



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์  
ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)  
ประจำปีงบประมาณ 2562

ความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบรอยเชื่อมโลหะต่างชนิด  
Ultrasonic inspectability of dissimilar metal weld joint

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. ใหม่ น้อยพิทักษ์	หัวหน้าโครงการ
ผศ.ดร. กมลวรรณ อุปเงิน	ผู้ร่วมโครงการ
นายชานนท์ เฉียบแหลม	ผู้ร่วมโครงการ
นายชนกานต์ เฉียบแหลม	ผู้ร่วมโครงการ

ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มีนาคม พ.ศ. 2564

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ ซึ่งงานวิจัยจะไม่สามารถเกิดขึ้นและสำเร็จได้ด้วยดี ถ้าหากขาดความอนุเคราะห์จากแหล่งทุน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และหน่วยวิจัยวัสดุและการทดสอบโดยไม่ทำลาย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการศึกษาวิจัยในโครงการนี้

สุดท้ายนี้หากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด คณะผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ และต้องขอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน ผู้ที่ให้ความสนใจวิธีการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงและคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรย์เฟส และภาคอุตสาหกรรมหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอยู่ไม่น้อย คณะผู้วิจัยยินดีรับฟังคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้อ่านทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

18 มีนาคม 2564

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ส่งผลต่อความสามารถในทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส การทดลองใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 มาอบที่อุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นตัวในเตา จากนั้นสร้างวิธีสำหรับประเมินความรุนแรงของรอยความไม่ต่อเนื่อง ด้วยเส้นโค้งชดเชยค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทางสำหรับวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และ ค่าชดเชยเวลาการเดินทางของคลื่นเสียง สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงแบบเรียงเฟส ตามข้อกำหนดของ ASME section V article 4 2017 ในส่วนรอยความไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย ได้จำลองรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุน ขนาด 2.5 และ 1 มิลลิเมตร กับชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ เพื่อให้ครอบคลุมในการทดสอบทั้งในบริเวณแนวหลอมละลายและในพื้นที่หลอมละลาย ผลการใช้เส้นโค้งชดเชยค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องในงานเชื่อมที่สร้างขึ้น พบว่าสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงจากหัวตรวจสอบความถี่ 2.25 MHz มีค่าการลดทอนพลังงานคลื่นเสียงน้อยกว่า และการตอบสนองของสัญญาณมีความถูกต้องมากกว่า 5 MHz โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้มุมหัวตรวจสอบ 60 องศา ในการตรวจสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม และงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน เส้นโค้งชดเชยค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง ที่สร้างจากชิ้นงานที่อบอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเกรนโตในพื้นที่มากที่สุด สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง พบว่าผลการทดสอบที่ใช้ค่าชดเชยเวลาการเดินทางของคลื่นเสียง ที่สร้างจากชิ้นงานที่อบอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดเช่นเดียวกันกับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง แต่ในแง่การใช้งาน วิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส สามารถทำงานได้ง่ายกว่า เนื่องจากในการทดสอบมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่า สามารถเลือกมุมในการทดสอบ และมีหน้าจอสectorial Scan ส่งผลให้ช่วยลดความผิดพลาดและง่ายต่อการประเมินผลรอยความไม่ต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดสอบนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวิธีการสร้างเส้นโค้งชดเชยพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง สำหรับการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม และงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอนในภาคอุตสาหกรรมให้มีความถูกต้องและแม่นยำ ลดความผิดพลาดและอันตรายจากการประเมินผลการทดสอบผิดพลาด

## Abstract

This research is aimed to study the microstructure of the fusion line and the weld zone in welding of different type of metal which has the effect on the ultrasonic testing (UT) and phased array ultrasonic testing (PAUT). The ASTM A516 carbon steel and AISI 316 stainless steel were prepared in this study. Both of raw materials were heat treatment at various temperatures, 800, 900, 1000, 1100 and 1200 °C, then the heated specimens were left to cool down naturally at room temperature. The evaluation method of weld discontinuities was created using Distance Amplitude Correction curve (DAC) for UT and the Time Corrected Gain (TCG) for PAUT, according to the requirements of the ASME section V article 4 2017. For discontinuities fabrication, this work built the specimen contained the porosity with size 2.5 mm and 1 mm, respectively. Furthermore, the incomplete fusion was also fabricated to cover all experiments in the fusion line and the weld zone. The UT inspection of the welded carbon steel in comparison with the welded metal between carbon steel and stainless steel was studied. The inspection results conducted using DAC curve show that the ultrasonic signal derived from 2.25 MHz probe has a lower attenuation than that obtained from 5 MHz probe. It was found that the signal response of 2.25 MHz probe is more concise than 5 MHz probe especially at 60° angle probe. DAC curve obtained from the heat-treated specimen at 1000 °C exhibits the most accurate and precise result because this is the proper temperature for the grain growth in that area. For PAUT experiment, the specimen that was heat treatment at 1000 °C has the most accurate and precise result which is similar to UT experiment. However, working with PAUT is easier than UT due to lower noise in the inspection process. PAUT can operate in various angle together with Sectorial Scan which has the advantage over UT. This process can reduce an error during the inspection making it easy to evaluate weld discontinuities. In summary, the results of this work are useful for DAC curve making in the discontinuities inspection by UT and PAUT techniques. Welding of different type of metal, especially for the weld between carbon steel and stainless steel, can be accurately evaluated in order to reduce the mistake from misinterpretation of the inspection.

## สารบัญ

บทที่	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ญ
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในโครงการวิจัย	4
2.1.1 การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง	4
2.1.2 การส่งผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงความถี่สูง	5
2.1.3 ชนิดของคลื่นเสียง	5
2.1.4 ลักษณะทางกายภาพของลำคลื่น	6
2.1.5 การแสดงผลการตรวจสอบ	6
2.1.6 การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง	8
2.1.7 การเปลี่ยนโหมดของคลื่น	13
2.1.8 การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส	15
2.1.9 อิทธิพลของความร้อนต่อโลหะวิทยางานเชื่อม	15
2.1.10 เส้นโค้งชดเชยพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากกระยะทาง (DAC curve)	16
2.1.11 Time-Corrected Gain: TCG	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	19

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
<b>3</b> ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ	22
3.3 วิธีการทดลอง	24
3.4 การทดสอบโครงสร้างของวัสดุ และการวัดขนาดเกรน	29
3.5 การทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานเชื่อม	29
<b>4</b> อภิปรายผล	31
4.1 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค	31
4.2 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดขนาดเกรน	31
4.3 ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน	34
4.4 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างต่อค่าการลดทอนในการสร้างเส้นโค้งชดเชยค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง	35
4.4.1 การลดทอนของเส้น DAC ที่ความถี่ 2.25 เมกกะเฮิร์ตซ์	35
4.4.2 การลดทอนของเส้น DAC ที่ความถี่ 5 เมกกะเฮิร์ตซ์	35
4.4.3 การลดทอนของ TCG	36
4.5 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น DAC และ TCG	37
4.5.1 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น DAC	37
4.5.2 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น TCG	41
<b>5</b> สรุปและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	61

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงในวัสดุ	10
3.1	คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516	20
3.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516	20
3.3	คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316	21
3.4	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316	21
3.5	ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E7016	21
3.6	ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E309L	21
3.7	ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม TG-S50	22
3.8	ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม TG-S309	22
3.9	ข้อมูลหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง	22
3.10	ข้อมูลขู (Wedge) สำหรับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง	22
3.11	ข้อมูลหัวตรวจสอบหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	23
3.12	ข้อมูลขู (Wedge) สำหรับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	23
3.13	ตัวแปรการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	26
3.14	ตัวแปรการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน	26
3.15	ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 ต่อกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516	27
3.16	ตัวแปรการเชื่อม สำหรับสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์	28
3.17	ตัวแปรการเชื่อม สำหรับการสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุน	29
4.1	การทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดเกรนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน	32
4.2	การทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดเกรนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม	33
4.3	การทดสอบโครงสร้างจุลภาค	34
4.4	ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 5 MHz	38
4.5	ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 2 MHz	39
4.6	ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 5 MHz	40

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 2 MHz	41
4.8 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	42
4.9 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	43
4.10 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดด้านเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	43
4.11 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดด้านเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	44
ก.1 รายงานผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยเส้น DAC สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง	49
ข.1 รายงานผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องด้วย TCG สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส	61



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	6
2.5	7
2.6	7
2.7	8
2.8	8
2.9	10
2.10	13
2.11	13
2.12	14
2.13	14
2.14	16
2.15	16
2.16	16
2.17	17
2.18	17
2.19	19
3.1	23
3.2	24
3.3	24
3.4	24
3.5	25
3.6	25

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับสร้างชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ภายใน	25
3.8 ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	26
3.9 ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน	27
3.10 ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน	27
3.11 การจำลองรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์	28
3.12 ตำแหน่งและรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 2.5 มิลลิเมตร	29
4.1 โครงสร้างมหภาค ก. ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ข. ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิด ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน ค. ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน	31
4.2 การลดทอนสัญญาณจากการสร้างเส้น DAC โดยใช้หัวตรวจสอบความถี่ 5 เมกกะ เฮิรตซ์ ชิ้นงานที่ผ่านการอบ 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส	35
4.3 การลดทอนสัญญาณจากการสร้างเส้น DAC โดยใช้หัวตรวจสอบความถี่ 5 เมกกะ เฮิรตซ์ ชิ้นงานที่ผ่านการอบ 800 ถึง 1200 องศา เซลเซียส	35
4.4 การลดทอนสัญญาณจากการสร้าง TCG ของแต่ละชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1200 องศา เซลเซียส	36
4.5 เกณฑ์การพิจารณาเส้น DAC	37
4.6 การทดสอบชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงโดยใช้ เกณฑ์การตัดสินด้วยเส้น DAC ก. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 2.5 มิลลิเมตร ข. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 1.0 มิลลิเมตร และ ค. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายไม่สมบูรณ์	38
4.7 การทดสอบชิ้นงานด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟสโดยใช้เกณฑ์การ ตัดสินด้วย TCG ก. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 2.5 มิลลิเมตร ข. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 1.0 มิลลิเมตร และ ค. ทดสอบ รอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายไม่สมบูรณ์	42

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย  
(List of Abbreviations)

ASME	สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Mechanical Engineers)
ASME section V	ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section V Nondestructive Examination
ASTM A516	Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service
ASTM E112-46	Standard Test Methods for Determining Average Grain Size <sup>1</sup>
ASTM E1382	Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis
AWS A5.1	Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding
AWS A5.4	Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding
AWS A5.9	Welding Consumables-Wire Electrodes, Strip Electrodes, Wires, and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat Resisting Steels- Classification
AWS A5.18	Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding
DAC	เส้นโค้งชดเชยค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง (Distance Amplitude Correction curves)
GTAW	กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding)
HAZ	บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone)
PAUT	การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส (Phase Array Ultrasonic Testing)
RT	การทดสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic testing)
SMAW	กระบวนการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์

	(Shielded Metal Arc Welding)
TCG	การชดเชยระดับสัญญาณที่ลดลงจากการลดทอนเนื่องจากระยะเวลาทาง (Time-Corrected Gain)
UT	การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing)
$\mu m$	ไมโครเมตร
$\alpha_A$	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Absorption coefficient)
$\alpha_S$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง (Scattering coefficient)
$\alpha$	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน
MHz	เมกะเฮิร์ตซ์
SDH	รูเจาะด้านข้าง (Side drill hold)
kHz	กิโลเฮิร์ตซ์
V	ความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูง
$\lambda$	ความยาวคลื่นเสียงความถี่สูง
f	ความถี่คลื่นเสียงความถี่สูง
$\theta$	มุม
A	แอมพลิจูดของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ตำแหน่ง X
$A_0$	แอมพลิจูดของคลื่นเสียงความถี่สูงที่จุดเริ่มต้น (X=0)
$\rho$	ความหนาแน่นวัสดุ
Z	ความต้านทานเสียง
Cr Cd และ Cp	ค่าคงที่คุณสมบัติของวัสดุ
Ei	อัตราการผ่านตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง
%R	เปอร์เซ็นต์ที่คลื่นเสียงความถี่สูงสะท้อนกลับ
%T	เปอร์เซ็นต์ที่คลื่นเสียงความถี่สูงที่ส่งผ่านลงในเนื้อวัสดุ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

รอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ภายในชิ้นงานหรือรอยเชื่อม มักทำให้ความสามารถในการรับภาระกรรมที่มากกระทำกับชิ้นงานนั้น ๆ ลดลง ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดในการรับแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาระกรรมแรงดึง ปกติรอยความไม่ต่อเนื่องมีโอกาสเกิดขึ้นในบริเวณรอยเชื่อมตอของชิ้นงาน และเพื่อเป็นการทวนสอบความสมบูรณ์ของรอยต่อเชื่อม จำเป็นต้องใช้วิธีการทดสอบโดยไม่ทำลายช่วยคนหารอยความไม่ต่อเนื่อง เพราะวิธีการทดสอบโดยไม่ทำลาย เป็นวิธีการที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปและไม่ทำลายสภาพชิ้นงาน การทดสอบโดยไม่ทำลายที่ใช้ตรวจสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในชิ้นงานที่เป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เช่น การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic testing: UT) และการทดสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic testing: RT) ซึ่งการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง ใช้หลักการส่งพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง มักถูกกีดกันจากกระยะทาง การสะท้อนกลับหรือการกระเจิงของคลื่นเสียงความถี่สูงเมื่อคลื่นเสียงความถี่สูงนี้เดินทางผ่านรอยต่อระหว่างขอบเกรนของวัสดุแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกัน ทำให้บางครั้งไม่สามารถใช้ตรวจสอบชิ้นงานด้วยวิธีการทดสอบนี้ได้ เนื่องจากพลังงานคลื่นเสียงถูกกีดกันไปหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการทดสอบในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดในปัจจุบันวิธีการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องที่นิยมใช้กับงานเชื่อมโลหะต่างชนิด คือการทดสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ผู้ทดสอบไม่สามารถเข้าถึงบริเวณด้านหลังแนวเชื่อมเพื่อวางแผนฟลุมได้ ก็ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบโดยวิธีนี้ได้ ทำให้ต้องเปลี่ยนเป็นการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ซึ่งความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ภายในบริเวณรอยเชื่อมของโลหะต่างชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลกระทบจากความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนตำแหน่งของรอยความไม่ต่อเนื่อง การลดทอนของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากขนาดและทิศทางในการเรียงตัวของเกรน (เดนไดรท) การแทรกตัวของคาร์ไบด์เนื่องจากผลกระทบความร้อนในกระบวนการเชื่อม ชนิดของคลื่นเสียงความถี่สูง (คลื่นเสียงตามยาวและตามขวาง) ที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมด้วยการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2) เพื่อศึกษาผลกระทบของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายที่ส่งผลต่อความสามารถในการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) สร้างชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 อ้างอิงขนาดรอยความไม่ต่อเนื่องตามมาตรฐาน ASME section V ปี 2017
- 2) ออบชิ้นงาน (Base metal) เพื่อปรับให้มีขนาดเกรนต่างกัน ที่อุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้อัตราความร้อนคงที่จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา
- 3) เชื่อมชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) ถวดเชื่อม E7016 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร
- 4) เชื่อมชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ถวดเชื่อม 309L-16 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร
- 5) เชื่อมชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 ต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และถวดเชื่อม 309L-16 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร
- 6) สร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ทั้งสองด้านของแนวเชื่อมชิ้นงานและเจาะรู เพื่อจำลองรอยความไม่ต่อเนื่องบริเวณพื้นที่หลอมละลายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ทั้งด้านหัวและท้ายตามแนวเชื่อม
- 7) วิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM E1382
- 8) ใช้หัวตรวจสอบความถี่ 2.25 และ 5 MHz และมุมหัวตรวจสอบ 45 60 และ 70 องศา

