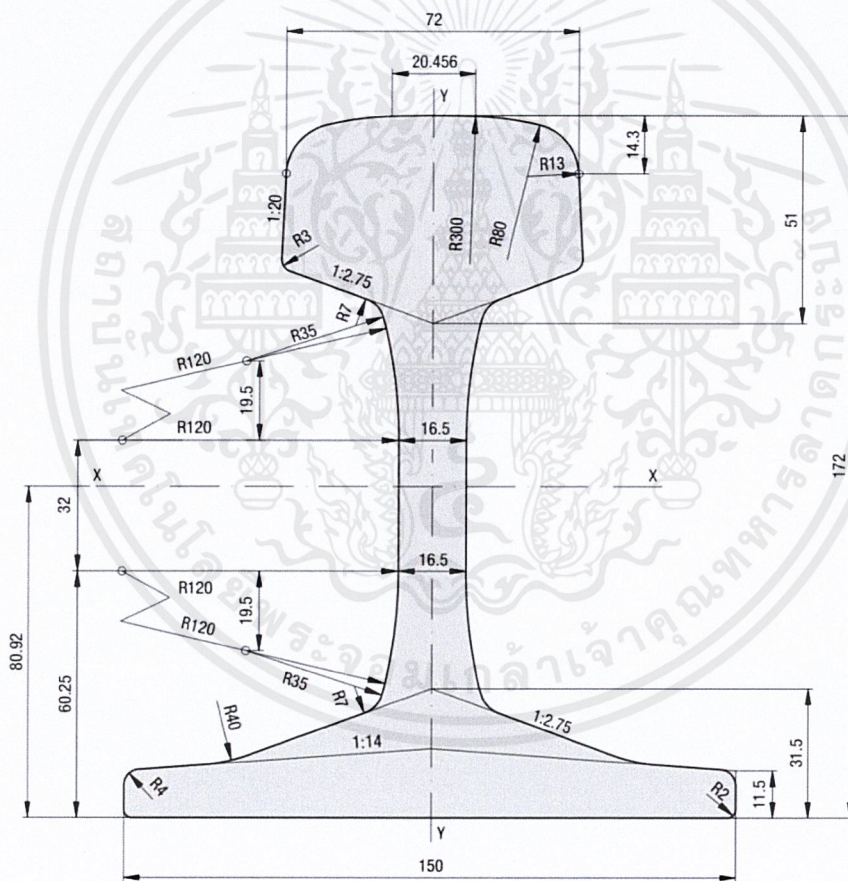
Chen *et al.* [3] ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจุดบกพร่องในรอยเชื่อม โดยการเพิ่มระยะเวลาการ Preheat และอุณหภูมิของโลหะเชื่อม จะช่วยยับยั้งการเกิดจุดบกพร่องภายในรอยเชื่อม



## บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

### 3.1 ชิ้นงานทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุพื้นฐานเป็นเหล็กทรงรูปไฟฟ้าขนาด UIC60 ที่มีน้ำหนักประมาณ 60 กิโลกรัมต่อความยาว 1 เมตร แสดงตามรูปที่ 3.1 มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1 และค่าความแข็งดังตารางที่ 3.2 โดยใช้ผงเชื่อมราง Alumino thermic ซึ่งมีเงื่อนไขการพรีฮีทคือ การพรีฮีทระยะสั้น 3 นาที, การพรีฮีทมาตรฐาน 6 นาที และการพรีฮีทระยะยาว 10 นาที โดยชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึง 800 MPa



รูปที่ 3.1 แสดงเหล็กทรงรูปไฟฟ้าขนาด UIC60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

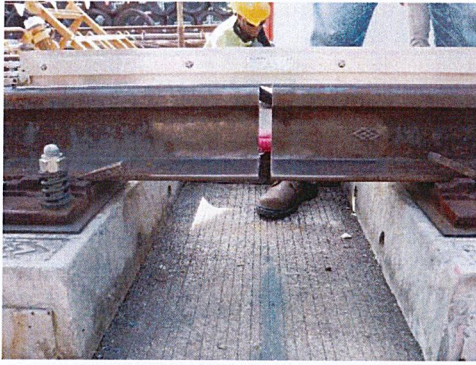
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของราง UIC60

Grade of Steel	Chemical composition, element in % of mass				
	C	Mn	Si	P	S
R0900 A	0.6-0.8	0.8-1.3	0.1-0.5	0.04	0.04

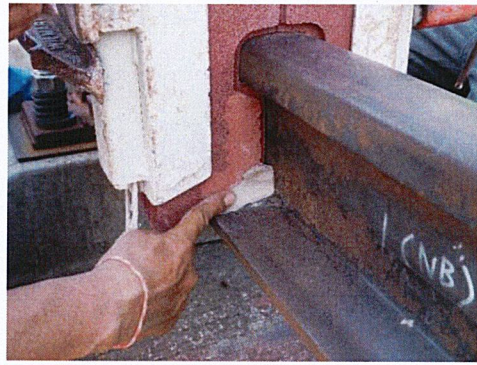
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความแข็งของราง UIC60

Steel Grade	HV
260	274-316

หลังจากได้รางทดสอบจะทำการเชื่อมรางแบบเทอร์มิต ซึ่งก่อนการเชื่อมนั้นจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมโดยเว้นระยะห่างระหว่างรางให้มีขนาด 25 มิลลิเมตร ทำการติดตั้งแม่พิมพ์ และอุดรอยต่อด้วยลูตติงพาส (Luting paste) เพื่อให้แม่พิมพ์ติดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการพรีฮีทรางและแม่พิมพ์ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ 3 นาที 6 นาที และ 10 นาที ด้วยหัวเผาของทางผู้ผลิตผงเชื่อมเทอร์มิต โดยใช้แก๊สอะเซทิลีนกับออกซิเจนที่ความดัน 0.6 กิโลปาสคาล (KPa) หลังจากการทำพรีฮีทแล้วจึงทำการเชื่อมเทอร์มิตต่อไป ดังรูปที่ 3.2



ก) แสดงระยะห่างระหว่างรางก่อนทำการเชื่อม



ข) แสดงการติดตั้งแม่พิมพ์และอุดรอยต่อ



ค) แสดงการพรีฮีทรางและแม่พิมพ์



ง) แสดงการจุดผงเชื่อมเทอร์มิต



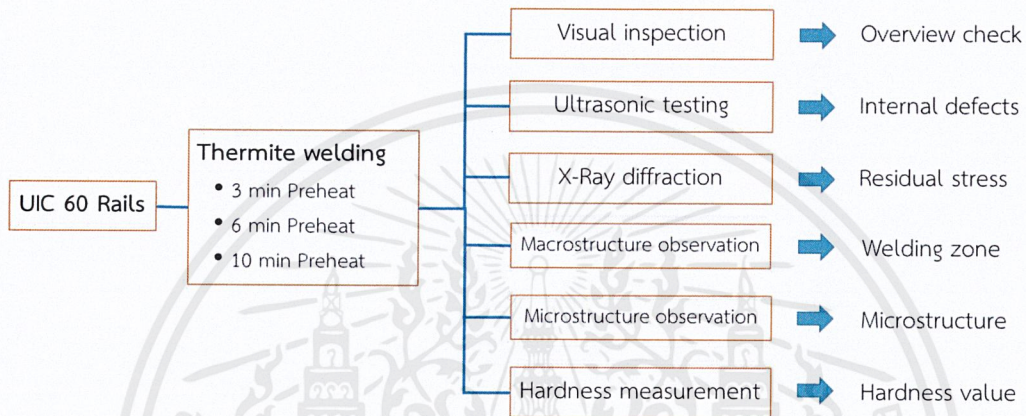
จ) แสดงเหล็กเชื่อมที่ล้นจากแม่พิมพ์

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเชื่อมแบบเทอร์มิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีการทดสอบและตรวจสอบชิ้นงาน

รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบแสดงไว้ดังแผนผังตามรูปที่ 3.2 โดยในการทดสอบชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแบบทำลาย (Destructive test) การทดสอบลักษณะนี้ ชิ้นงานทดสอบจะเกิดการชำรุดเสียหายไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive test) ชิ้นงานวัสดุจะไม่เกิดความเสียหาย ใช้สำหรับการตรวจสอบความบกพร่องในวัสดุ