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ศึกษาการสร้างชิ้นงานทดสอบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง โดยการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยปล่อยให้เย็นตัวในเตา และเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการอบ มาสร้างเส้น DAC และ TCG ตามมาตรฐาน ASME Section V ปี 2017 จากนั้นดำเนินการเชื่อมเหล็กต่างชนิดกัน ดังนี้

- 1) เชื่อมกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 ต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และถวดเชื่อม 309L-16

2) เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 ต่อกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กสวตเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และสวตเชื่อม E7016

3) เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 ต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กสวตเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และสวตเชื่อม 309L-16

จากนั้นสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ทั้งสองด้านของชิ้นงาน และสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดเจาะรูบริเวณพื้นที่หลอมละลายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ทั้งด้านหัวและท้ายของแนวเชื่อม เพื่อจำลองเป็นรอยความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเชื่อมบริเวณพื้นที่หลอมละลาย และดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 ชนิด วัดขนาดเกรนโดยใช้มาตรฐาน ASTM E1382 และทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องในวัสดุด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบปัจจัยหรือลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดกันโลหะต่างชนิดกันของเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2) ทราบถึงผลกระทบของแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดกันของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ส่งผลต่อความสามารถในทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง
- 3) สามารถเลือกใช้และปรับตั้งค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมได้
- 4) สามารถสร้างชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะต่างชนิดกัน สำหรับใช้ในการฝึกบุคลากร
- 5) ได้แนวทางการสร้างขั้นตอนการปฏิบัติงานการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องในวัสดุด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในโครงการวิจัย

##### 2.1.1 การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง

คลื่นเสียงความถี่สูงเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) จนถึง 25 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ในการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง ใช้หัวตรวจสอบ (Probe) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปของคลื่นเสียงและส่งคลื่นเสียงเข้าไปในวัตถุที่ทดสอบ เมื่อคลื่นเสียงสะท้อนกลับเข้ามาหัวตรวจสอบ หัวตรวจสอบจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของคลื่นเสียงกลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อแสดงผลต่อไป



รูปที่ 2.1 การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง

จากรูป 2.1 สัญญาณสะท้อนทางด้านซ้ายมือสุดของหน้าจอเครื่องมือ แสดงสัญญาณพัลส์เริ่มต้น (Initial Pulse : IP หรือ Main bang) ส่วนสัญญาณที่ปรากฏหลังสุดเป็นสัญญาณที่สะท้อนจากผิวด้านล่างของชิ้นงาน ในกรณีที่คลื่นเสียงความถี่สูงผ่านตัวกลางแล้วไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง ผลคือไม่มีสัญญาณปรากฏระหว่างพัลส์เริ่มต้น และสัญญาณที่สะท้อนกลับจากผิวด้านล่างของชิ้นงาน หากการตรวจสอบแล้วคลื่นเสียงความถี่สูงผ่านตัวกลาง แล้วพบรอยความไม่ต่อเนื่องสัญญาณจะปรากฏอยู่ระหว่างพัลส์เริ่มต้นและสัญญาณสะท้อนจากผิวด้านล่างของชิ้นงาน (อาษา ประทีปเสน, 2550)



### 2.1.2 การส่งผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงความถี่สูง

การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงที่นิยมคือวิธีพัลส์เอคโค (Pulse echo method) ซึ่งทำได้โดยการส่งคลื่นเสียงความถี่สูงเข้าไปในชิ้นงานทดสอบและวัดความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทดสอบ โดยการประเมินผลจากคลื่นเสียงความถี่สูงที่สะท้อนกลับจากบริเวณขอบเขต หรือบริเวณรอยความไม่ต่อเนื่อง แล้วใช้การประเมินผลโดยแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และมีค่าสองค่าที่สนใจ คือ เวลาที่คลื่นเสียงความถี่สูงเดินทางจากผิวไปจนถึงตัวสะท้อน (Reflector) แล้วเดินทางกลับและความแรงของสัญญาณสะท้อน ซึ่งเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางใช้แทนความลึกของตัวสะท้อน ส่วนความแรงของสัญญาณสะท้อนใช้แทนความสามารถในการสะท้อนของสิ่งที่ค้นพบ หรือกล่าวได้ว่าเป็นรอยความไม่ต่อเนื่องนั่นเอง

ความเร็วของคลื่นเสียง เนื่องจากความเร็วคลื่นเสียงแต่ละชนิด มีความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเสียง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = \lambda \times F \quad (1)$$

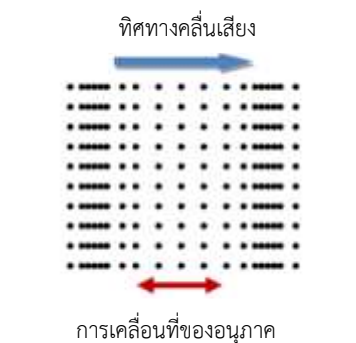
โดยที่  $V$  คือ ความเร็วคลื่นเสียง หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น หน่วยเป็นเมตร

$F$  คือ ความถี่ หน่วยเป็นครั้งต่อวินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

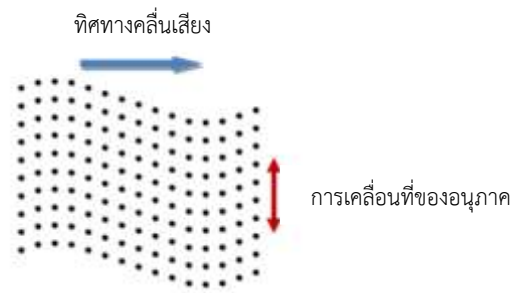
### 2.1.3 ชนิดของคลื่นเสียง (อาษา ประทีปเสน, 2550)

- 1) คลื่นเสียงตามยาว (Compression or Longitudinal waves) อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะคลื่นเสียงตามยาว

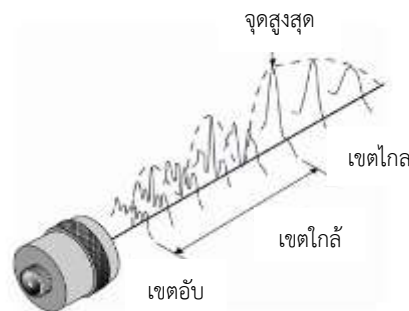
- 2) คลื่นเสียงตามขวาง (Transverse or Shear waves) อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง มีความเร็วประมาณเท่ากับ 0.5 เท่าของคลื่นเสียงตามยาว แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะคลื่นเสียงตามขวาง

#### 2.1.4 ลักษณะทางกายภาพของลำคลื่น (Beam physic) (อาษา ประทีปเสน, 2550)

การใช้เทคนิคพัลส์-เอคโค (Pulse-echo) ใช้หลักการปล่อยพัลส์ต่อเนื่องกันอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเป็นลำคลื่นต่อเนื่องเหมือนกับลำแสงที่ฉายออกจากไฟฉาย ส่วนประกอบของลำคลื่น ประกอบด้วยเขตอับ (Dead zone) เขตใกล้ (Near zone) และเขตไกล (Far zone) แสดงดังรูปที่ 2.4

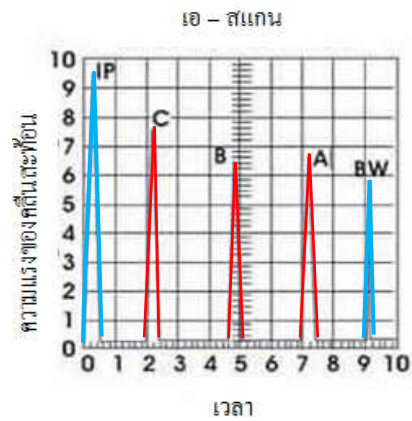


รูปที่ 2.4 ลักษณะของลำคลื่นเสียงความถี่สูง

#### 2.1.5 การแสดงผลการตรวจสอบ (อาษา ประทีปเสน, 2550)

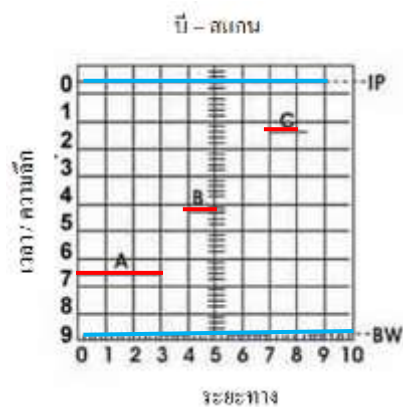
การตรวจสอบด้วย Pulse Echo สามารถแสดงผลได้ 3 แบบดังนี้

- 1) เอ-สแกน (A-Scan) การแสดงผล สำหรับหาดำหนึภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาชนิด ขนาด และตำแหน่งของตำหนิได้ โดยที่เอ-สแกน แสดงผล 2 แกนระหว่าง แกนนอนแสดงถึง เวลา และแกนตั้งแสดงถึงความแรงของคลื่นสะท้อนจากตำหนิ แสดงดังรูปที่ 2.5



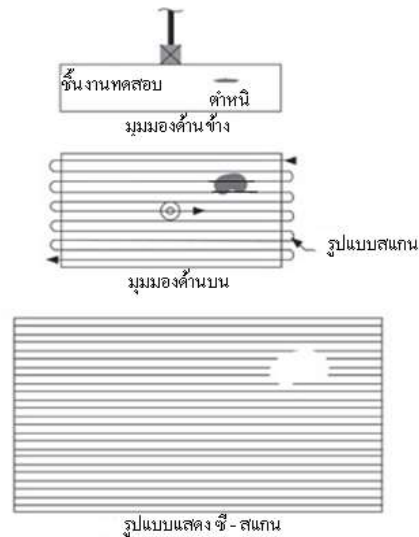
รูปที่ 2.5 ลักษณะสัญญาณตรวจสอบแบบ เอ-สแกน

- 2) บี-สแกน (B-Scan) เป็นการแสดงผลระหว่าง แนวตั้ง คือแกนของเวลา ซึ่งแสดงถึงความลึกของตำหนิ กับแนวนอน คือแกนของระยะทางที่ตั้งฉากกับเวลา แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะสัญญาณตรวจสอบแบบ บี-สแกน

- 3) ซี-สแกน (C-Scan) การแสดงผลแบบนี้เหมือนกับการมองดูจากด้านบน (Top view) มีการบันทึกภาพในแนวระนาบ แสดงพื้นที่ของตำหนิ และตำแหน่งของตำหนิ ด้านความลึกของตำหนิไม่สามารถวัดได้จากจอภาพ และแสดงผลบนจอในลักษณะเส้นแรงเงา บริเวณที่ไม่มีเส้นแรงเงา คือพื้นที่ ที่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะสัญญาณตรวจสอบแบบ ซี-สแกน

#### 2.1.6 การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง (Sound attenuation) (อาษา ประทีปเสน, 2550)

การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง หมายถึง การที่เสียงมีพลังงานลดลงเมื่อเสียงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลาง การลดทอนของเสียงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 3 ประการ คือ

##### 1. การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากหัวตรวจสอบ

###### 1) มุมบาน (Beam divergent)

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกลางของหัวตรวจสอบ เป็นปัจจัยสำคัญของความโตของมุมบาน เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กให้มุมบานที่โตกว่า แสดงดังรูปที่ 2.8 ในการออกแบบหัวตรวจสอบ ออกแบบให้ค่าของครึ่งหนึ่งของมุมบานไม่เกิน 17 องศา หากมีค่ามากเกินไปส่งผลให้พลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงถูกทอนลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.8 มุมบานที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

จากค่าพลังงานที่มีการลดทอนตามขนาดของมุมบาน ( $2\theta$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของมุมบานได้จากสมการ 2 ถึง 4 เพื่อใช้ในการพิจารณาในการตรวจสอบและการเลือกใช้ให้เหมาะสม

ครึ่งของมุมบาน ( $\theta$ ) เป็นมุมระหว่างเส้นแนวกึ่งกลางของลำคลื่นกระทำกับเส้นขอบของลำคลื่น ดังสมการที่ 2

$$(\theta) = \sin^{-1} \frac{1.22 \nu}{D \times F} \quad (2)$$

เมื่อคิดมุมบานจากแนวกึ่งกลางของลำคลื่นถึงที่ขอบลำคลื่นตรงบริเวณที่ความดันลดลง 20 เดซิเบล ดังสมการที่ 3

$$(\theta) = \sin^{-1} \frac{1.08 \nu}{D \times F} \quad (3)$$

เมื่อคิดมุมบานจากแนวกึ่งกลางของลำคลื่นถึงที่ขอบลำคลื่นตรงบริเวณที่ความดันลดลง 6 เดซิเบล ดังสมการที่ 4

$$(\theta) = \sin^{-1} \frac{0.56 \nu}{D \times F} \quad (4)$$

## 2) ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ (Frequency)

การเลือกใช้ความถี่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความไวในการตรวจสอบ ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 5 และ สมการที่ 6 กล่าวคือเมื่อความยาวคลื่นมาก ความสามารถในการตรวจสอบรอยบ่งชี้ขนาดเล็กที่สุดหรือค่าความไวในการตรวจสอบมีค่าต่ำ การลดทอนมีค่าต่ำ เนื่องจากคลื่นเสียงไม่สะท้อนหรือถูกดูดกลืนไปตามขอบเกรนมาก เมื่อเทียบกลับความยาวคลื่นเสียงน้อย ค่าความไวในการตรวจสอบมีค่ามากกว่า แต่มีการลดทอนที่มากกว่า เนื่องจากคลื่นมีการตัดผ่านตามขอบเกรนมากกว่า

$$\lambda = \frac{\nu}{f} \quad (5)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

## 3) มุมที่ใช้ในการทดสอบ (Angle probe)

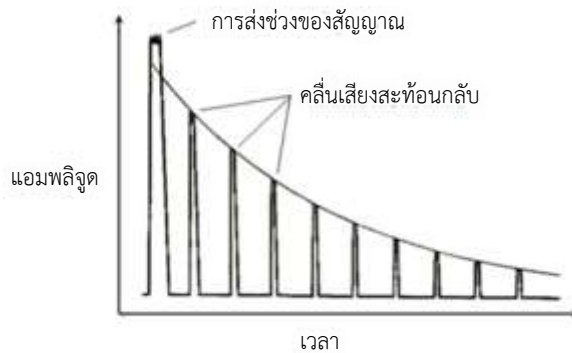
การเลือกมุมของหัวตรวจสอบมักมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาของชิ้นงาน ผู้ทดสอบควรทดสอบด้วยมุมตามค่าของมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบ ตัวอย่างการเลือกใช้มุมตามความหนาของชิ้นงานมีดังต่อไปนี้ (Ultrasonic inspection level 1&2 1993)

ความหนาของชิ้นงาน	มุมของหัวตรวจสอบ
6 – 15 มิลลิเมตร	60 หรือ 70 องศา
15 – 35 มิลลิเมตร	60 หรือ 45 องศา
มากกว่า 35 มิลลิเมตร	45 องศา

## 2. การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง

การเดินทางของคลื่นเสียงในตัวกลางระหว่างจุด 2 จุด เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scattering) หรือขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้น ๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่า การลดทอนพลังงานโดยคุณสมบัติของวัสดุกับระยะทาง แสดงดังสมการที่ 7 และรูปที่ 2.9

$$\text{Attenuation} = \frac{\text{Amplitude}}{\text{Distance}} \quad (7)$$



รูปที่ 2.9 การลดทอนของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเทียบกับระยะทางและแอมพลิจูด

### 1) การดูดซับคลื่นเสียงความถี่สูง (Absorption law of ultrasonic wave)

องค์ประกอบในการลดทอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นพลังงานประเภทอื่น ๆ เช่น พลังงานความร้อนหรือแนวำพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงที่ส่งผ่านตัวกลางมีค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงลดลงเมื่อระยะทางของเพิ่มขึ้น สามารถแสดงดังสมการที่ 8

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (8)$$

$A_x$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ตำแหน่ง X

$A_0$  คือ แอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่จุดเริ่มต้น ( $X=0$ )

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงาน (เนเปอร์ (Neper) / ระยะทาง )

สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 9

$$\alpha = f \left( \frac{f^2}{V^3 \rho} \right) \quad (9)$$

$f$  คือความถี่ (รอบต่อวินาที หรือ เฮิรตซ์)

$V$  คือความเร็ว (เมตร/วินาที)

$\rho$  คือความหนาแน่นวัสดุ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

2) ความต้านทานเสียง (Acoustic impedance)

ในวัสดุที่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นได้ดีและคลื่นตามยาวนั้นเท่ากับค่าความเร็วของเสียงและความหนาแน่น สามารถคำนวณหาความต้านทานเสียง จากสมการที่ 10

$$Z = \rho V \quad (10)$$

$Z$  คือความต้านทานเสียง (กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup> × 10<sup>6</sup>)

$\rho$  คือความหนาแน่นของวัสดุ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$V$  คือความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุ (เมตร/วินาที) โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงในวัสดุ (P. J. hull, 2002)

Material	Density Kg / m <sup>3</sup>	Velocity m / s		Elastic modulus  10 <sup>6</sup> Pa	Shear modulus  10 <sup>6</sup> Pa	Acoustical impedance 10 <sup>3</sup> Pa . s / m	
		LW	TW			LW	TW
Steel	7800	5920	3250	213320	82916	46760	25350
Air	1	333				0.333	
Ethylc Alcohol	789	1170				923	
Aluminium	2700	6320	3130	70758	26452	17064	8451
Araldite	1200	2500				3000	
Silver	10500	3600	1590	73202	26545	37800	16695
Cadmium	8600	2780	1500	50103	19350	23908	12900
Rubber	910	1479				1345	
Rubber(artificial)	1200	2300				2760	
Copper	8900	4700	2260	122701	45458	41830	20114
Water	1000	1483				1483	
Pewter	7300	3320	1670	54181	20359	24236	12191
Grey cast-iron	7200	4600	2650	126570	50562	33120	19081
White cast-iron e	6900	3500	2200	78375	33396	24150	15180
Ice	910	3980	1990			3621	1811
Glycerine	1300	1920				2496	
Oil	870	1740				1514	
Brass	8100	4430	2120	98400	36405	35883	17172
Magnesium	1700	5570	3050	41311	15814	9809	5950
Manganese	7300	4660	2350			34018	17155
Mercure	13600	1450				19720	
Nickel	8800	5630	2960	201852	77102	49544	26048
Gold	19300	3240	1200	78958	27792	62532	23160
Platinum	21400	3960	1670	166137	59682	84744	35738
Plexiglas	1180	2730	1430	6327	2413	3221	1687
Lead	11400	2160	700	16102	5586	24624	5980
Hard PVC	1400	3295	1060	4336	1573	3353	1484
Quartz	2650	5760				15264	
Lithium Sulfate	2060	4720				9723	
Baryum Titanate	5700	4400				25080	
Titanium	4540	6070	3310			27315	15027
Glass	3600	4260	2560	57443	23593	15336	9216
Zinc	7100	4170	2410	103031	41238	29607	17011

### 3. การลดทอนพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากเนื้อวัสดุ

#### 1) การกระเจิงและการกระจายตัว (Scattering and diffraction)

การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงความถี่สูงในตัวกลางที่มีสภาพทางโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องหรือไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) เช่น ขอบเกรน (Grain boundary) และสิ่งแปลกปลอม ทำให้คลื่นเสียงความถี่สูงเกิดการสะท้อนไปทุกทิศทาง พลังงานของคลื่นเสียงความถี่สูงเหล่านั้นแผ่ขยายไปอยู่ตามที่ว่างหรือรวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า การกระเจิง (Scattering) สำหรับคลื่นเสียงที่เดินทางไปเจอขอบ มุม หรือร่อง ส่งผลให้คลื่นเสียงความถี่สูงเกิดการเบี่ยงเบนโค้งงอและแยกตัว (Diffracted) ลงไปในรอยแยกเหล่านั้น การกระเจิงและการแยกตัวของคลื่นเสียงทำให้แอมพลิจูด (Amplitude) ของคลื่นลดลงซึ่งยากต่อการคำนวณการลดทอนของคลื่นต้องใช้ทักษะจากการศึกษาและการทดลองจริง (B. Chassignole, 2009) เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านรอยต่อระหว่างเกรนทำให้คลื่นเสียงเกิดการสะท้อนกลับและหักเห ซึ่งก็คือการลดทอนพลังงานของคลื่นเสียงโดยที่สัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\alpha$ ) มีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นเสียง ( $\lambda$ ) ขนาดของเกรน (D) และ  $C_r$ ,  $C_d$  และ  $C_p$  คือ ค่าคงที่คุณสมบัติของวัสดุ ดังสมการที่ 11 ถึง 13

$$\text{กรณี } \lambda > D \quad \alpha_r = C_r D^3 f^4 \quad (11)$$

$$\text{กรณี } \lambda \approx D \quad \alpha_p = C_p D f^2 \quad (12)$$

$$\text{กรณี } \lambda \leq D \quad \alpha_d = \frac{C_d}{D} \quad (13)$$

#### 2) ผลกระทบของคลื่นเสียงความถี่สูงต่อขนาดเกรน

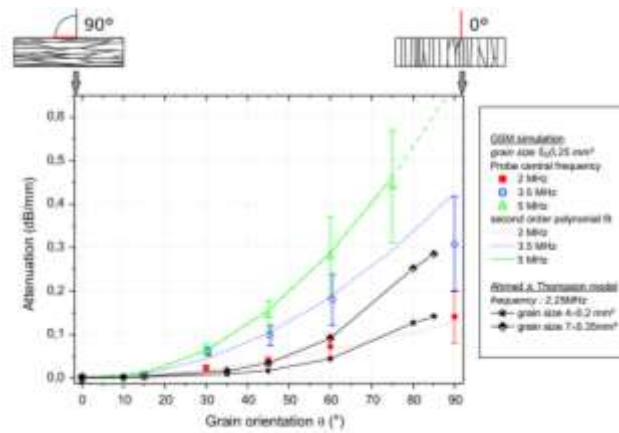
จากงานวิจัยเรื่อง Microstructural and ultrasonic characterization of 2101 lean duplex stainless steel welded joint (R. Alberto, 2017) พบว่าภายในเนื้อโลหะ อนุภาคของเหล็กเป็นการจับตัวเข้าด้วยกันของเกรน หากเกรนภายในเนื้อโลหะมีขนาดใหญ่ ทำให้มีผลกระทบต่อคลื่นเสียงความถี่สูงที่ส่งเข้าไปในเนื้อวัสดุ ซึ่งเกิดการสะท้อนของคลื่นเสียงตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนหรือขอบเกรน มีผลทำให้คลื่นเสียงความถี่สูงมีการกระเจิงและอ่อนกำลังลง การกระเจิงของคลื่นเสียงความถี่สูงตรงบริเวณรอยต่อของขอบเกรนเรียกว่า การลดทอนจากการกระเจิง (Attenuation by Scattering) ซึ่งสามารถปรากฏเป็นคลื่นสะท้อนบนหน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดได้

#### 3) การจัดเรียงตัวของเกรน

จากงานวิจัยเรื่อง Investigation of the ultrasonic attenuation in anisotropic weld materials with finite element modeling and grain-scale material description (P.E. Lhuillier, 2017) พบว่า การจัดเรียงตัวของเกรนส่งผลต่อการลดทอน เมื่อเกรนทำมุม 90 องศา การ

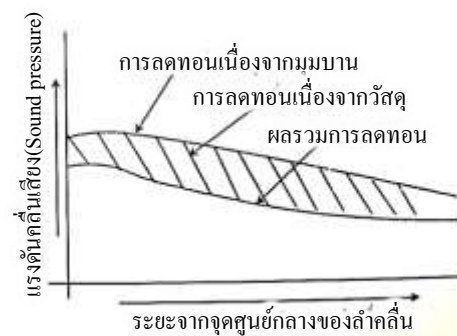


ลดทอนเกิดขึ้นมากเนื่องจากเกรนขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง แต่ในกรณีที่เกรนทำมุม 0 องศากับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง จะทำให้เกิดการขวางการเคลื่อนที่น้อยกว่า ส่งผลให้การลดทอนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ามุมอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การลดทอนที่เกิดเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของเกรน (P. E. Lhuillier, 2017)

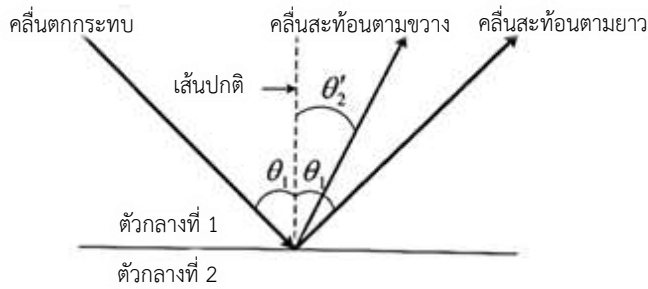
จากการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า การกระเจิงเนื่องจากคลื่นเสียงความถี่สูงเคลื่อนที่ผ่านเกรนและการสะท้อนที่ขอบของเกรน แสดงดังรูปที่ 2.11 กราฟเส้นด้านบนแสดงการลดลงของพลังงานเนื่องจากมุมบาน ส่วนกราฟด้านล่างแสดงผลรวมของการลดทอนของมุมบานและจากวัสดุ โดยพื้นที่ที่แรเงาคือพลังงานที่ลดทอนจากวัสดุ (อาษา ประทีปเสน, 2550)



รูปที่ 2.11 การลดลงของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเทียบกับระยะทาง

### 2.1.7 การเปลี่ยนโหมดของคลื่น (Mode conversion)

เมื่อคลื่นตกกระทบบที่บริเวณผิวระหว่างตัวกลาง 2 ตัวกลาง คลื่นเกิดการสะท้อนและการส่งผ่าน ในกรณีที่คลื่นเสียงตกกระทบบกับเส้นแบ่งระหว่างตัวกลางทั้งสอง ไม่เป็นมุม 90 องศาหรือไม่ตั้งฉากกับผิว คลื่นเกิดการเปลี่ยนโหมดด้วย กล่าวคือเมื่อคลื่นตกกระทบบที่ผิวจะมีคลื่นสะท้อนออกมา 2 ชนิด คือ คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การตกกระทบของคลื่นตามยาว

จากการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูง หากตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คลื่นเสียงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับ และอีกส่วนหนึ่งเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เพื่อให้เห็นปฏิกิริยานี้ได้ชัดเป็นเชิงตัวเลข ใช้ค่าความต้านทานเสียง (Acoustic impedance) เป็นตัวชี้บ่ง ในส่วนของอัตราการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$E_i = E_r + E_t \tag{14}$$

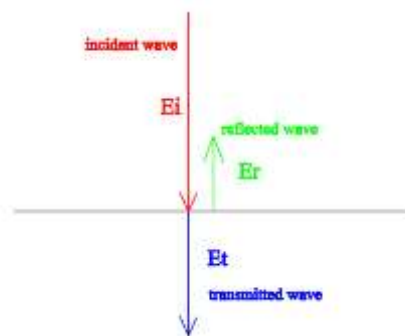
ในการหาเปอร์เซ็นต์ที่เสียงสะท้อนกลับ คำนวณได้จากสมการที่ 15 (อาษา ประทีปเสน, 2550)

$$\%R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \times 100 \tag{15}$$

ในการหาเปอร์เซ็นต์ที่เสียงที่ส่งผ่านลงในเนื้อวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ 16 (อาษา ประทีปเสน, 2550)

$$\%T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \times 100 \tag{16}$$

เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ที่เสียงสะท้อนกลับมารวมกับเปอร์เซ็นต์ที่เสียงส่งผ่านลงไปเนื้อวัสดุ มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ สามารถแสดงอัตราการผ่านตัวกลางของคลื่นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อัตราการให้ผ่านของตัวกลางการเคลื่อนที่ของคลื่น

### 2.1.8 การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส (PAUT)

คลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจหารอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงาน เช่น รอยแตกและรอยร้าว และสามารถนำไปปรับใช้สำหรับการตรวจสอบงานเชื่อม การวัดความหนา การตรวจสอบการกัดกร่อน ระบบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟสใช้หัวตรวจสอบที่มีผลึกหลายผลึก โดยมีการส่งคลื่นเสียงในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งควบคุมเวลาด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากการที่หัวตรวจสอบแบบจัดเรียงเฟส ประกอบไปด้วยหลายผลึก โดยแต่ละผลึกจะทำหน้าที่ส่งและรับคลื่นเสียง ซึ่งคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ไปจะมีลักษณะเป็นระนาบ (Wave front) มีข้อดีกว่าหัวตรวจสอบผลึกเดี่ยวคือ ทำงานได้เร็วกว่า ไม่ต้องสแกนหัวตรวจสอบหลายครั้งในขณะที่ตรวจสอบรอยเชื่อม เพราะหัวตรวจสอบครอบคลุมพื้นที่รอยเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบในการสแกนเพียงครั้งเดียว

การตรวจสอบด้วยหัวตรวจสอบแบบจัดเรียงเฟส สามารถแสดงผลการตรวจสอบแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยมีการแสดงตำแหน่งรอยความไม่ต่อเนื่องที่ตรวจพบ นอกจากนี้ยังสามารถปรับมุมและจุดโฟกัสของคลื่นเสียงความถี่สูงแต่ละผลึกได้