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการทดสอบ

#### 3.2.1 การทดสอบด้วยตาเปล่า

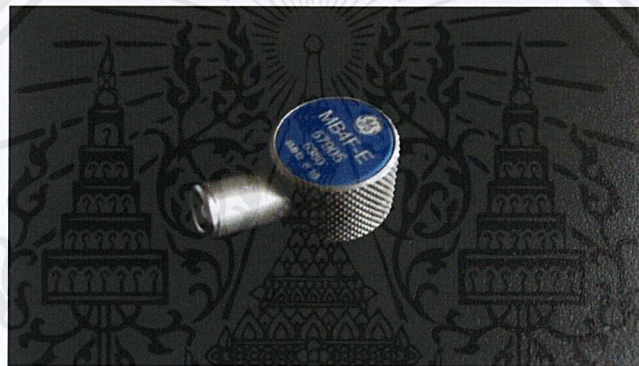
เมื่อได้รับชิ้นงานทดสอบมา อันดับแรกที่สามารถตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมได้คือการทดสอบด้วยตาเปล่า (Visual examination test) เป็นการใช้สายตามองสภาพภายนอกของวัสดุ เช่น การเชื่อมติด สภาพรอบบริเวณรอยเชื่อม การเกิดสะเก็ด รอยร้าว สีของรอยเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง

#### 3.2.2 การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E164 แบบไม่ทำลายชิ้นงาน ด้วยเครื่องทดสอบรุ่น Phasor XS ตามรูปที่ 3.3 โดยใช้การตรวจสอบแบบ A scan และหัวตรวจสอบแบบหัวตรง 4 MHz ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งอาศัยคลื่นเสียงส่งผ่านไปยังชิ้นงานทดสอบ ถ้าภายในชิ้นงานมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น คลื่นเสียงจะไปกระทบและสะท้อนกลับมายังเครื่องวัด โดยใช้เกณฑ์การทดสอบเดียวกัน ซึ่งจะกำหนดค่า Gain, Gate A Start, Gate B Start, Gate A TRSH และ Gate B TRSH เหมือนกันทุกระยะเวลาการพรีฮีท



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบด้วยคลื่นเสียง



รูปที่ 3.5 แสดงหัวตรวจสอบแบบหัวตรง 4 MHz

คลื่นเสียงนั้นจำเป็นต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวก่อนผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการทำการตรวจสอบ โดยจะใช้ Ultrasonic couplant ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับส่งผ่านคลื่นเสียงเข้าไปในชิ้นงานโดยมีลักษณะเป็นเจลดังรูปที่ 3.5 ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะกำหนดจุดอ้างอิงเป็นระยะห่างจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อมดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของ Ultrasonic couplant



รูปที่ 3.7 แสดงจุดอ้างอิงในการทดสอบอัลตราโซนิก

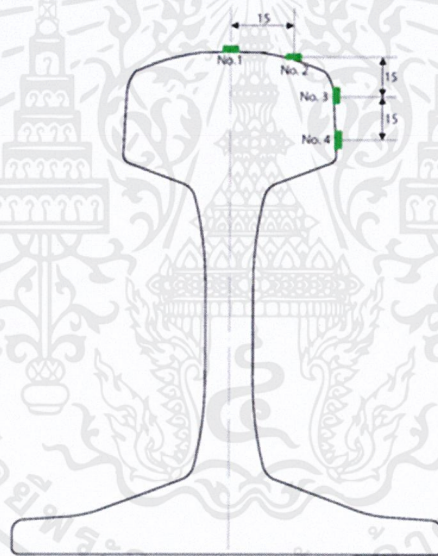
### 3.2.3 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

เมื่อตรวจสอบความสมบูรณ์และคุณภาพของรอยเชื่อมแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกล คือ การวัดความเค้นตกค้าง (Residual stress) โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) ด้วยเครื่อง XTRESS รุ่น 3000 ดังรูปที่ 3.7 และทำการวัดบนหัวรางตามรูปที่ 3.8 เนื่องจากเป็นส่วนที่รับน้ำหนักและเกิดการเสียดสีกับล้อจนเสียรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องวัดความเค้นตกค้าง

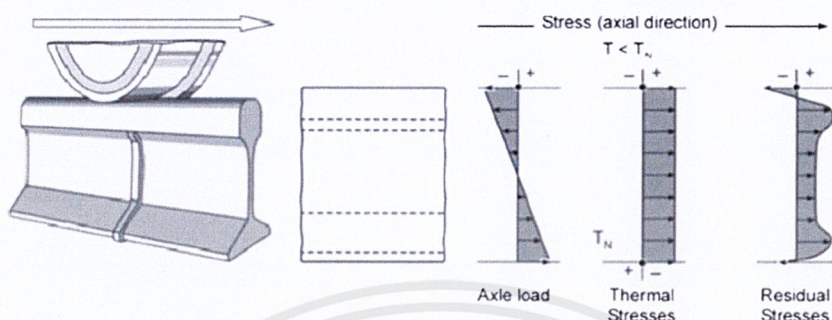


รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งการวัดความเค้นตกค้าง

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน คือ ตัดชิ้นงานให้เหลือความยาวประมาณ 0.2 เมตร (วัดจากกึ่งกลางรอยเชื่อมด้านละ 0.1 เมตร) เพื่อให้มีขนาดพอเหมาะกับเครื่องมือทดสอบ จากนั้นใช้ผ้าแห้งทำความสะอาดชิ้นงานให้เรียบร้อย แล้วนำชิ้นงานส่วนหนึ่งขัดผิวชิ้นงานให้เรียบร้อยด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึงเบอร์ 1200 จึงนำไปกัดกรดในตรอน เพราะมีคุณสมบัติไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อหาขนาดความกว้างของบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) เมื่อทราบบริเวณรอย

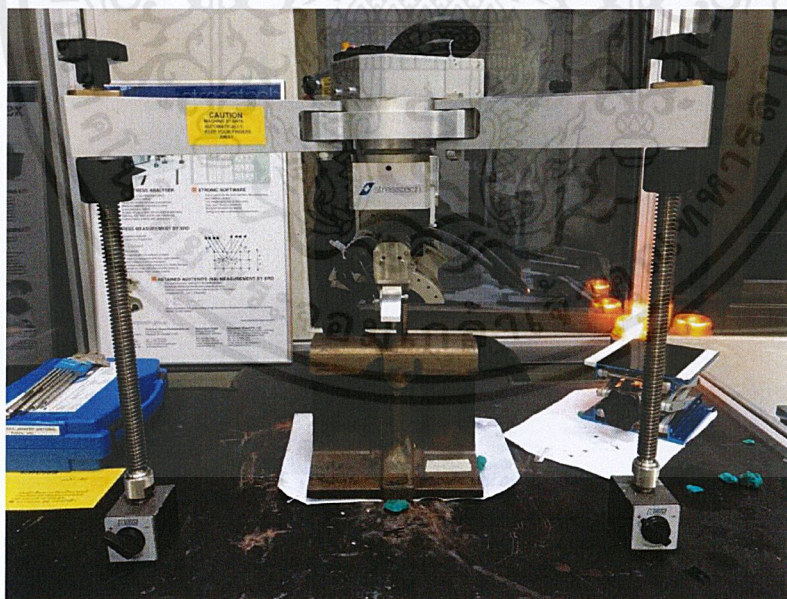
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อม, บริเวณกระหนว้น และบริเวณโลหะพื้นฐาน จึงทำการวัดความเค้นตกค้างทั้ง 3 บริเวณ โดยวัดที่หัวรางและตีนรางเนื่องจากมีแรงกระทำจากตัวรถสูงที่สุด ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 แสดงความเค้นที่รับแรงกระทำจากตัวรถ [11]

การวัดความเค้นตกค้างจะวัดด้วยกัน 2 แนว คือ ตามแนวรางและแนวตัดขวาง การจัดชิ้นงานในการทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 โดยก่อนจะทำการวัดนั้น จะต้องทำการสอบเทียบตัวเครื่องเพื่อความแม่นยำในการวัดและต้องตั้งชิ้นงานทดสอบให้ตั้งฉากกับหัวยิงโดยจะมีเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แสดงการจัดชิ้นงานวัดความเค้นตกค้างตามแนวราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