### 2.1.9 อิทธิพลของความร้อนต่อโลหะวิทยางานเชื่อม

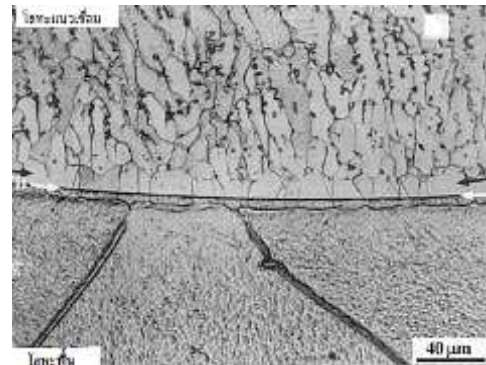
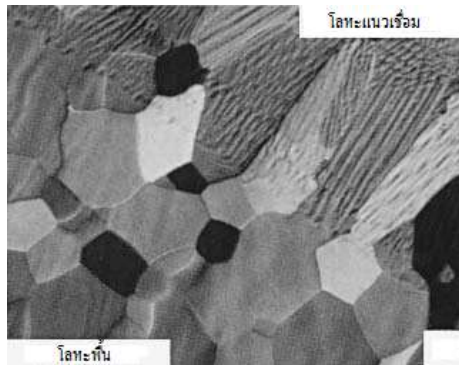
#### 1) อิทธิพลของความร้อนต่อโครงสร้างวัสดุ

ความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะตรงรอยต่อของชิ้นงาน และส่งผลต่อโครงสร้างของโลหะชิ้นงานที่อยู่ใกล้กับบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมอาร์กมีปริมาณสูงมาก ถ่ายเทลงบนโลหะงานที่ต้องการเชื่อม โดยที่ความร้อนจะเคลื่อนที่บนชิ้นงานจากบริเวณหลอมเหลว (Fusion zone) ไปสู่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ลักษณะและปริมาณความร้อนที่ถูกดึงออกไป ส่งผลต่อลักษณะของการแข็งตัว (Solidification) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟส (Phase transformation) ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน โครงสร้างที่ต่างกันนี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลเป็นอย่างมาก โครงสร้างที่แตกต่างกันมีผลต่อแนวโน้มการเกิดความเสียหายลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น การเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย การที่มีอัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้นนั้นส่งผลทำให้ได้โครงสร้างที่ไม่ได้อยู่สถานะสมดุล คือ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นโครงสร้างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) และเกิดขึ้นโดยไม่อาศัยกลไกการแพร่ และไม่มีอะตอมใดที่มีการเคลื่อนที่มากกว่า 1 แลตติส เป็นโครงสร้างที่ไม่พึงประสงค์ในงานเชื่อม โครงสร้างนี้มักขึ้นอยู่กับขนาดเกรน ส่วนผสมทางเคมี ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability)

#### 2) การเกิดโครงสร้างเกรนบริเวณแนวเชื่อม (S. Kou, 2003)

การเริ่มต้นการแข็งตัวเริ่มจากการเกิดนิวเคลียสตกผลึกและขยายตัวประกอบกันเป็นเกรน ซึ่งในกรณีของการเชื่อมจะเกิดขึ้นตรงบริเวณขอบของแนวเชื่อม (Fusion boundary) บริเวณผิวของโลหะพื้น (Base metal) ที่บริเวณขอบแนวเชื่อมจะเป็นจุดที่เกิดนิวเคลียส โดยลักษณะการตกผลึกของเกรนที่เกิดขึ้นใหม่ มีทิศทางสอดคล้องกับเกรนเดิมของบริเวณโลหะพื้น ซึ่งถูกเรียกว่า Epitaxial growth แสดงดังรูป

ที่ 2.14 แต่ในกรณีที่มีการเชื่อมของวัสดุต่างกัน คือโครงสร้างผลึกของโลหะแนวเชื่อมกับโครงสร้างของโลหะพื้นต่างชนิดกัน ลักษณะการตกผลึกที่บริเวณผิวโลหะพื้นจะมีการเกิดแบบสุ่มไม่สอดคล้องกับลักษณะของเกรนเดิม ซึ่งเรียกว่า Nonepitaxial growth แสดงดังรูปที่ 2.15

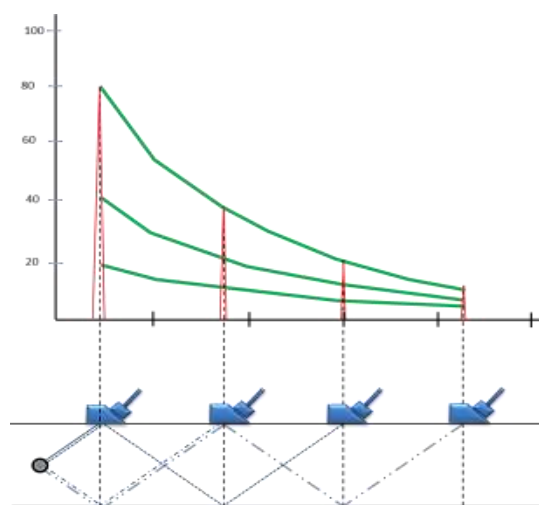


รูปที่ 2.14 Epitaxial Growth ของการเชื่อม

รูปที่ 2.15 Nonepitaxial Growth ของโลหะพื้น

#### 2.1.10 เส้นโค้งชดเชยพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทาง (DAC curve)

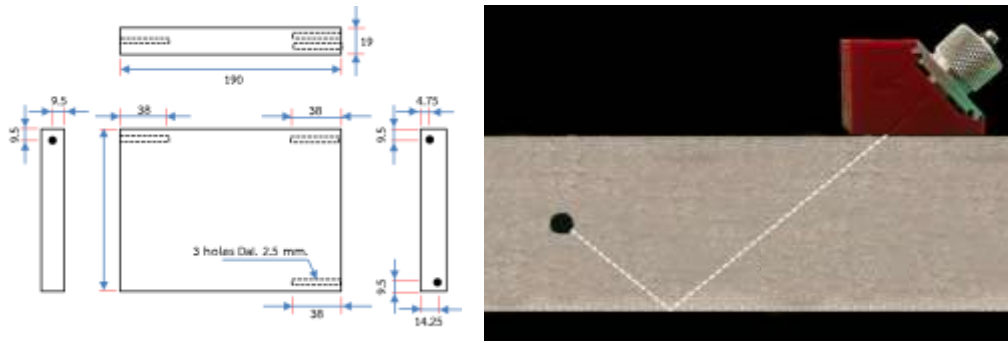
เส้น DAC curve ใช้เปรียบเทียบรอยบ่งชี้ที่ตรวจพบเพื่อแปลผลปฏิเสหรือยอมรับ เนื่องจากที่รอยความไม่ต่อเนื่องเดียวกัน แต่ระยะทางต่างกันของคลื่นขาที่ 1 2 3 และ 4 จะให้ค่าระดับสัญญาณต่างกันซึ่งจะมีค่าลดลง ดังนั้นการกำหนดเส้นอ้างอิงเป็นเกณฑ์สำหรับวัดผลรอยความไม่ต่อเนื่องที่ครอบคลุมทุกระยะของคลื่น ขั้นตอนการสร้างถูกอ้างอิงจาก ASME Section V article 4 ซึ่งขั้นตอนการสร้างจะอ้างอิงระดับสัญญาณจากรูเจาะด้านข้าง (Side Drill Hold : SDH) ขนาด 2.5 มิลลิเมตร และใช้ระดับแอมพลิจูดสูง 80 เปอร์เซ็นต์ ( $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์) ของหน้าจอ กำหนดจุดดังกล่าวเป็นจุดอ้างอิงของสัญญาณแรก แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วิธีการสร้างเส้น DAC

1) เจ็อนไขการสร้างชิ้นงานสำหรับเส้น DAC

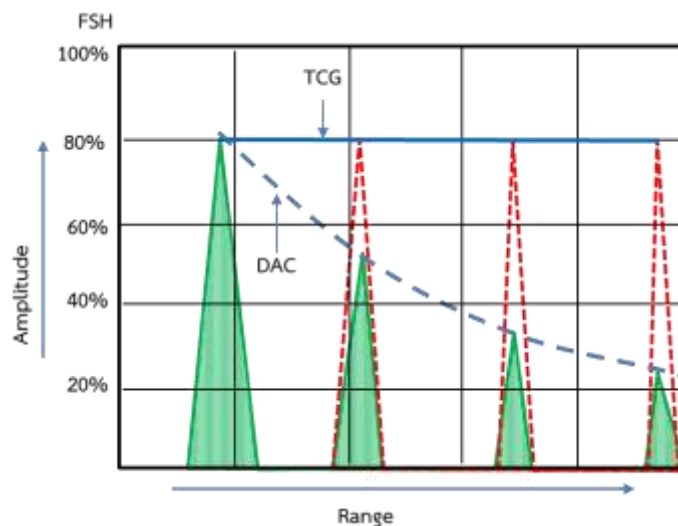
ใช้วัสดุเดียวกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยความหนาที่ใช้ให้เหมือนหรือครอบคลุมความหนาชิ้นงานทดสอบ เจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร ลึก 38 มิลลิเมตร ที่ระยะ 1/4 1/2 และ 3/4 ของความหนาชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.17 (ASME section V article 4, 2017)



รูปที่ 2.17 ขนาดชิ้นงานสำหรับการสร้างเส้น DAC

2.1.11 Time-Corrected Gain: TCG

เป็นวิธีการชดเชยระดับสัญญาณที่ลดลงจากการลดทอนเนื่องจากระยะทาง โดยการเพิ่มอัตราขยาย (Gain) จากการชดเชยระบบเวลาเพื่อให้ระดับสัญญาณที่สะท้อนจากตัวอ้างอิงเดียวกันในทุกระยะการทดสอบต้องแสดงผลระดับสัญญาณที่เท่ากัน และวิธีการชดเชย TCG นี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานเช่นเดียวกับเส้น DAC แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่าง DAC และ TCG

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำคลื่นเสียงความถี่สูงมาใช้ในการในการทดสอบแนวเชื่อมที่ต่างชนิดกันโดยใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 เชื่อมต่อกับเหล็กกล้าอัลลอยด์ (2.25Cr-1M) แต่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกันโดยตรง โดยมีการนำวัสดุเหล็กเจือปนนิเกิล (Alloy800) มาเชื่อมรองชั้นกลางเพื่อลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นเสียง ค่าความต้านทานเสียง การลดทอนทั้ง 3 วัสดุ และ 2 แนวเชื่อม (J. H. Smith, 1979) เนื่องจากโครงสร้างของแนวเชื่อมที่เป็นเฟสออสเทนไนท์ประกอบด้วยเดนไดรต์ ที่เกิดจากการวางตัวหรือทิศทางของเดนไดรต์ (Anisotropic) ในแนวเชื่อมซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) และส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงความถี่สูง ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมสำหรับการจำลองและพัฒนาเครื่องมือในการทดสอบเพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น (S. Pudovikov, 2008, B. Chassignole, 2015, J. Moysan, 2009) และได้มีการศึกษาอิทธิพลของขนาดเกรนของวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วและการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง (A. BadidiBouda, 2003)

P.E. Lhuillier ศึกษาการจำลองหาค่าการลดทอนของคลื่นในการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง โดยจำลองผ่านโปรแกรม ATHENA 2D ทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไข การเรียงตัวของเกรนขนาดเกรน ความถี่ในการตรวจสอบ และระดับของ Isotropy โดยพิจารณาจาก 2 วัสดุเชื่อมต่อกัน ได้แก่ Ni base alloy และ Austenitic 316L Stainless (P. E. Lhuillier, 2017)

A. Ruiz และคณะวิจัย ทำการศึกษารอยต่อของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองเหลี่ยม 2101 (DSS) และวัดการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง โดยชิ้นงานทั้งสองแผ่นถูกเชื่อมโดยใช้การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซปกคลุม (GMAW) การวัดการลดทอนได้กระทำโดยใช้เทคนิคการวัดค่าคลื่นเสียงพัลส์ของคลื่นเสียงความถี่สูงโดยใช้เครื่องสแกนเนอร์ x, y, z ความแม่นยำสูงในการสร้างภาพ (C-scan) ของตัวอย่างที่เชื่อม การทดลองแสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นของคลื่นเสียงความถี่สูงได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากการตกผลึกของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการเชื่อมแบบหลายจุด (A. Ruiz, 2017)

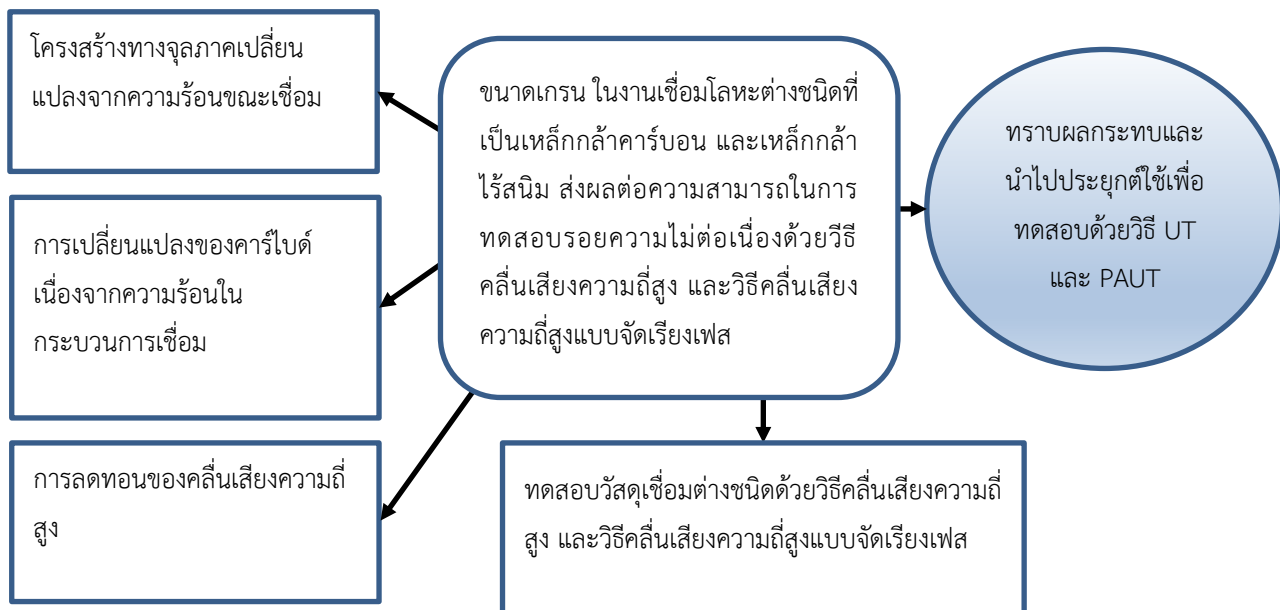
F. Shahid และคณะวิจัยได้ทำการศึกษาระบบการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะชนิดเดียวกันและต่างชนิด ซึ่งในการเชื่อมโลหะต่างชนิด พบว่าโลหะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ในระหว่างขั้นตอนการเชื่อม ทำให้สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกันด้วย โดยที่ตัวแปรงานเชื่อม เช่น กระแสเชื่อม และแรงดันในการเชื่อม ส่งผลต่อโครงสร้างหรือส่วนประกอบของโครงสร้างในโลหะนั้น ๆ เมื่อโลหะได้รับปริมาณความร้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้มีโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งบางโครงสร้างไวต่อการแตกร้าว หรืออาจมีความเสี่ยงสูงต่อการแตกร้าว รวมถึงการเกิดปัญหาสารประกอบของโครงสร้างจุลภาคระหว่างโลหะสองชนิดที่เกิดขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรอยเชื่อม (F. Shahid, 2015)