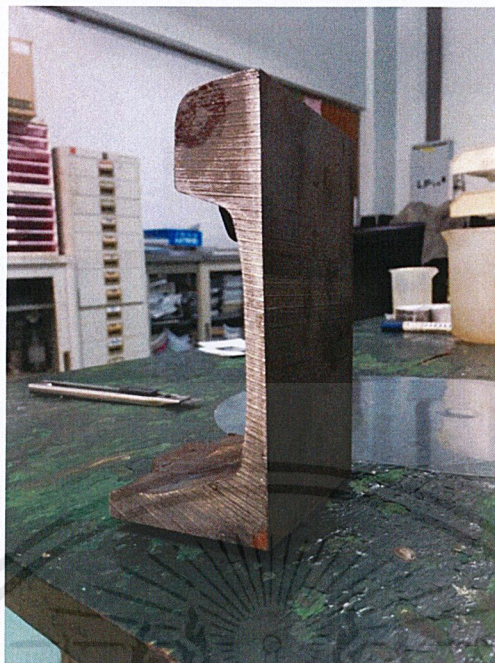


รูปที่ 3.12 แสดงการจัดชิ้นงานวัดความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวาง



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องมือในการตั้งชิ้นงานให้ตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงรางที่ผ่าตามแนวราง

### 3.2.4 การศึกษาโครงสร้างมหภาค

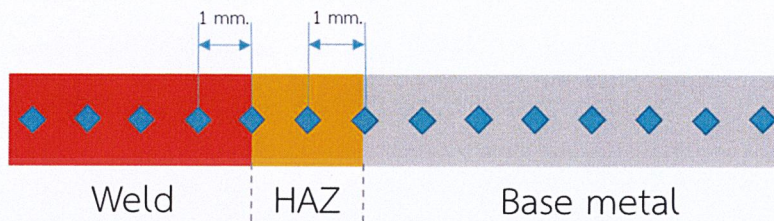
เมื่อตรวจสอบค่าความเค้นตกค้างแล้ว ทำการผ่ารางตามแนวรางโดยใช้เครื่องเลื่อยสายพาน (Band saw) ดังรูปที่ 3.13 และขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 320, 600 และเบอร์ 1200 หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาขัดด้วยแป้นขัดแบบสั๊กหลอด โดยใช้ผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอน เพื่อนำมาศึกษาความแตกต่างของเนื้อวัสดุบริเวณรอยเชื่อม บริเวณกระตบร้อน และบริเวณโลหะพื้นฐาน โดยการกัดชิ้นงานด้วยกรดไนตรอน 4%

### 3.2.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการเตรียมชิ้นงานโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดที่พอเหมาะประมาณ 9.0x1.3x1.4 เซนติเมตร และขัดชิ้นงานดังวิธีข้างต้น แล้วกัดชิ้นงานด้วยกรดไนตรอน 4% หลังจากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes) เพื่อนำมาออกแบบการวัดค่าความแข็ง

### 3.2.6 การวัดค่าความแข็ง

ในการวัดค่าความแข็ง (Hardness) จะทำการวัดที่หัวรางจากกึ่งกลางรอยเชื่อมมายังบริเวณกระทบบร้อน และบริเวณโลหะพื้นฐาน ตามรูปที่ 3.14 ซึ่งใช้ในการออกแบบการวัดความแข็ง



รูปที่ 3.15 แสดงจุดวัดความแข็งบนหัวรางอย่างง่าย



รูปที่ 3.16 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

ในการวัดความแข็งใช้การวัดแบบวิกเกอร์ โดยเครื่อง Duramin 5 ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งมีเงื่อนไขในการวัดที่เหมือนกันคือ ใช้โหลด 500 gf, เวลากด 15 วินาที และมีระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

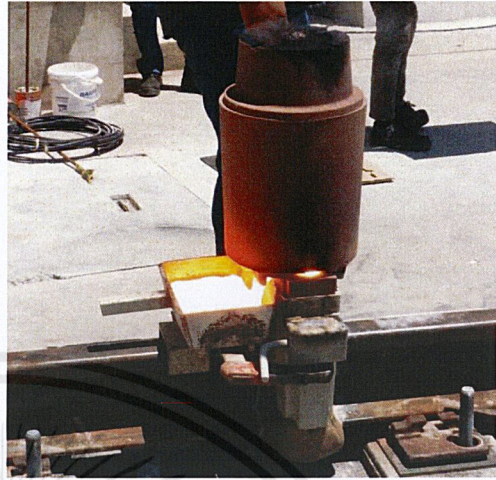
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบด้วยตาเปล่า (Visual test)

จากการตรวจสอบรอยเชื่อมภายนอกด้วยตาเปล่าพบว่า รอยเชื่อมที่พรีฮีทในเวลาที่แตกต่างกันนั้น มีลักษณะภายนอกที่ค่อนข้างต่างกันเล็กน้อย ตามรูปที่ 4.1 โดยภาพรวมแล้วมีการเชื่อมต่อโดยสมบูรณ์ระหว่างปลายรางทั้งสองใน 3 เงื่อนไข แตกต่างกันในระยะเวลาการพรีฮีท 3 นาที จะมีเศษของ luting paste ที่เป็นก้อนสีขาวติดอยู่บ้าง และมีส่วนของเนื้อโลหะเชื่อมส่วนเกินออกมาจากแม่พิมพ์ที่ระหว่างเอวรางกับตีนราง และมีรูบริเวณรอยเชื่อมที่ตีนราง ที่ระยะเวลาการพรีฮีท 6 นาที จะมีเศษ luting paste ติดอยู่บ้าง แต่มีเนื้อโลหะเชื่อมส่วนเกินเพียงเล็กน้อย และที่ระยะเวลาการพรีฮีท 10 นาที luting paste จะแห้งจนติดอยู่บนรางตามรอยขอบแม่พิมพ์ และมีเนื้อโลหะเชื่อมส่วนเกินในปริมาณที่มาก ส่วนของรอยเชื่อมที่ตีนรางที่ระยะเวลาการพรีฮีท 6 นาที จะมีความเรียบมากที่สุด ซึ่งต่างจากรยะเวลา 3 นาที และ 10 นาที จะมีความหยาบของรอยเชื่อมและมีเนื้อโลหะเชื่อมล้นออกมา สีของบริเวณกระแทกร้อนในระยะเวลาพรีฮีท 3 นาที จะเป็นสีดำที่แคบไม่ใหญ่นัก ส่วนการพรีฮีท 6 นาที มีระยะของสีดำกว้างออกมาและมีสีของแม่แบบติดมาด้วยนิดหน่อย แต่ในการพรีฮีท 10 นาทีนั้น มีระยะสีดำและสีของแม่แบบอย่างเห็นได้ชัด

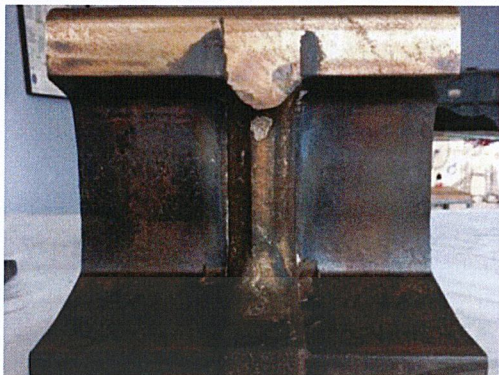


ก) แสดงภาพระหว่างการเชื่อมของพรีฮีท 3 นาที ข) แสดงภาพระหว่างการเชื่อมของพรีฮีท 6 นาที

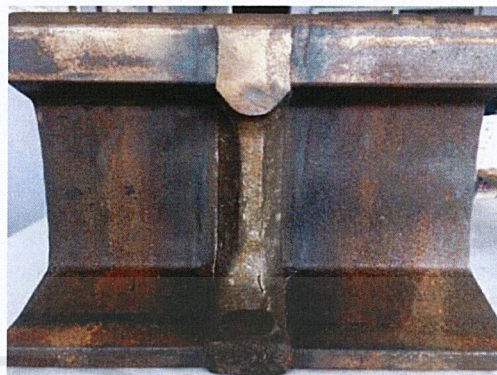


ค) แสดงภาพระหว่างการเชื่อมของพรีฮีท 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) แสดงรอยเชื่อมที่เวลาพรีฮีท 3 นาที