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยที่ปรากฏโดยทั่วไปยังไม่ครอบคลุมถึงการศึกษาความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมหรือเนื้อเชื่อมของโลหะต่างชนิดกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ภายในบริเวณรอยเชื่อมของโลหะต่างชนิด โดยได้ศึกษาผลกระทบจากความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงที่อาจส่งผลกระทบต่อการระบุตำแหน่งของรอยความไม่ต่อเนื่อง

การลดทอนของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากขนาดและทิศทางในการเรียงตัวของเกรน (เดนไดรท์) การแทรกตัวของคาร์ไบด์เนื่องจากผลกระทบความร้อนในกระบวนการเชื่อม (คลื่นเสียงตามยาวและตามขวาง) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมด้วยการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และคลื่นเสียงความถี่สูงแบบจัดเรียงเฟส (Phased array ultrasonic testing :PAUT)

### 2.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

แนวคิดของโครงการวิจัยสามารถอธิบายดังแผนผังในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนผังกรอบแนวคิด

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นอธิบายผลกระทบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากระยะทางในการตรวจสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงและวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส ศึกษาและปรับปรุงวิธีการสร้างเส้น DAC และ TCG สำหรับประกอบการตัดสินใจ ในการปฏิเสธหรือยอมรับรอยความไม่ต่อเนื่อง ให้มีความถูกต้องและมีความแม่นยำสำหรับการทำงานในภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และวิธีการทดลองต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กแผ่นตามข้อกำหนดของ ASTM A516 มีคุณสมบัติทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516

Classifications		Chemical Compositions (ladle analysis)										
		C (max.)	Si (max.)	Mn	P (max.)	S (max.)	Carbon Equivalent % (max.)	Sensitivity of welding crack % (max.)	Nb	V	Mo	Cu (min.)
ASTM	A516	0.10- 0.22	0.6	1- 1.7	0.03	0.03	-	-	0.01	0.02	0.08	0.03

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516

Type of Product	Classifications		Mechanical Properties							
			Yield Point N/mm <sup>2</sup> (min.)		tensile Strength N/mm <sup>2</sup>	Yield Ratio % (max.)	Elongation % (min.)			Impact J (Min.)
			Thickness				Thickness	Thickness		
			t ≤ 16	16 ≤ t ≤ 16	t ≥ 12	t ≤ 5		5 < t ≤ 16	t >16	t >12
Structural Steel	ASTM	A516	485-620		260	-	21			-

วัสดุแผ่นตามข้อกำหนดของ AISI 316 มีคุณสมบัติทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.3 และมีคุณสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 3.4 ตามลำดับ



**ตารางที่ 3.3** คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

Classifications		Chemical Compositions (ladle analysis)										
		C (max.)	Si (max.)	Mn	P (max.)	S (max.)	Carbon Equivalent % (max.)	Sensitivity of welding crack % (max.)	Ni	V	Mo	Cr
AISI	A316	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	-	-	10.0- 14.0	-	2.0- 3.0	16.0 - 18.0

**ตารางที่ 3.4** คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

Type of Product	Classifications		Mechanical Properties							
			Yield Point N/mm <sup>2</sup> (min.)		tensile Strength N/mm <sup>2</sup>	Yield Ratio % (max.)	Elongation % (min.)			Impact J (Min.)
			Thickness				Thickness	Thickness		
			t ≤ 16	16 ≤ t ≤ 16	t ≥ 12	t ≤ 5		5 < t ≤ 16	t >16	
Structural Steel	AISI	A316	290		520	-	55			-

ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับการทดลองมีทั้งหมด 4 ประเภท ประกอบด้วย

1) AWS A5.1 E7016 ยี่ห้อ KOBE LH-2000 มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.5

**ตารางที่ 3.5** ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E7016 (<https://www.udo.co.th>)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.08	0.64	1.15	0.14	0.008	-	-	-	-

2) AWS A5.4 E309L ยี่ห้อ KOBE NC-39L มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.6

**ตารางที่ 3.6** ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E309L (<https://www.udo.co.th>)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.03	0.60	1.50	0.02	0.005	12.50	23.13	-	-

3) AWS A5.18 ER70S-G ยี่ห้อ KOBE TG-S50 มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม TG-S50 (<https://www.udo.co.th>)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.09	0.88	1.45	0.012	0.010	-	-	-	-

4) AWS A5.9 ER309L ยี่ห้อ KOBE TG-S309 มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม TG-S309 (<https://www.udo.co.th>)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.016	0.41	1.84	0.019	0.002	13.68	23.28	0.03	0.04

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

- 1) เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น EPOCH 650 หัวตรวจสอบที่ใช้มี 2 ความถี่ คือ 2.25 และ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ มุมในการทดสอบ 3 มุม คือ 45 60 และ 70 องศา ซึ่งมีรายละเอียด แสดงดังตารางที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

ชนิดหัวตรวจสอบ (Probe type)	Ultrasonic
ยี่ห้อ (Probe manufacturer)	OLYMPUS
รุ่น (Probe model)	A541S-SM / A540S-SM
Serial No. หัวตรวจสอบ	U8431028/1072998 / U8431029/1073202
ความถี่หัวตรวจสอบ (Probe frequency)	2.25 / 5 MHz
Serial No. สายสัญญาณ	U8800189

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลชู (Wedge) สำหรับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

ยี่ห้อ (Probe manufacturer)	OLYMPUS
ชนิด (Type)	มุมเอียง
รุ่น (Model)	Panametrics ABWM-5T 45, 60, 70
มุมหัวตรวจสอบ (Beam angle)	45, 60, 70 องศา

เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงพร้อมอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

- 2) เครื่องทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟสยี่ห้อ Proceq รุ่น Flaw Detector 100 (FD100) ผลิตจากประเทศสวีตเซอร์แลนด์ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยหัวตรวจสอบที่ใช้มีความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และซุที่ใช้ในการทดสอบ มีรายละเอียด แสดงดังตารางที่ 3.11 และตารางที่ 3.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลหัวตรวจสอบหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

ชนิดหัวตรวจสอบ (Probe type)	Phased Array
ยี่ห้อ (Probe manufacturer)	Sonatest (ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา)
รุ่น (Probe model)	X2-PE0.5M16E0.6P
ความถี่หัวตรวจสอบ (Probe frequency)	5 MHz
จำนวนผลึก (Probe elements)	16 Elements

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลซุ (Wedge) สำหรับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

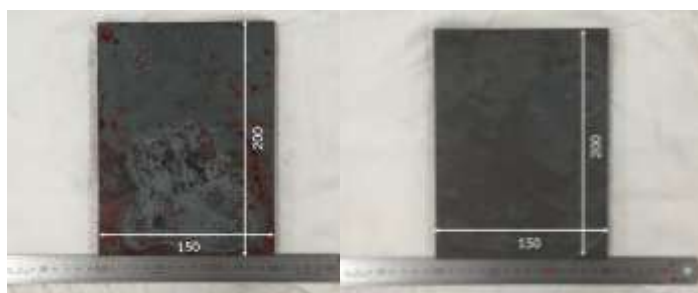
ยี่ห้อ (Manufacturer)	Sonatest (ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา)
ชนิด (Type)	มุมเอียง
รุ่น (Model)	X2-SB56-N45S
มุมหัวตรวจสอบ (Beam angle)	35-70 องศา



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

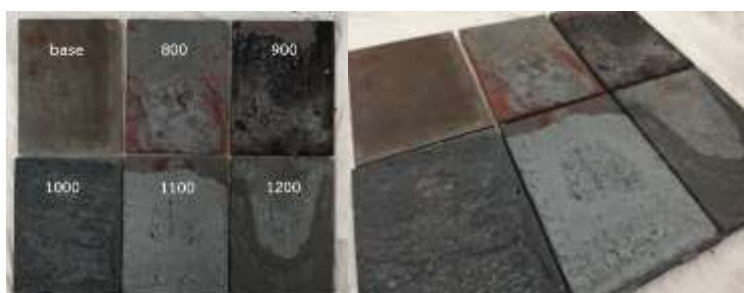
### 3.3 วิธีการทดลอง

1. สร้างชิ้นงานทดสอบการลדתอนของคลื่นเสียงความถี่สูง และอบชิ้นงานเพื่อศึกษาทางด้านโครงสร้างจุลภาค โดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 โดยเตรียมชิ้นงานตาม ASME Section V ปี 2017 ชนิดละ 5 ชิ้น แสดงดังรูป 3.3

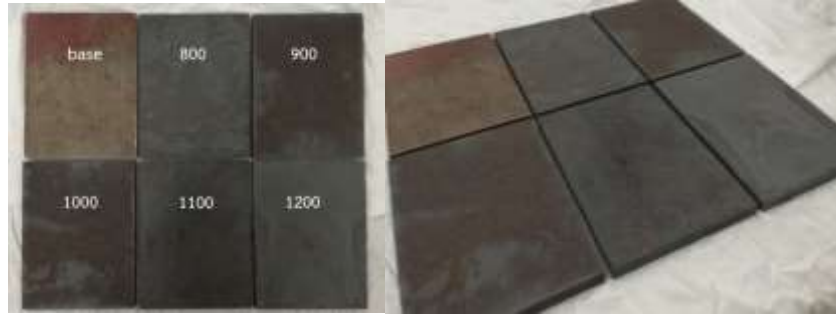


รูปที่ 3.3 ขนาดชิ้นงานทดสอบการลדתอน

2. นำชิ้นงานทดลอง ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้อัตราความร้อนคงที่ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา แสดงดังรูป 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 เหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

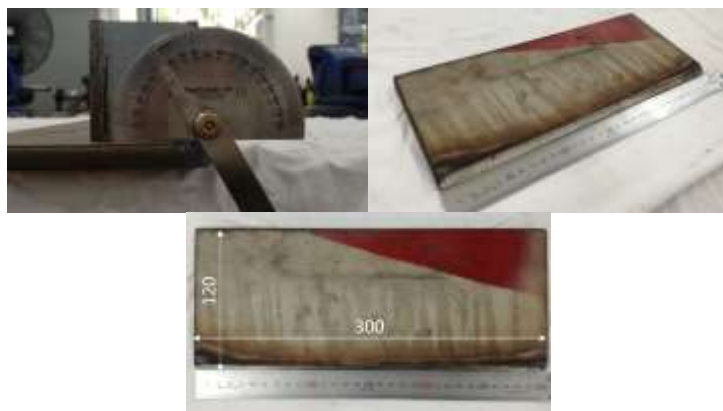


รูปที่ 3.5 เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

3. เตรียมชิ้นงานเชื่อม โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 จำนวน 4 ชิ้น และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 จำนวน 4 ชิ้น เตรียมรอยเชื่อมแบบต่อชน (Butt joint) บากวีเดี่ยว (Single V) มุม 60 องศา เว้นระยะรอยต่อ (Root gap) 2-3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับสร้างชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน



รูปที่ 3.7 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับสร้างชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน

4. เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316 ต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316 จำนวน 1 ชุด แสดงชิ้นงานดังรูปที่ 3.8 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และใช้ลวดเชื่อม 309L-16 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร ตัวแปรการเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ตัวแปรการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

กระบวนการเชื่อม	ลวดเชื่อม	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)
GTAW	TG-S309	100	12 - 16	18 - 20
SMAW	E-309L	80	22 - 26	18 - 20



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

5. เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 ต่อกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 จำนวน 1 ชุด แสดงชิ้นงานดังรูปที่ 3.9 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และใช้ลวดเชื่อม E7016 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร ตัวแปรการเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ตัวแปรการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน

กระบวนการเชื่อม	ลวดเชื่อม	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)
GTAW	ER70S-6	100	12 - 16	10 - 15
SMAW	E-7016	80	22 - 26	18 - 20



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

6. เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 ต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 316 จำนวน 2 ชุด ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และลวดเชื่อม 309L-16 ขนาด 3.2 X 350 มิลลิเมตร ตัวแปรการเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 ต่อกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A516

กระบวนการเชื่อม	ลวดเชื่อม	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)
GTAW	ER70S-G	100	12 - 16	18 - 20
SMAW	E-309L	80	22 - 26	18 - 20



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน

7. สร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ทั้งสองด้านของชิ้นงาน โดยนำโลหะแผ่นที่เป็นวัสดุที่ชนิดเดียวกับวัสดุฐาน ความหนา 3 มิลลิเมตร เชื่อมติดบริเวณตำแหน่งที่

กำหนดให้เกิดรอยความไม่ต่อเนื่อง (แสดงดังรูปที่ 3.11) ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตน แก๊สคลูม จากนั้นเชื่อมเติมเนื้อด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนเชื่อมหุ้มฟลักซ์จนเต็มแนวเชื่อม ตัวแปรการเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.16

**ตารางที่ 3.16** ตัวแปรการเชื่อม สำหรับสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์

กระบวนการเชื่อม	ลวดเชื่อม	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)
GTAW	ER-309L	100	12 - 16	10 - 15
	ER70S-G	100	12 - 16	10 - 15
SMAW	E-7016	80	22 - 26	18 - 20
	E-309L	80	22 - 26	18 - 20



**รูปที่ 3.11** การจำลองรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์

8. สร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุน ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ด้วยลวดเชื่อม E-7016 และ E-309L ตามวัสดุฐาน เมื่อเชื่อมเต็มรอยต่อ จะทำการเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร บริเวณด้านหัวและท้ายของแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยขนาด 2.5 มิลลิเมตร เป็นขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่องอ้างอิงในการสร้างเส้น DAC จึงได้กำหนดรูขนาด 2 มิลลิเมตร ที่ขนาดเล็กกว่ารอยความไม่ต่อเนื่องอ้างอิง และเพื่อจำลองเป็นรอยความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเชื่อมบริเวณพื้นที่หลอมละลาย เช่น รูพรุน และ สแลกฝังในเพื่อทวนสอบระดับสัญญาณที่สะท้อนกลับของรอยความไม่ต่อเนื่องที่ขนาดต่างกัน ตัวแปรการเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.17



ตารางที่ 3.17 ตัวแปรการเชื่อม สำหรับการสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุน

กระบวนการเชื่อม	ลวดเชื่อม	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)
SMAW	E-7016	95-100	23.5 - 24	12 - 15
	E-309L	95-100	23.5 - 24	12 - 15



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งและรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 2.5 มิลลิเมตร

- วิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 ชนิด และวัดขนาดเกรนโดยใช้มาตรฐาน ASTM E1382 รวมทั้งศึกษาทิศทางการเติบโตของเกรนในงานเชื่อมวัสดุต่างชนิด