จ) แสดงรอยเชื่อมที่เวลาพรีฮีท 6 นาที



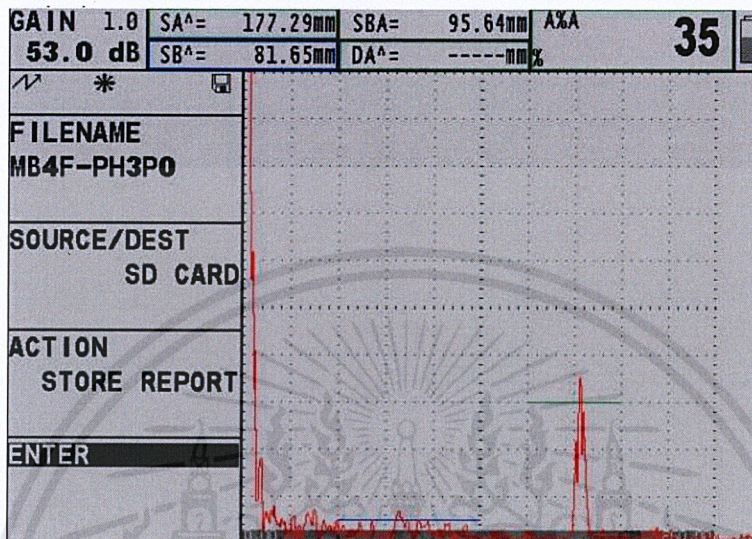
ฉ) แสดงรอยเชื่อมที่เวลาพรีฮีท 10 นาที

รูปที่ 4.1 แสดงภาพระหว่างการเชื่อมและหลังเชื่อม

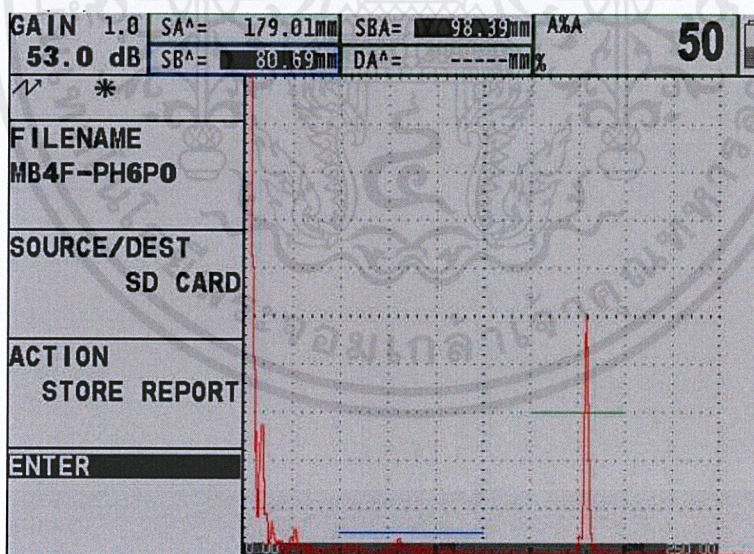
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic test)

การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จะทำให้ทราบถึงรอยบกพร่องภายในของรอยเชื่อมโดยจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ ยกตัวอย่างตามรูปที่ 4.2

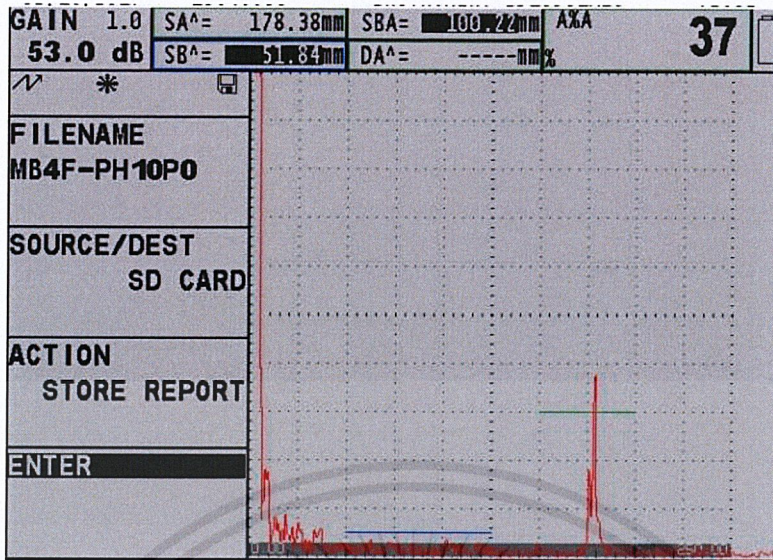


ก) แสดงกราฟของการพรีฮีท 3 นาที



ข) แสดงกราฟของการพรีฮีท 6 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) แสดงกราฟของการพรีอีท 10 นาที

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างกราฟ Ultrasonic Test ที่ระยะเวลาพรีอีทต่างกัน ณ จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม

เมื่อทำการตรวจสอบ ณ จุดกึ่งกลางรอยเชื่อมพบว่า ที่ระยะเวลาการพรีอีท 3 นาที มีจุดบกพร่องอยู่ที่ความลึก 81.65 มิลลิเมตร โดยวัดจากผิวของหัวราง แต่ในระยะเวลาการพรีอีท 6 นาที และ 10 นาทีนั้น ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราโซนิคโดยวัดจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม

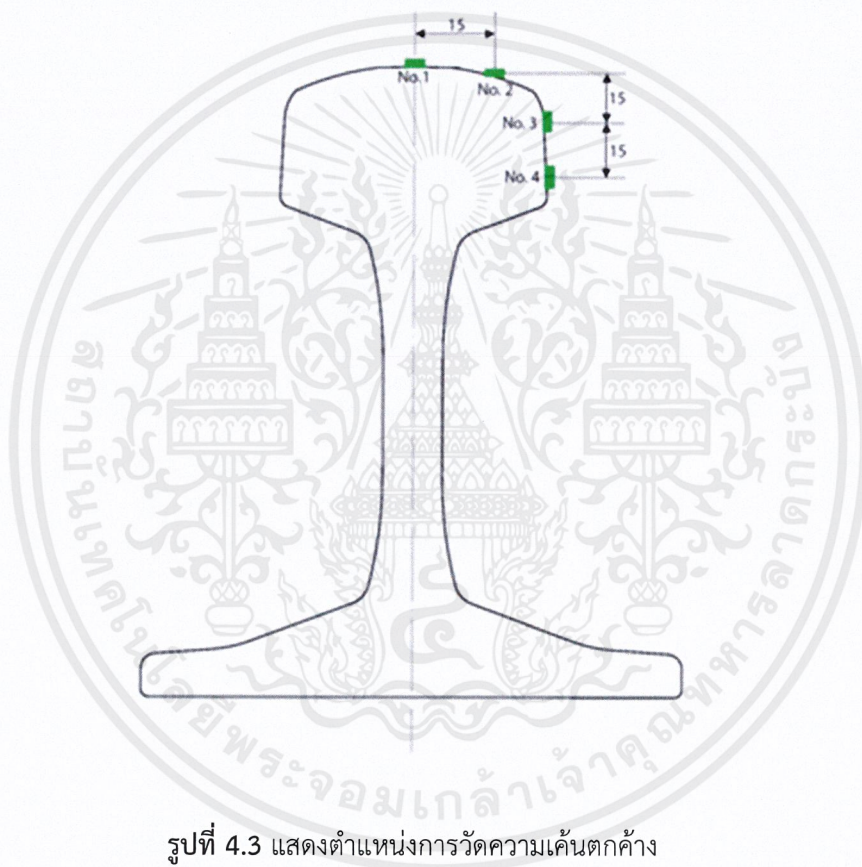
จุดวัด (มม.) \ ระยะเวลาพรีอีท (นาที)	-15	-12.5	-10	-7.5	-5	-2.5	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
3	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

หมายเหตุ: ✓ แสดงว่าพบจุดบกพร่องและ x แสดงว่าไม่พบจุดบกพร่อง

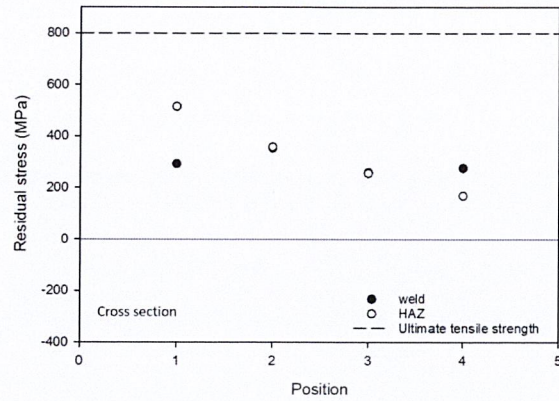
จากตารางที่ 4.1 พบว่าระยะพรีฮีท 3 นาที พบการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กตั้งแต่บริเวณจุดกึ่งกลางรอยเชื่อมจนถึงระยะห่างออกไป 7.5 มิลลิเมตร แต่ระยะพรีฮีท 6 และ 10 นาที ไม่พบจุดบกพร่องที่เป็นนัยสำคัญ

#### 4.3 ผลการวัดความเค้นตกค้างด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-ray diffraction)

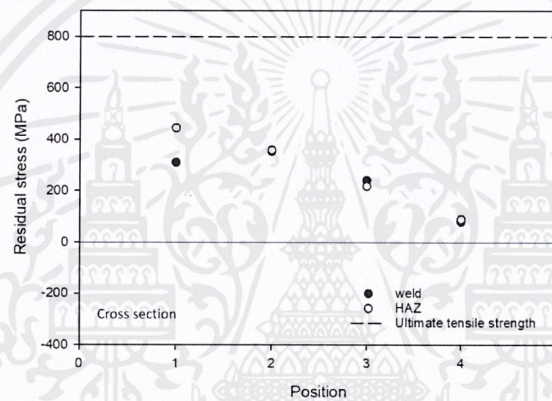
ค่าความเค้นตกค้างภายในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนที่ระยะเวลาการพรีฮีท 3, 6 และ 10 นาที ตามแนวราบและแนวตัดขวาง แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยมีตำแหน่งการวัดตามรูปที่ 4.3



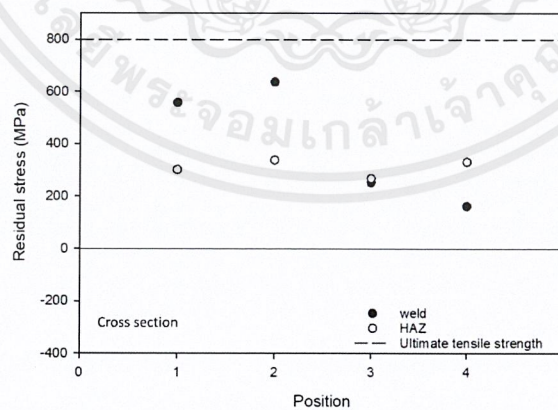
รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งการวัดความเค้นตกค้าง



ก) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวางที่ระยะเวลาพรีฮีท 3 นาที



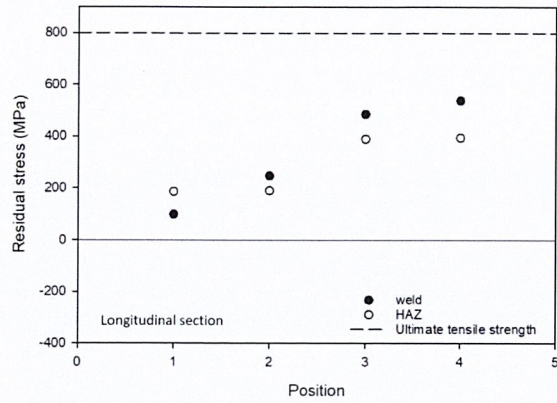
ข) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวางที่ระยะเวลาพรีฮีท 6 นาที



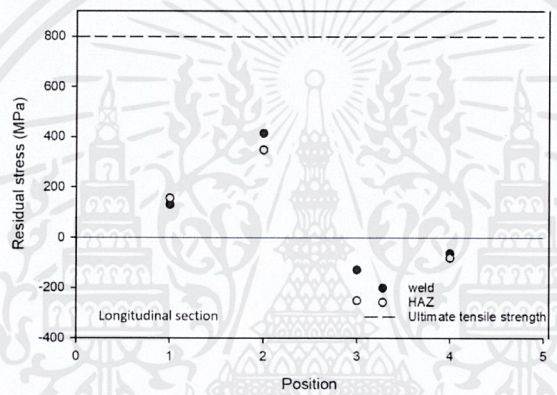
ค) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวางที่ระยะเวลาพรีฮีท 10 นาที

รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวาง

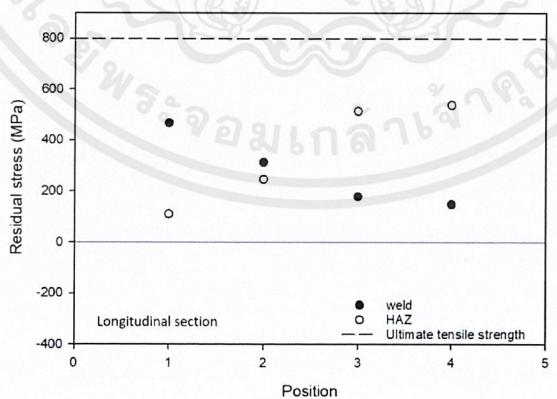
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวรางที่ระยะเวลาพรีฮีท 3 นาที



ข) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวรางที่ระยะเวลาพรีฮีท 6 นาที



ค) แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวรางที่ระยะเวลาพรีฮีท 10 นาที

#### รูปที่ 4.5 แสดงค่าความเค้นตกค้างตามแนวราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความเค้นตกค้างตามแนวตัดขวาง ในจุดที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาพรีฮีท 3 และ 6 นาที บริเวณกระทะร้อนจะมีค่าความเค้นดึงมากกว่าบริเวณรอยเชื่อม แตกต่างกับพรีฮีท 10 นาที ที่บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความเค้นที่มากกว่าซึ่งเข้าใกล้ค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) ในจุดที่ 3 ค่าความเค้นตกค้างทั้ง 3 เงื่อนไข มีค่าใกล้เคียงกันทั้งบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทะร้อน ในจุดที่ 4 พรีฮีท 3 นาที บริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าความเค้นสูงกว่าบริเวณกระทะร้อน พรีฮีท 6 นาที ทั้ง 2 บริเวณมีค่าความเค้นตกค้างใกล้เคียงกัน และพรีฮีท 10 นาที บริเวณกระทะร้อนมีค่าสูงกว่าบริเวณรอยเชื่อม

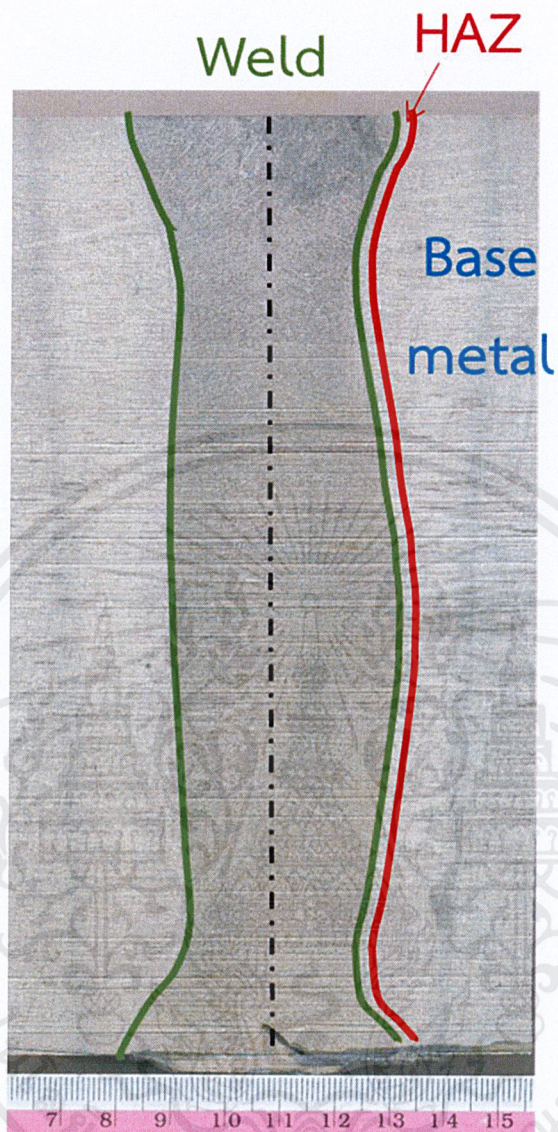
การวัดค่าความเค้นตกค้างตามแนวราง ในจุดที่ 1 เห็นได้ว่า ระยะเวลาพรีฮีท 3 และ 6 นาที มีค่าความเค้นตกค้างที่ใกล้เคียงกัน แต่พรีฮีท 10 นาที ค่าความเค้นแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยบริเวณกระทะร้อนมีค่าต่ำกว่า ในจุดที่ 2 ค่าความเค้นทั้ง 3 เงื่อนไข ในบริเวณกระทะร้อนและบริเวณรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ในจุดที่ 3 และ 4 ระยะเวลาพรีฮีท 3 และ 10 นาที มีค่าความเค้นตกค้างดึง ซึ่งสูงเข้าใกล้ค่าความต้านแรงดึง โดยพรีฮีท 3 นาที บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความเค้นสูงกว่าแตกต่างกับพรีฮีท 10 นาที ที่บริเวณกระทะร้อนมีค่าความเค้นสูงกว่า ที่ระยะเวลาพรีฮีท 6 นาทีนั้น มีค่าความเค้นตกค้างอัดทั้งบริเวณกระทะร้อนและบริเวณรอยเชื่อม