### 3.4 การทดสอบโครงสร้างของวัสดุ และการวัดขนาดเกรน

การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ ทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายหยาบเบอร์ 600-1200 จากนั้นทำการขัดเงา (Polishing) ด้วยน้ำผสมไมโครซิลิกา 0.3 ไมครอน แล้วกัดกรดด้วยกรด Nital 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม กัดด้วยกรดไฮโดรครอริกและกรดไนตริก

การทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดยถ่ายภาพที่กำลังขยายต่ำ 20 เท่า สำหรับโครงสร้างมหภาค เพื่อให้เห็นภาพโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงาน และที่กำลังขยาย 100 เท่า 200 เท่า 500 เท่า สำหรับโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาค (Leica DM 2500 M) ตำแหน่งถ่ายภาพคือ บริเวณเนื้อฐานวัสดุ บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณพื้นที่หลอมละลายทั้งสองวัสดุ และการวัดขนาดเกรนชิ้นงาน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E112-46

### 3.5 การทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานเชื่อม

การทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง ด้วยเครื่อง OLYMPUS EPOCH 650 ใช้หัวตรวจสอบความถี่เท่ากับ 2.25 และ 5 เมกะเฮิรตซ์ มุม 45 60 และ 70 องศา และวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส ใช้เครื่อง Proceq รุ่น Flaw Detector 100 ในการทดสอบชิ้นงาน เพื่อ

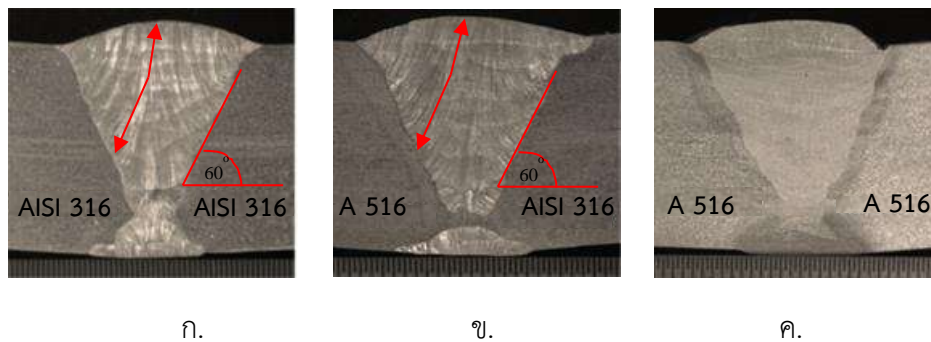
ตรวจหารอยความไม่ต่อเนื่อง และเทียบความแตกต่างของระดับการลดทอนค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง ที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไข โดยในการทดสอบจะใช้เส้น DAC และ TCG ที่ระดับ 80% ของความสูงหน้าจอ กำหนดให้เป็นเส้นอ้างอิงในการประเมินความแม่นยำในการตรวจสอบ ซึ่งขนาดรอยความไม่ต่อเนื่องจำลอง มีขนาดเท่ากับชิ้นงานที่ใช้ในการสร้างเส้น DAC (2.5 มิลลิเมตร) หากระดับสัญญาณที่ตรวจสอบมีความแม่นยำจะมีระดับสัญญาณเท่ากับเส้นอ้างอิงที่ 80% หากระดับสัญญาณต่ำกว่าบ่งบอกถึงการลดทอนของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง

## บทที่ 4

### อภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดสอบโครงสร้างมหภาค

จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน ที่เชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อม E309L พบว่ามีเกรนคอลลัมน์าร์ ลักษณะเป็นแท่งยาวโดยเริ่มเกิดบริเวณพื้นผิวของแนวรอยเชื่อม ยาวขึ้นไปถึงศูนย์กลางของรอยเชื่อมตามลักษณะการเย็นตัว แสดงดังรูป 4.1 ก. และ ข. สำหรับโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้ลวดเชื่อม E7016 ทำการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.1 ค. ภายในโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลท์



รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาค ก. ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ข. ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน ค. ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

#### 4.2 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดขนาดเกรน

ชิ้นงานทดสอบการลดทอนวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน อบที่อุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส แสดงผลดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 โดยที่โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A516 คือ โครงสร้างเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิด เมื่อได้รับผลกระทบจากความร้อน จะเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ทำให้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนมีเกรนละเอียดมากขึ้น เมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีขนาดเกรนที่โตขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.1 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดเกรนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

อุณหภูมิ ในการอบ (องศา เซลเซียส)	โครงสร้างจุลภาค	ขนาดเกรน (Average grain size) (ASTM Grain Size No.)					
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย
800		7.9	8.0	8.0	7.8	7.9	7.9
900		8.0	8.0	8.2	8.0	7.9	8.0
1000		10.3	10.4	10.1	10.3	10.2	10.3
1100		12.1	12.4	12.4	12.2	12.3	12.3
1200		14.1	13.9	14.1	14.0	14.0	14.0

ตารางที่ 4.2 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดขนาดเกรนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม

อุณหภูมิ ในการอบ (องศา เซลเซียส)	โครงสร้างจุลภาค	ขนาดเกรน (Average grain size) (ASTM Grain Size No.)					
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย
		800		7.9	8.0	7.6	8.0
900		7.9	7.9	8.1	8.0	8.1	8.0
1000		7.5	7.4	5.2	5.5	5.0	6.1
1100		5.1	5.2	4.7	5.3	4.8	5.1
1200		4.6	4.8	5.0	4.7	4.6	4.7

### 4.3 ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ในกลุ่มวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่าโครงสร้างจุลภาคทั้งบริเวณโลหะฐาน บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณพื้นที่หลอมละลาย เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์ โดยบริเวณโลหะฐานมีขนาดเกรนโดยเฉลี่ยอยู่ที่เบอร์ 8 (ขนาดเกรนเฉลี่ย 22.5  $\mu\text{m}$ ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเบอร์ 12 (ขนาดเกรนเฉลี่ย 6.5  $\mu\text{m}$ ) และในบริเวณเนื้อเชื่อมเบอร์ 14 (ขนาดเกรนเฉลี่ย 2.8  $\mu\text{m}$ ) เนื่องด้วยเกิดการตกผลึกใหม่ จากอุณหภูมิที่เกิน 450 องศาเซลเซียส ในบริเวณดังกล่าว (Z. Larouk, 2009) สำหรับในกลุ่มวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม บริเวณโลหะฐานมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ เช่นเดียวกับกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน โดยมีเกรนขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยอยู่ที่เบอร์ 8 และเบอร์ 6 ตามลำดับ เนื่องจากบริเวณผลกระทบทางความร้อนเป็นบริเวณที่เกรนเกิดการขยายตัว (Grain growth) เนื่องจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม (J. K. Stanley, 1969, S. Akira, 2014) และบริเวณพื้นที่หลอมละลาย มีเกรนคอลลัมน์ ลักษณะเป็นแท่งวางตัวตามแนวทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะหลอมเหลว และมีเดนไดรต์กระจายตัวอยู่ตลอด (F. Michael, 2008, R. Alberto, 2017) แสดงดังตารางที่ 4.3

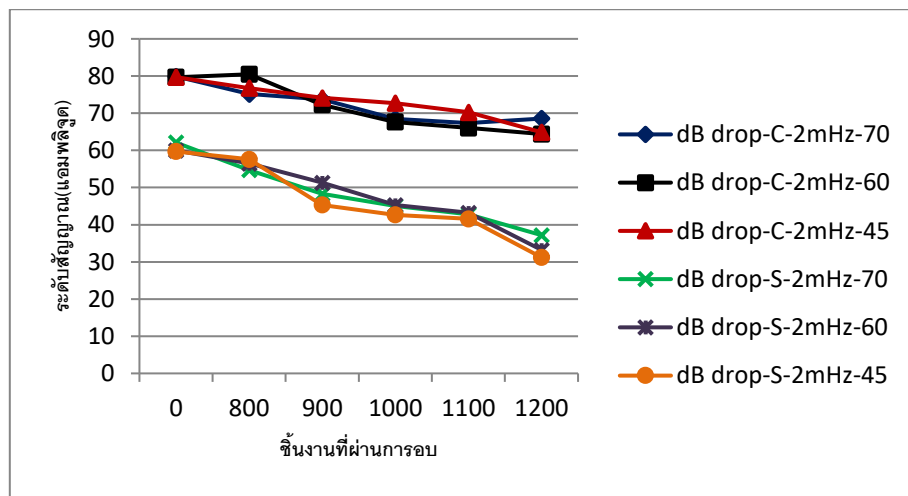
ตารางที่ 4.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน (กำลังขยาย 500 เท่า)			
บริเวณวัสดุฐานเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดเกรนเบอร์ 8		บริเวณวัสดุฐานเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเกรนเบอร์ 8	
บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดเกรนเบอร์ 12		บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเกรนเบอร์ 6	
บริเวณเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดเกรนเบอร์ 14		บริเวณเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมคอลลัมน์เกรน	

#### 4.4 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างต่อค่าการลดทอนในการสร้างเส้นโค้งขดเคี้ยวค่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงเนื่องจากกระยะทาง

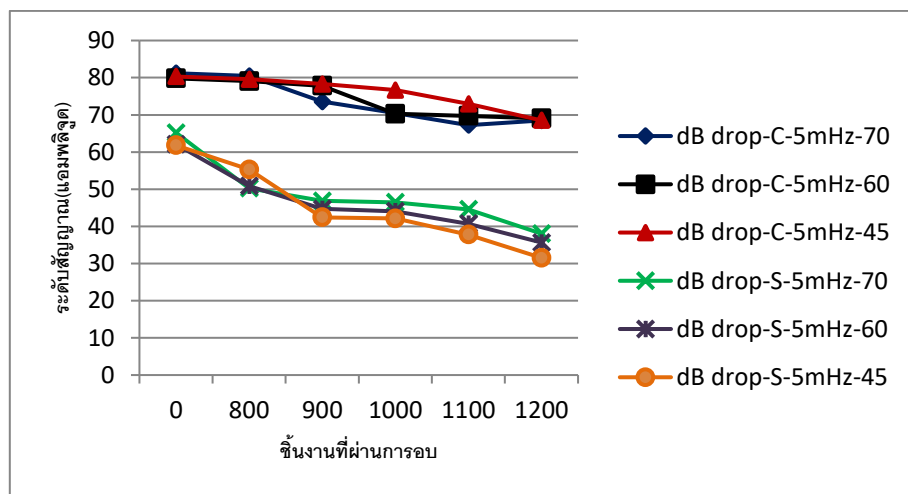
เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบค่าการลดทอนจากเส้น DAC และ TCG เงื่อนไขต่าง ๆ โดยนำค่าระดับสัญญาณบนหน้าจอแสดงผล มาคำนวณหาค่าการลดทอนเทียบกับค่าสัญญาณเริ่มต้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาลบกับระดับพลังงานคลื่นเสียงตั้งต้นหรือ Amplifier Gain จะได้ค่าการลดทอนของเส้น DAC แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.3 และ TCG แต่ละเงื่อนไข แสดงดังรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

##### 4.4.1 การลดทอนของเส้น DAC ที่ความถี่ 2.25 เมกกะเฮิร์ตซ์



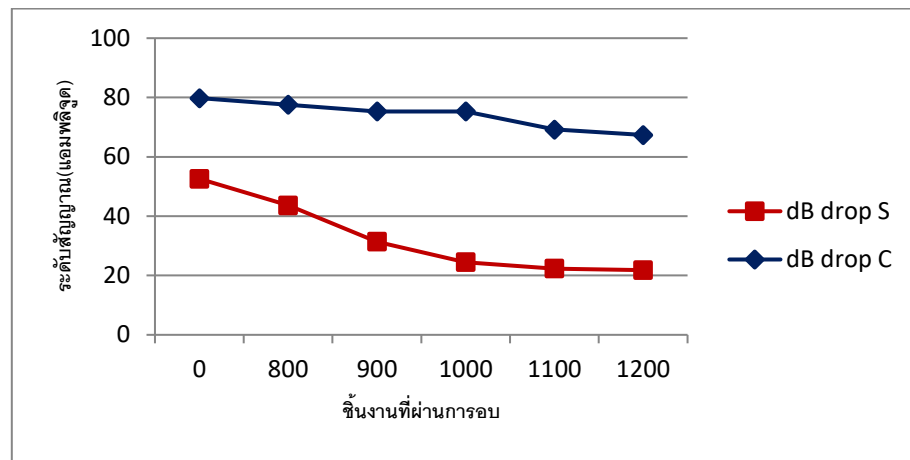
รูปที่ 4.2 การลดทอนสัญญาณจากการสร้างเส้น DAC โดยใช้หัวตรวจสอบความถี่ 5 เมกกะเฮิร์ตซ์  
 ชั้นงานที่ผ่านการอบ 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

##### 4.4.2 การลดทอนของเส้น DAC ที่ความถี่ 5 เมกกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.3 การลดทอนสัญญาณจากการสร้างเส้น DAC โดยใช้หัวตรวจสอบความถี่ 5 เมกกะเฮิร์ตซ์  
 ชั้นงานที่ผ่านการอบ 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

## 4.4.3 การลดทอนของ TCG



รูปที่ 4.4 การลดทอนสัญญาณจากการสร้าง TCG ของแต่ละชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาควัสดุเกรดเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในด้านโครงสร้าง และขนาดเกรน ในบริเวณใกล้พื้นที่หลอมละลาย จะได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ จากแนวหลอมละลาย ทำให้บริเวณนี้เกิดพฤติกรรมการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) โดยอุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกโดยเฉลี่ยประมาณหนึ่งในสามหรือครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งจะมีปัจจัยอื่น ๆ ในเรื่องความเค้นสะสม ความบริสุทธิ์ของวัสดุ ผลกระทบต่อมาจากการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ของวัสดุ เกรนจะโตต่อไปได้เรื่อย ๆ ถ้าชิ้นงานโลหะยังคงอยู่ในอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นบริเวณใกล้แนวหลอมละลายที่มีการเย็นตัวได้ช้าที่สุด ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้เรียกว่าการโตของเกรน (Grain growth) จากผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า ขนาดเกรนมีการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขนาดเกรนโดยเฉลี่ยจะใหญ่ขึ้นตาม แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการอบมาสร้างเส้น DAC และ TCG จะพบว่า ชิ้นงานที่มีเกรนขนาดใหญ่จะมีการลดทอนระดับสัญญาณสูงขึ้นหรือมีการลดทอนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\alpha$ ) เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\alpha_A$ ) (Absorption coefficient) บวกค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง (Scattering coefficient:  $\alpha_S$ ) (A. BadidiBouda, 2003) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_S \quad (4)$$

สาเหตุของการลดทอนและเกิดการกระจายตัวของคลื่นเสียง ซึ่งโดยทั่วไปการลดทอนเกิดจากการกระเจิงตามขอบเกรนมากกว่าเมื่อเทียบกับการลดทอนจากการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง จะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับขนาดเกรน (A. BadidiBouda, 2003) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์