จากผลการทดลองพบว่าค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมโดยวัดตามแนวรางและตามแนวตัดขวางนั้น มีแนวโน้มในแต่ละจุดที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากการรับความร้อนในแต่ละระนาบภายในของชิ้นงานนั้นได้รับไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการหดตัวจากการเย็นตัวที่ต่างกัน

เนื่องจากชิ้นงานที่ถูกยิงด้วยรังสีจากเครื่อง XTRESS รุ่น 3000 นั้น มีผิวที่ไม่เรียบพอ ทำให้ผู้ทำการทดลองต้องเลื่อนจุดที่ทำการวัดค่าออกมาจากระยะเดิมตามความเหมาะสม ซึ่งอาจทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนออกมาบางจุด

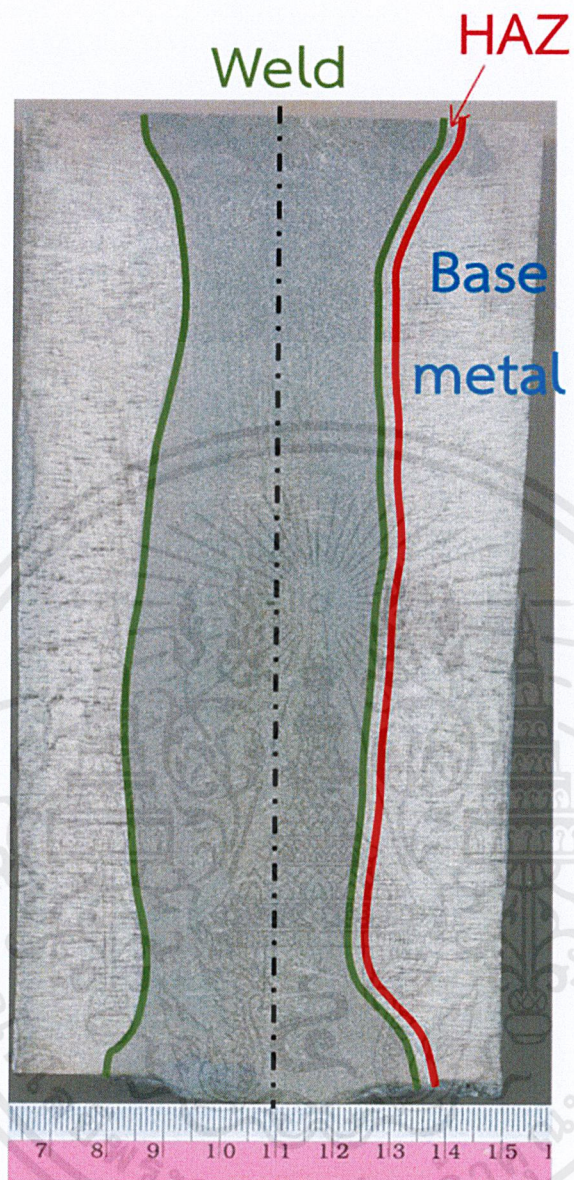
#### 4.4 โครงสร้างมหภาค

เมื่อนำรางมาผ่าแล้วกัดด้วยกรดไนตรอน 4% จะเห็นถึงบริเวณรอยเชื่อม บริเวณกระทะร้อน และบริเวณกระทะร้อน ดังรูปที่ 4.6



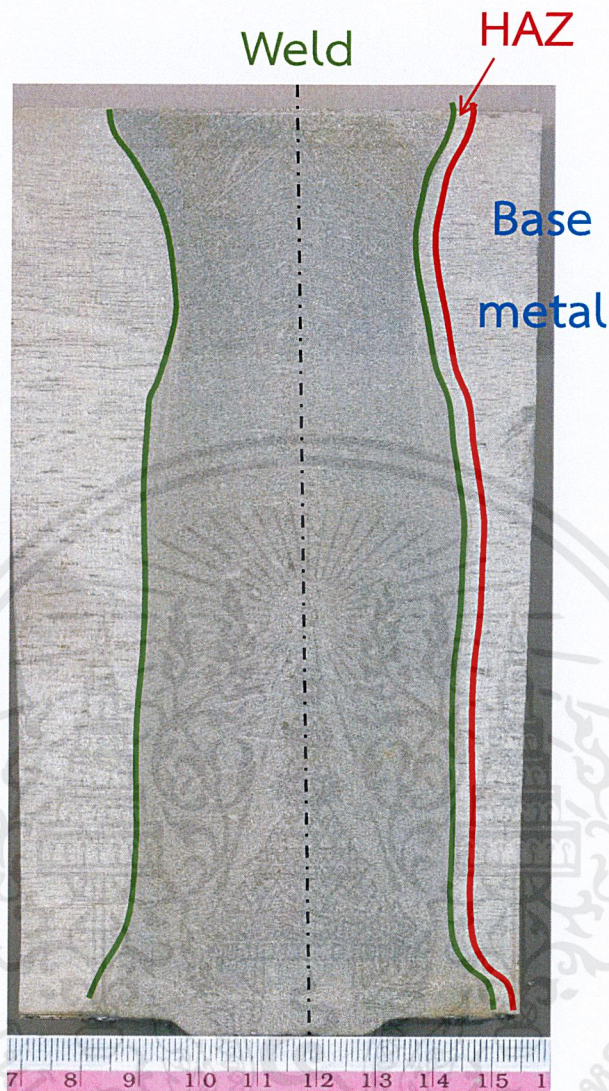
ก) แสดงโครงสร้างมหภาคที่ระยะเวลาพรีฮีท 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แสดงโครงสร้างมหภาคที่ระยะเวลาพรีฮีท 6 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



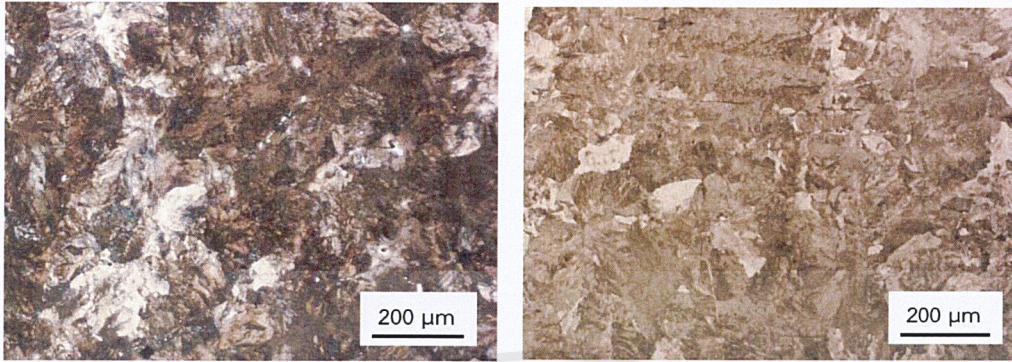
ค) แสดงโครงสร้างมหภาคที่ระยะเวลาพรีฮีท 10 นาที

รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างมหภาคที่ระยะเวลาพรีฮีทต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 สามารถแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณรอยเชื่อมมีขนาดตั้งแต่ 3 เซนติเมตร จนถึง 5 เซนติเมตร บริเวณกระแทบร้อนมีขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และบริเวณโลหะพื้นฐาน ซึ่งขอบเขตในแต่ละบริเวณที่ได้นั้นจะใช้ประโยชน์ในการพิจารณาโครงสร้างและสมบัติทางกลของวัสดุที่เกิดขึ้นหลังการเชื่อม

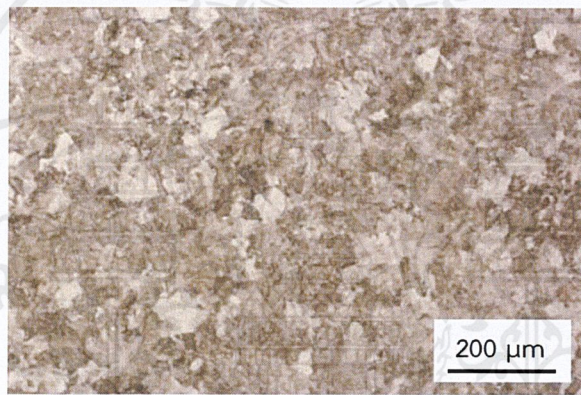
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค



ก) แสดงโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม

ข) แสดงโครงสร้างบริเวณกระตบร้อน



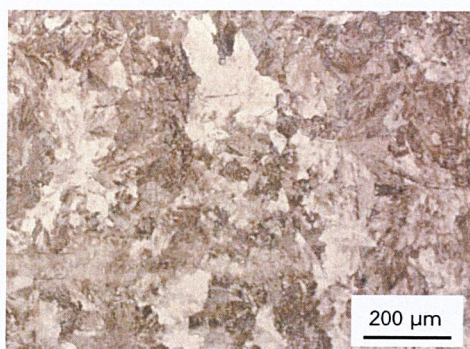
ค) แสดงโครงสร้างบริเวณโลหะพื้นฐาน

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 3 นาที

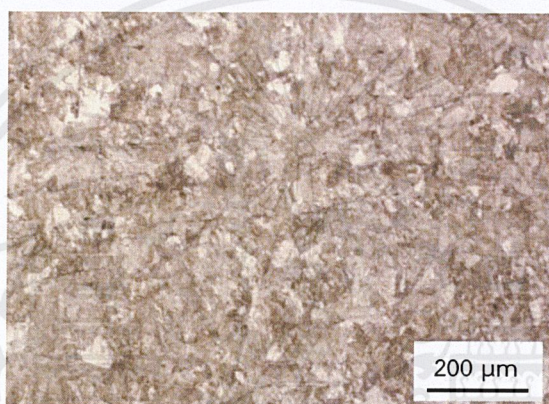
จากรูปที่ 4.7 ในส่วนของโลหะพื้นฐานพบว่า มีโครงสร้างของเฟอไรต์ละเอียด ซึ่งต่างจากโครงสร้างของบริเวณกระตบร้อนและบริเวณรอยเชื่อมที่มีโครงสร้างเฟอไรต์หยาบและมีเบนไนต์แทรกตัวอยู่



ก) แสดงโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม



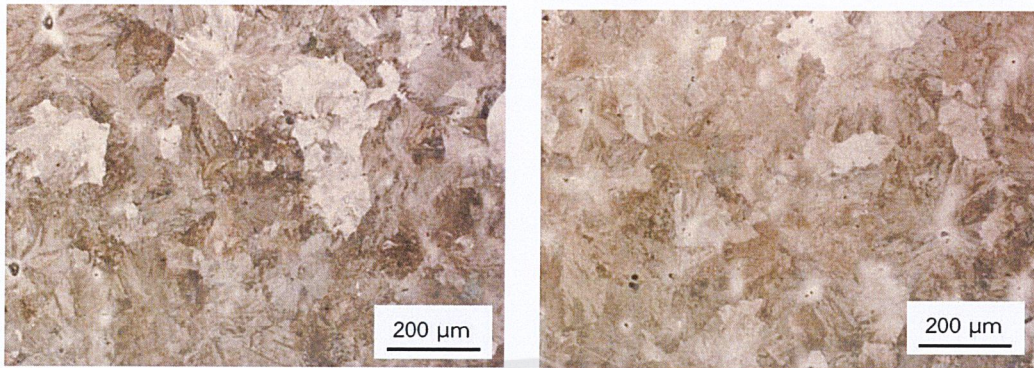
ข) แสดงโครงสร้างบริเวณกระทบบร้อน



ค) แสดงโครงสร้างบริเวณโลหะพื้นฐาน

#### รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 6 นาที

ในการพรีฮีท 6 นาทีนั้น มีโครงสร้างจุลภาคตามรูปที่ 4.8 โดยบริเวณโลหะพื้นฐานมีโครงสร้างเพอไรต์ละเอียด บริเวณกระทบบร้อนและบริเวณรอยเชื่อมมีโครงสร้างเพอไรต์หยาบและโครงสร้างเบนไนต์ในปริมาณไม่มาก



ก) แสดงโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม

ข) แสดงโครงสร้างบริเวณกระตบร้อน



ค) แสดงโครงสร้างบริเวณโลหะพื้นฐาน

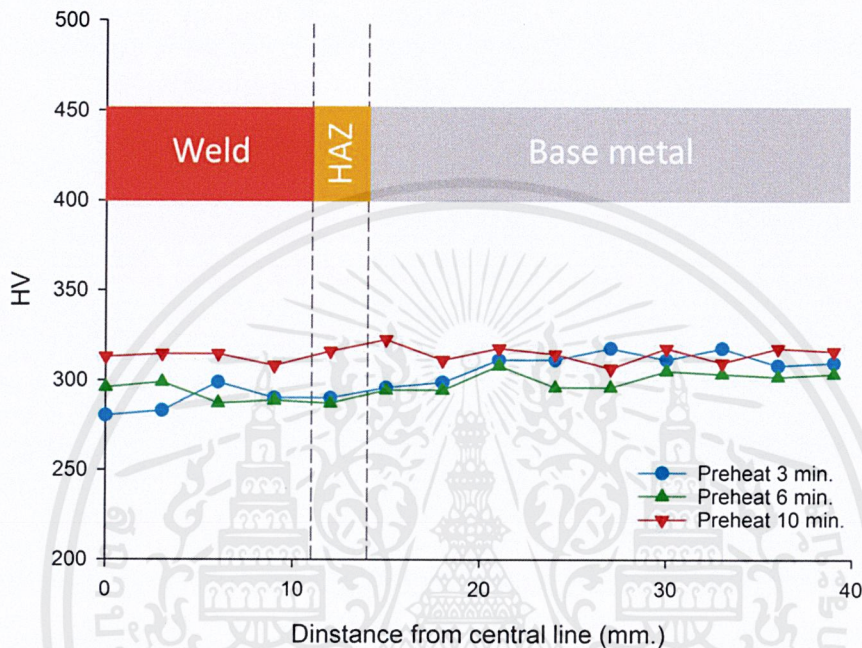
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เวลาพรีฮีท 10 นาที

จากรูปที่ 4.9 บริเวณโลหะพื้นฐานมีโครงสร้างเป็นเพอไรต์ละเอียด ในส่วนบริเวณกระตบร้อน และบริเวณรอยเชื่อมนั้นมีโครงสร้างเพอไรต์หยาบและเบนไนต์ในปริมาณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การวัดค่าความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งเป็นไปดังรูปที่ 4.10 โดยมีแนวโน้มตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค และขนาดเกรนซึ่งที่บริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระตบร้อนมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณโลหะพื้นฐาน ส่งผลให้มีค่าความแข็งที่สูงกว่า ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็ง

จากกราฟในรูปที่ 4.10 พบว่าในการพรีฮีทที่ 3 นาที และ 6 นาที มีแนวโน้มของค่าความแข็งไปในทิศทางเดียวกันซึ่งที่รอยเชื่อมและบริเวณกระตบร้อน นั้นมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ต่ำกว่าบริเวณโลหะพื้นฐาน ในทางกลับกันที่ระยะเวลาการพรีฮีทที่ 10 นาที พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระตบร้อนมีค่าสูงกว่าบริเวณโลหะพื้นฐาน

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

	Weld	HAZ	Base metal
Preheat 3 min	Coarse Pearlite Bainite ~293.2 HV	Coarse Pearlite Bainite ~296.8 HV	Fine Pearlite ~308.8 HV
Preheat 6 min	Coarse Pearlite Bainite ~292.2 HV	Coarse Pearlite Bainite ~285.1 HV	Fine Pearlite ~303.7 HV
Preheat 10 min	Coarse Pearlite Bainite ~311.9 HV	Coarse Pearlite Bainite ~312.4 HV	Fine Pearlite ~309.4 HV

จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่เวลาการพรีฮีท 3 นาที และ 6 นาที มีโครงสร้างของเพอไรต์หยาบ และมีโครงสร้างเบนไนต์ปริมาณน้อยแทรกตัวอยู่ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณกระทบบร้อน แต่ในโลหะพื้นฐานมีเฉพาะโครงสร้างของเพอไรต์ละเอียด จึงเป็นผลทำให้ค่าความแข็งที่โลหะพื้นฐานมีค่าสูงกว่าที่บริเวณรอยเชื่อม และบริเวณกระทบบร้อน ต่างกันกับการพรีฮีท 10 นาที พบว่าที่บริเวณโลหะพื้นฐานมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่น้อยกว่าบริเวณที่เหลือ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีโครงสร้างของเบนไนต์เข้ามาแทรกตัวอยู่ในปริมาณที่มาก เพราะโครงสร้างของเบนไนต์มีค่าความแข็งสูงกว่าเพอไรต์ละเอียด และเพอไรต์ละเอียดมีค่าความแข็งที่มากกว่าเพอไรต์หยาบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

- 5.1.1 เงื่อนไขในกระบวนการพรีฮีททั้ง 3 นั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างจุลภาค, คุณภาพและคุณสมบัติของชิ้นงาน
- 5.1.2 การตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่า ในทุกเงื่อนไขการเชื่อมมีการเชื่อมติดกันสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ที่เป็นนัยสำคัญ แต่ละเงื่อนไขแตกต่างกันที่สีของรางที่เป็นผลจากการได้รับความร้อน, ปริมาณเศษของลู่ตึงพาส และความหยาบของโลหะเชื่อม
- 5.1.3 การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกพบจุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่ตีนรางในเงื่อนไขการพรีฮีท 3 นาที เนื่องจากได้รับระยะเวลาการพรีฮีทที่น้อยเกินไป ทำให้การกระจายตัวของความร้อนไม่ถึงถึงทั้งรางและมีความชื้นหลงเหลืออยู่ เป็นผลให้เกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อม โดยเฉพาะที่ตีนราง เพราะหัวเผาอยู่ด้านบนหัวราง
- 5.1.4 การตรวจสอบด้วยวิธีเอ็กเรย์ดิฟแฟรคชันพบว่า ในระยะเวลาการพรีฮีท 6 นาที มีค่าความเค้นตกค้างอัดซึ่งเป็นผลดีต่อความแข็งแรงต่อการล้าตัว (fatigue strength) เนื่องจากรางรถไฟรับโหลดความล้า และค่าความเค้นตกค้างดึงซึ่งเป็นความเค้นที่เป็นผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า นั้น เข้าใกล้ค่าความเค้นตกค้างวิกฤตต่ำที่สุด
- 5.1.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและความแข็งพบว่า ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาค โดยโครงสร้างที่มีขนาดเกรนใหญ่จะมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเกรนที่มีขนาดเล็ก โดยค่าความแข็งเฉลี่ยนั้น พรีฮีท 10 นาที มีค่าสูงสุดเนื่องจากมีโครงสร้างเบนไนต์จำนวนมากแทรกตัวอยู่ ซึ่งค่าความแข็งสูงจะส่งผลให้ความเหนียวของวัสดุต่ำลง

ตารางที่ 5.1 แสดงการสรุปผลคะแนนจากการทดสอบต่างๆ

	Preheating 3 minutes	Preheating 6 minutes	Preheating 10 minutes
Visual inspection	3	3	3
Ultrasonic Test	0	2	2
X-Ray diffraction	1	3	1
Microstructure & Hardness	2	2	1
Total	6	10	7

ตาราง 5.1 แสดงคะแนนผลสรุป โดย 3 คะแนน หมายถึง ดีมาก, 2 คะแนน หมายถึง ดี, 1 คะแนน หมายถึง พอใช้ และ 0 คะแนน หมายถึง ไม่ดี จากตารางพบว่า การพรีฮีทที่ระยะเวลา 6 นาที มีคะแนนรวมสูงที่สุด จึงทำให้เวลาพรีฮีท 6 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมต่อเทอร์มิตในรางรถไฟชนิด UIC 60

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยทดลองที่ผ่านมาพบว่าควรมีการปรับปรุงพัฒนาการศึกษาความเค้นตกค้างจากการเชื่อมรางรถไฟให้ดียิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นการแนะนำองค์ประกอบที่ส่งผลต่อผลการทดลองดังต่อไปนี้

- คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ทำการทดลองควรเรียบและปราศจากสิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวก่อนทำการทดลองซึ่งส่งผลต่อค่าที่ได้ โดยเฉพาะในขั้นตอนการยิงรังสีของการวัดค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน
- การประเมินความเค้นตกค้างในการทดลอง จะต้องทำการประเมินค่าความเค้นตกค้างในทั้งตามแนวแกนและแนวตัดขวางเสมอ
- การกำหนดจุดที่จะทำการวัดค่าความเค้นที่เป็นรอยเชื่อมนั้น ควรทำการวัดค่าที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนด้วย เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nenad I., Jovanovic M. T., Todorovic M., Trtanj M., Saponjic P. **Microstructural and mechanical characterization of postweld heat-treated thermite weld in rails.** Mater. Charact., 1999, 43, 243.
- [2] Eric M., 2557, **Metallurgical Engineering** (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <https://www.studyblue.com/notes/note/n/met-143-final/deck/13225738>, 14 เมษายน 2560
- [3]Chen Y., Lawrence F. V., Barkan C. P. L., Dantzig, J. A. **Weld defect formation in rail thermite welds.** Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2006, 220 (F4), 373–384.
- [4] Bayu Nurwinanto, 2557, **Visual inspection and Weld Discontinuities-Causes and Remedies** (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://bnurwinanto.blogspot.com/2014/08/visual-inspection-and-weld.html>, 15 เมษายน 2560
- [5] Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G., **Methods of measuring residual stresses in components.** Mater. Des., 35 (2012), 572–588.
- [6] **Fundamentals of Ultrasonic Imaging and Flaw Detection** (ออนไลน์), 2543, แหล่งที่มา: [www.ni.com/white-paper/3368/en/](http://www.ni.com/white-paper/3368/en/), 15 เมษายน 2560
- [7] สรินทร ลิ้มปนาท, วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. **เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543, หน้า 309-322.
- [8] พณพล บัณเฑาะ, **การประเมินความเค้นตกค้างโดยการใช้อัลตราซาวด์ความถี่สูง,** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548, หน้า 36.
- [9] อภิชาติ พานิชกุล, 2560, **การวัดค่าความแข็ง** (ออนไลน์), แหล่งที่มา: [http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement\\_Of\\_Hardness.html](http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html), 20 เมษายน 2560
- [10] **วัสดุวิศวกรรม วิชาพื้นฐานทางวิศวกรรม** (ออนไลน์), 2552, แหล่งที่มา: <http://www.muslimthaipost.com/main/content.php?page=sub&category=104&id=2050>, 1 มิถุนายน 2560
- [11] **Iron-Carbon Phase Diagram** (ออนไลน์), 2550, แหล่งที่มา: [http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014\\_08/19/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2010%20Iron-Carbon%20Phase%20Diagram.pdf](http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/19/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2010%20Iron-Carbon%20Phase%20Diagram.pdf), 1 มิถุนายน 2560

- [12] Romano S., Manenti D., Beretta S., Zerbst U., **Semi-probabilistic method for residual lifetime of aluminothermic welded rails with foot cracks.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85 (2016), 398–411



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้