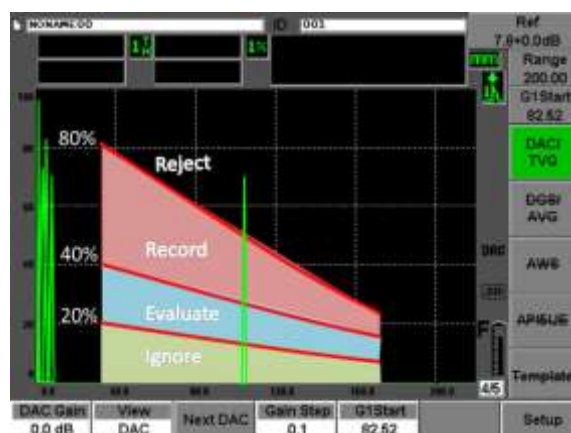


การลดทอนจะเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเกรนเฉลี่ย และจะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงร่วมด้วย (IIWAP 2019 E-Proceeding Book, K. J. Langenberg, 2000, P. E. Lhuillier, 2017, S. Halkjær 2000)

#### 4.5 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น DAC และ TCG

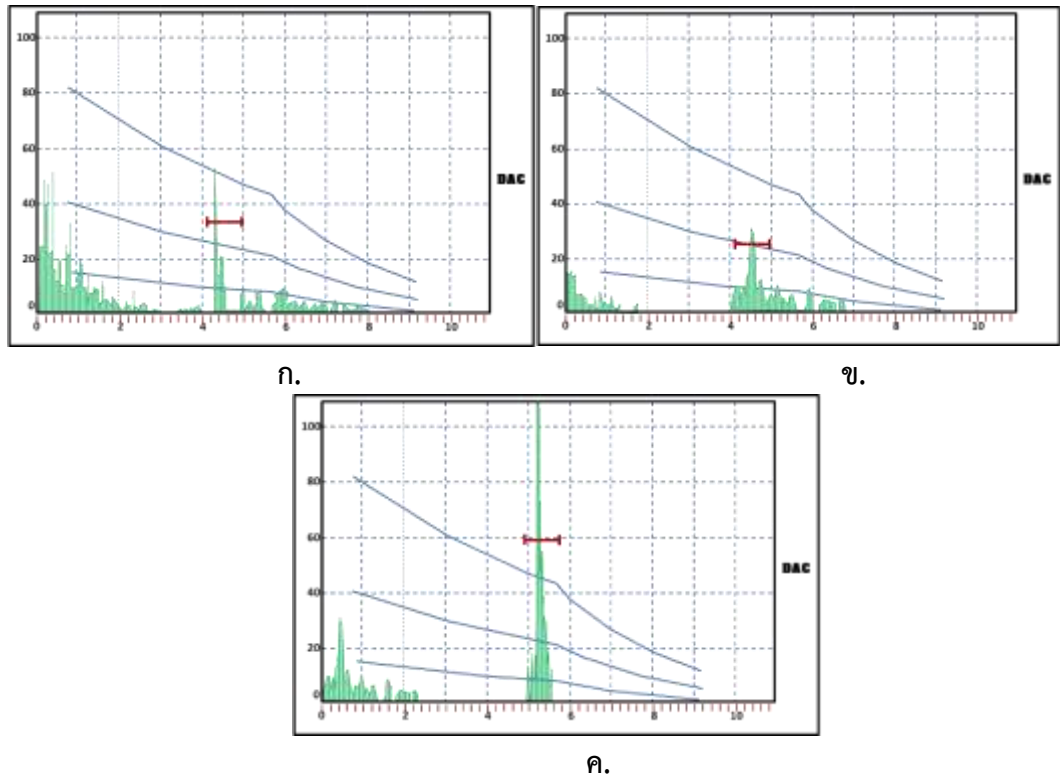
4.5.1 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น DAC ซึ่งเส้น DAC สามารถเลือกระดับความละเอียดในการตัดสินใจได้จากจำนวนเส้น DAC ในหน้าจอแสดงผล โดยทั่วไปกำหนดที่ 3 เส้นคือ 80 40 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอตามลำดับ ซึ่งในแต่ละช่วงของเครื่องมือการตัดสินใจนี้จะพิจารณาต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยที่

- ระดับสัญญาณเกินเส้น DAC 80 เปอร์เซ็นต์ ผลการตัดสินใจจะปฏิเสธ หรือ Reject ผลการทดสอบนั้น ๆ
- ระดับสัญญาณอยู่ระหว่างเส้น DAC 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ ผลการตัดสินใจต้องผ่านการพิจารณาเพิ่มเติมในด้านของชนิด ตำแหน่ง ขนาด และอัตราการโตของรอยความไม่ต่อเนื่อง รวมถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการใช้งานต่อ ถึงจะสามารถตัดสินใจผลได้ แต่โดยเบื้องต้นต้องบันทึกผลการทดสอบที่อยู่ในช่วงระดับสัญญาณนี้ด้วย
- ระดับสัญญาณอยู่ระหว่างเส้น DAC 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ ผลการตัดสินใจให้ทำการประเมินความเสี่ยง หากพบว่ามีความเสี่ยงถึงจะบันทึกผลแล้วตัดสินใจผลการทดสอบ
- ระดับสัญญาณต่ำกว่าเส้น DAC 20 เปอร์เซ็นต์ ผลการตัดสินใจจะยอมรับ หรือ Accept ผลการทดสอบนั้น ๆ



รูปที่ 4.5 เกณฑ์การพิจารณาเส้น DAC

ลักษณะเส้น DAC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.6



**รูปที่ 4.6** การทดสอบชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงโดยใช้เกณฑ์การตัดสินด้วยเส้น DAC ก. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุณขนาด 2.5 มิลลิเมตร ข. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุณขนาด 1.0 มิลลิเมตร และ ค.ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายไม่สมบูรณ์

1) การทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 4.4 - 4.5

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ A คือ Accept ยอมรับหรือผ่านเกณฑ์ และ R คือ Reject ไม่ยอมรับหรือไม่ผ่านเกณฑ์

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 5 MHz

	อุณหภูมิในการอบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการตัดสิน
DAC 5 MHz 70 องศา	0	81.2	R	61.2	A	125.2	R
	800	80.4	R	60.6	A	124.0	R
	900	73.5	A	55.4	A	113.4	R
	1000	70.5	A	53.1	A	108.7	R
	1100	67.2	A	50.6	A	103.6	R
	1200	68.4	A	51.5	A	105.5	R

5 MHz 60 องศา	DAC	0	79.8	R	58.8	A	121.7	R
		800	79.1	R	58.2	A	120.5	R
		900	77.8	R	57.3	A	118.6	R
		1000	70.2	A	51.7	A	107.1	R
		1100	69.7	A	51.3	A	106.3	R
		1200	69.0	A	50.8	A	105.3	R
5 MHz 45 องศา	DAC	0	80.3	R	60.2	A	129.7	R
		800	79.5	R	59.6	A	128.5	R
		900	78.2	R	58.6	A	126.4	R
		1000	76.6	R	57.4	A	123.8	R
		1100	72.9	A	54.6	A	117.8	R
		1200	68.5	A	51.3	A	110.6	R

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 2 MHz

	อุณหภูมิ ในการอบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion		
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	
2 MHz 70 องศา	DAC	0	79.9	R	57.3	A	122.0	R
		800	75.1	R	53.9	A	114.8	R
		900	73.6	A	52.8	A	112.5	R
		1000	68.4	A	49.1	A	104.6	R
		1100	67.3	A	48.2	A	102.8	R
		1200	68.5	A	49.1	A	104.7	R
2 MHz 60 องศา	DAC	0	79.7	R	59.7	A	119.6	R
		800	80.4	R	60.2	A	120.7	R
		900	72.2	A	54.1	A	108.5	R
		1000	67.6	A	50.6	A	101.5	R
		1100	66.0	A	49.4	A	99.1	R
		1200	64.3	A	48.2	A	96.6	R
2 MHz 45 องศา	DAC	0	79.7	R	57.7	A	124.1	R
		800	76.7	R	55.5	A	119.5	R
		900	74.1	A	53.6	A	115.5	R

	1000	72.7	A	52.6	A	113.2	R
	1100	70.2	A	50.8	A	109.4	R
	1200	64.8	A	46.9	A	101.0	R

2) ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงดังตารางที่ 4.6 - 4.7

**ตารางที่ 4.6** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 5 MHz

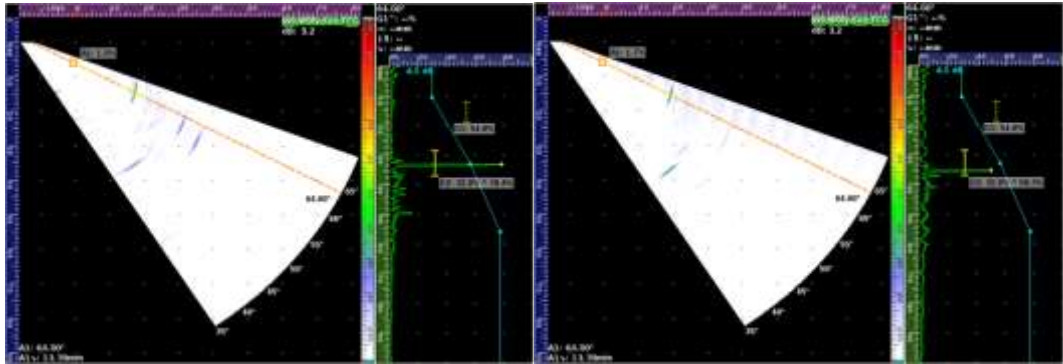
	อุณหภูมิ ในการอบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
DAC 5 MHz 70องศา	0	65.2	A	42.1	A	132.0	R
	800	50.2	A	32.4	A	101.7	R
	900	46.8	A	30.2	A	94.9	R
	1000	46.4	A	30.0	A	94.1	R
	1100	44.5	A	28.7	A	90.3	R
	1200	38.0	A	24.5	A	77.0	R
DAC 5 MHz 60องศา	0	62.1	A	38.7	A	127.0	R
	800	50.8	A	31.6	A	104.0	R
	900	44.6	A	27.8	A	91.4	R
	1000	44.0	A	27.4	A	90.1	R
	1100	40.6	A	25.3	A	83.2	R
	1200	35.6	A	22.2	A	72.9	R
DAC 5 MHz 45องศา	0	61.8	A	36.0	A	128.0	R
	800	55.2	A	32.2	A	114.5	R
	900	42.4	A	24.7	A	87.8	R
	1000	42.1	A	24.5	A	87.2	R
	1100	37.7	A	21.9	A	78.2	R
	1200	31.5	A	18.3	A	65.3	A

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ความถี่ 2 MHz

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
DAC 2 MHz 70 องศา	0	62.1	A	44.7	A	127.1	R
	800	54.6	A	39.3	A	111.9	R
	900	48.2	A	34.7	A	98.8	R
	1000	45.0	A	32.4	A	92.2	R
	1100	42.8	A	30.8	A	87.6	R
	1200	37.1	A	26.7	A	76.1	R
DAC 2 MHz 60 องศา	0	60.1	A	46.2	A	125.3	R
	800	56.4	A	43.4	A	117.9	R
	900	51.3	A	39.5	A	107.2	R
	1000	45.2	A	34.8	A	94.6	R
	1100	43.2	A	33.2	A	90.3	R
	1200	33.2	A	25.5	A	69.4	A
DAC 2 MHz 45 องศา	0	59.7	A	48.6	A	125.7	R
	800	57.5	A	46.8	A	121.2	R
	900	45.3	A	36.8	A	95.4	R
	1000	42.6	A	34.7	A	89.8	R
	1100	41.5	A	33.8	A	87.5	R
	1200	31.2	A	25.4	A	65.7	A

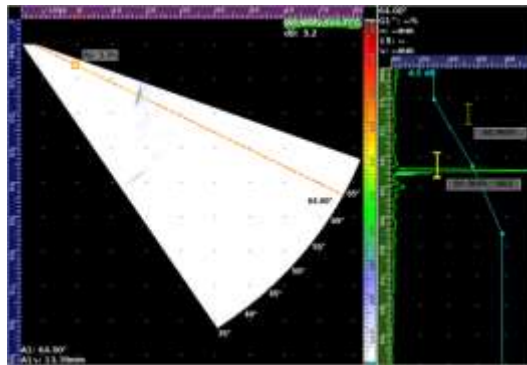
#### 4.5.2 ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน โดยใช้เส้น TCG

ซึ่ง TCG ในการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส คือการชดเชยค่าของระดับสัญญาณให้อ่านค่าที่ใช้อ้างอิง สูงที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอ ในทุก ๆ ระยะความลึกที่ทำการทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ปรากฏในทุกระยะทดสอบ สัญญาณที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลต้องสูงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7



ก.

ข.



ค.

**รูปที่ 4.7** การทดสอบชิ้นงานด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟสโดยใช้เกณฑ์การตัดสินด้วย TCG ก. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 2.5 มิลลิเมตร ข. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 1.0 มิลลิเมตร และ ค. ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดหลอมละลายไม่สมบูรณ์

1) ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

	อุณหภูมิ ในการอบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
TCG ชิ้นงาน คาร์บอน	0	80	R	50.5	A	122.5	R
	800	77.5	R	48.9	A	118.7	R
	900	75.3	A	47.5	A	115.2	R
	1000	75.3	A	47.5	A	115.2	R
	1100	69.1	A	43.6	A	105.9	R
	1200	67.3	A	42.5	A	103.1	R

## 2) ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงดังตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

	อุณหภูมิ ในการอบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
TCG ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	0	42.6	A	18	A	124.1	R
	800	35.3	A	17.4	A	120.2	R
	900	25.4	A	16.9	A	116.7	R
	1000	19.8	A	16.9	A	116.7	R
	1100	18.1	A	15.5	A	107.2	R
	1200	17.6	A	15.1	A	104.4	R

## 3) ชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน

- ด้านเหล็กกล้าคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดด้านเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
TCG เหล็กกล้า คาร์บอน	0	46.3	A	28.5	A	131.2	R
	800	44.8	A	27.6	A	127.0	R
	900	43.5	A	26.8	A	123.2	R
	1000	43.5	A	26.8	A	123.2	R
	1100	40.0	A	24.6	A	113.2	R
	1200	38.9	A	24.0	A	110.3	R

- ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงดังตารางที่ 4.11

**ตารางที่ 4.11** ผลการทดสอบชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดด้านเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีรอยความไม่ต่อเนื่อง ด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5		SDH 1.0		Lack of Fusion	
		แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน	แอมพลิจูด	ผลการ ตัดสิน
TCG เหล็กกล้า ไร้สนิม	0	49.6	A	34.4	A	122.1	R
	800	41.1	A	33.3	A	118.3	R
	900	29.5	A	32.3	A	114.8	R
	1000	23.1	A	32.3	A	114.82	R
	1100	21.0	A	29.7	A	105.5	R
	1200	20.5	A	28.9	A	102.7	R

จากตารางผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดรูพรุนขนาด 2.5 และ 1.0 มิลลิเมตร รวมถึงชนิดหลอมละลายไม่สมบูรณ์ ด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส ที่ระดับสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้นจากรูขนาด 2.5 มิลลิเมตรเท่ากันของแต่ละวิธีการทดสอบ แนวทางการพิจารณา สัญญาณอ้างอิงเริ่มต้น 80 เปอร์เซ็นต์ สร้างจากชิ้นงานที่เจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อนำไปตรวจสอบชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องขนาด 2.5 มิลลิเมตร ระดับสัญญาณต้องอยู่ในช่วง 80 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอ ( $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์) ซึ่งในกรณีที่ตรวจสอบชิ้นงานที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องขนาดเกิน 2.5 มิลลิเมตร ระดับสัญญาณบนหน้าจอแสดงผลต้องเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอ ในทำนองเดียวกันกับรอยความไม่ต่อเนื่องขนาดต่ำกว่าขนาด 2.5 มิลลิเมตร ระดับสัญญาณบนหน้าจอแสดงผลต้องต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.6 สำหรับวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง และ 4.7 สำหรับวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

ผลการทดสอบตัวแปรด้านการทดสอบ และรอยความไม่ต่อเนื่อง รวมถึงชนิดและตำแหน่งเดียวกัน ของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงตามแนวทางพิจารณาข้างต้น แต่ในกลุ่มวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมให้ผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร ให้ค่าสัญญาณที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งควรให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียง 80 เปอร์เซ็นต์ และรูขนาด 1.0 มิลลิเมตร ในการทดสอบให้ผลค่าสัญญาณอยู่ในช่วง 40 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของหน้าจอ ผลการทดสอบต่ำกว่าเกณฑ์ตามแนวทางพิจารณา สอดคล้องกับการผลการทดสอบทางโครงสร้างเทียบกับระดับสัญญาณในการสร้างเส้น DAC และ TCG ที่มีเงื่อนไขผ่านการอบชิ้นงานที่ 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ที่เมื่อโครงสร้างจุลภาคมีผลของขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดทอนมากขึ้นนั่นเอง



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน มีขนาดเกรนก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยเฉลี่ยอยู่ที่เบอร์ 8 เมื่อพิจารณาบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อม วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณแนวหลอมละลายมีขนาดเกรนโตขึ้นจากการตกผลึกใหม่ โดยมีเกรนเฉลี่ยเบอร์ 6 แต่ในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนมีขนาดเกรนโดยเฉลี่ยเบอร์ 12 ส่วนบริเวณหลอมละลาย เหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นเกรนคอลัมน์าร์ วางตัวตามทิศทางการเย็นตัวของวัสดุ ทำมุมโดยประมาณ 60 องศา และบริเวณหลอมละลายเหล็กกล้าคาร์บอน เกรนมีขนาดโดยเฉลี่ยเบอร์ 14 ซึ่งมีความละเอียดมาก

จากการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง ในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อพิจารณาพบว่า การลดทอนมักเกิดจากปัจจัย 2 หลัก คือ การกระเจิง และการดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปการลดทอนเกิดจากการกระเจิงตามขอบเกรนมากกว่า และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง จะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับขนาดเกรน โดยที่ในบริเวณแนวหลอมละลาย คลื่นเสียงความถี่สูงจะได้รับผลกระทบจากขนาดเกรน ที่มีขนาดเกรนโดยเฉลี่ยเบอร์ 6 และในส่วนบริเวณหลอมละลายโครงสร้างเป็นคอลัมน์าร์เกรน ด้วยลักษณะโครงสร้างที่มีรอยต่อระหว่างเกรนมาก และมีทิศทางการวางตัวที่ทำมุมเดียวกับทิศทางการเย็นตัว หากเลือกมุมในการทดสอบไม่เหมาะสมจะทำให้คลื่นเสียงความถี่สูงเกิดการลดทอนมากยิ่งขึ้น ต่างจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนที่เมื่อพิจารณาตามโครงสร้างแล้วจะพบว่าขนาดเกรนบริเวณแนวหลอมละลายและพื้นที่หลอมละลายมีขนาดเล็กกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาก ทำให้ไม่ได้รับผลกระทบด้านการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบ

จากระดับพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงที่ส่งผ่านเข้าไป แล้วสะท้อนเป้าหมายการทดสอบกลับมา ในระดับพลังงานที่ต่ำ เนื่องจากการลดทอน ทำให้การทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงทั้งในด้านการสร้างเครื่องมือสำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน หรือเส้น DAC และ TCG รวมไปถึงการประเมินผลสัญญาณที่สะท้อนมาจากรอยความไม่ต่อเนื่องไม่ถูกต้อง จากการใช้เส้น DAC ที่สร้างจากชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ความถี่ 2.25 MHz มุม 60 องศา ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด จากโครงสร้างที่มีขนาดเกรนโดยเฉลี่ยในพื้นที่แนวหลอมละลายมากที่สุด คือเบอร์ 6 ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่อบ 1000 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกัน การทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส โดยใช้ TCG มาช่วยในการชดเชยค่าการลดทอน พบว่าเมื่อใช้ชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงและแม่นยำมากที่สุดเช่นกัน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบด้านโครงสร้างของวัสดุที่ทำให้เกิดการลดทอน ต้องควบคุมการสร้างเครื่องมือสำหรับการตัดสินผล ให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ซึ่งจากการวิจัยพบว่าโครงสร้างที่

แตกต่างกัน ให้ผลการลดทอนไม่เท่ากัน และเนื่องด้วยโครงสร้างที่เกิดขึ้นในชั้นงานไม่ได้เกิดเพียงรูปแบบเดียวในชั้นงานตัวอย่างที่นำไปอบ ดังนั้นหากต้องการให้ครอบคลุมและใกล้เคียงที่สุดควรสร้างเส้น DAC และ TCG จากชั้นงานเชื่อม หรือทำให้ชั้นงานสำหรับสร้างเส้น DAC และ TCG มีลักษณะทางโครงสร้างเหมือนชั้นงานที่ต้องการตรวจสอบมากที่สุด เพื่อให้ตัวกลางที่คลื่นเสียงความถี่สูงเคลื่อนที่ผ่านเหมือนจริงมากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

อาษา ประทีปเสน การทดสอบโดยไม่ทำลายในงานเชื่อมและงานวิจัย (Non-destructive Testing in Welds and Researches). กรุงเทพฯ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2550.

A. Badidi Bouda, S. Lebaili, A. Benchaala, “Grain Size Influence on Ultrasonic velocities and attenuation”, NDT&E International, 2003, Vol. 36, pp. 1-5.

B. Ashish, “Austenitic stainless steel weld inspection”, American International Journal of Research in Formal. Applied & Natural Sciences, 2014, Vol. 6, pp. 39-44.

B. Chassignole, “Modelling The Attenuation in The ATHENA Finite Elements Code for The Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Welds”, Electricité de France, Recherche et Développement, Les Renardières, 77818 Moret sur Loing, France, 2009; pp. 1-6.

F. Shahid, A. Ali Khan, M.Saqib Hameed, “Mechanical and Microstructure Analysis of Dissimilar Metal Welds”, IJRRAS, 2015, Vol. 25 (1), pp. 6-14.

[http://www.asminternational.org/documents/10192/3473958/05231G\\_Sample.pdf/7c5e4830-b443-4c71-a8c8-1a85c5b39dc5](http://www.asminternational.org/documents/10192/3473958/05231G_Sample.pdf/7c5e4830-b443-4c71-a8c8-1a85c5b39dc5) [2015, December 1].

IIWAP 2019 E-Proceeding Book, The 8<sup>th</sup> Asia Pacific IIW International Congress, 20<sup>th</sup>-22<sup>th</sup> March 2019, Bangkok, Thailand.

J. H. Smith, Ultrasonic Evaluation of Dissimilar-Metal Transition Joint Welds, Oak Ridge National Laboratory, 1979.

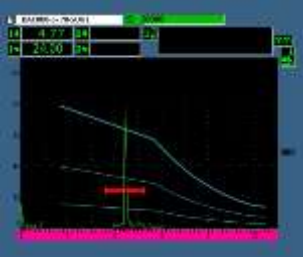
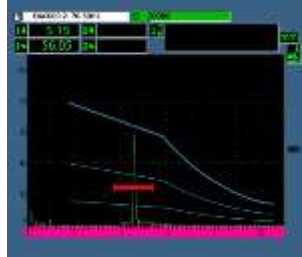
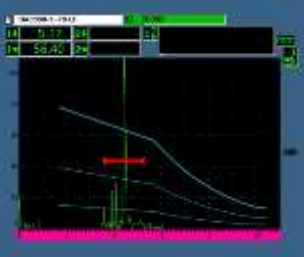
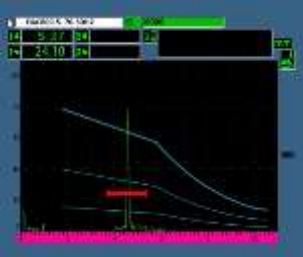
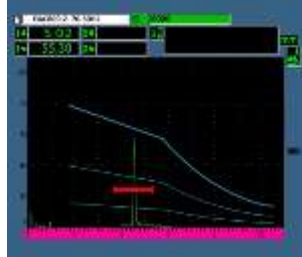
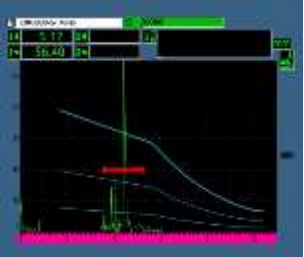

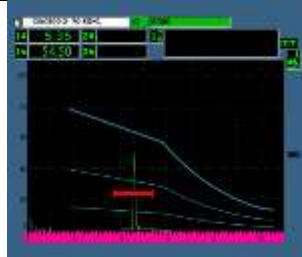


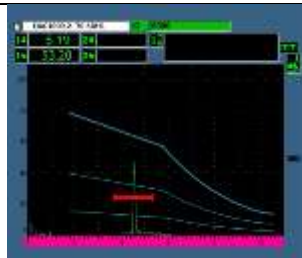

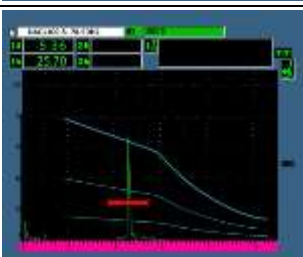
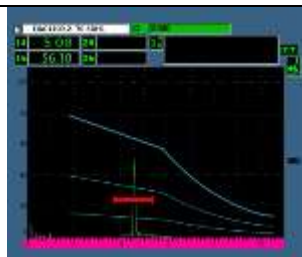

J. K. Stanley, A. J. Perrotta, “Grain growth in austenitic stainless steels. Metallography. 1969, 2 (4); pp. 349–362.

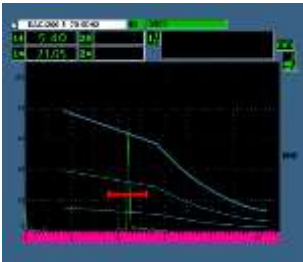
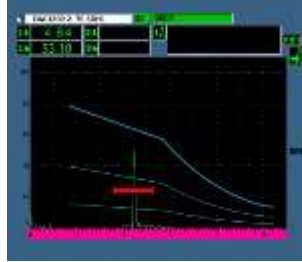
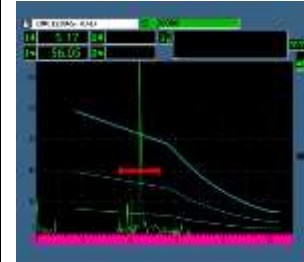
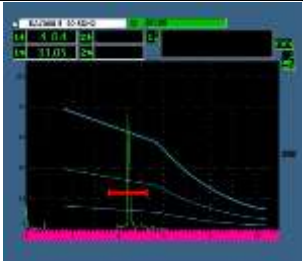
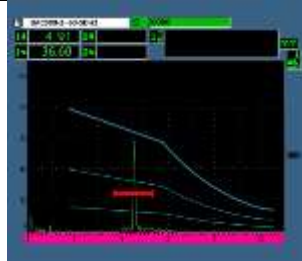
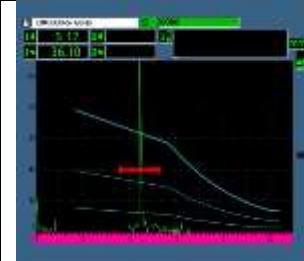
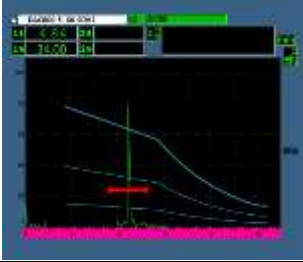
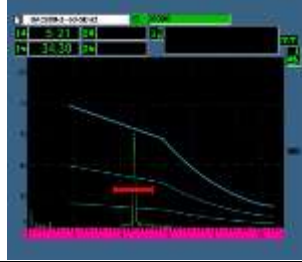

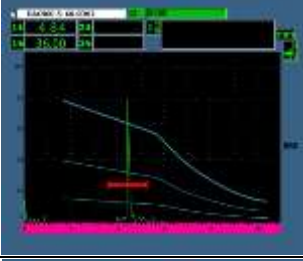
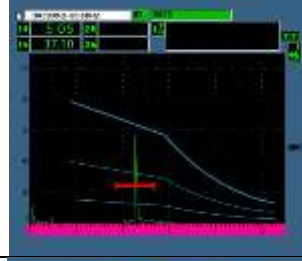

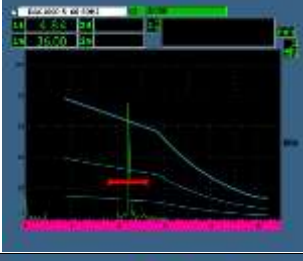
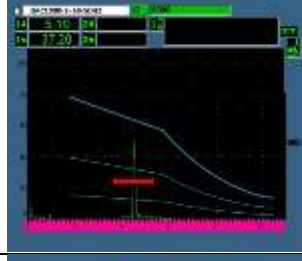
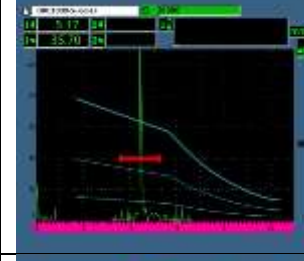

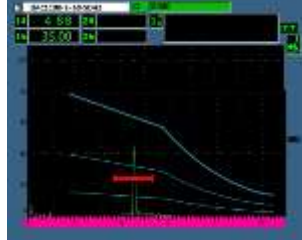
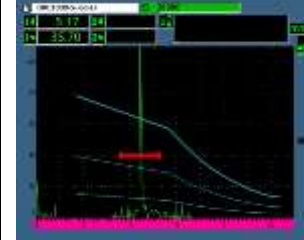
J. Moysan, C. Gueudre, M. A. Ploix, G. Corneloup, Ph. Guy, R.El Guerjouma, B. Chassignole, “Advance In Ultrasonic Testing Of Austenitic Stainless Steel Weld: Towards A 3D Description of The Material Including Attenuation and Optimization By Inversion”, Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media, 2009, Vol. 128; pp. 15-24.

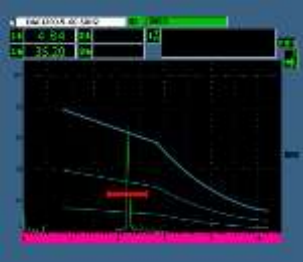
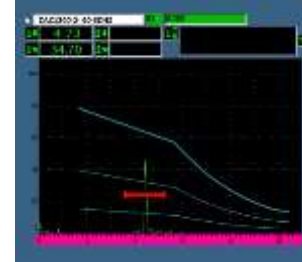
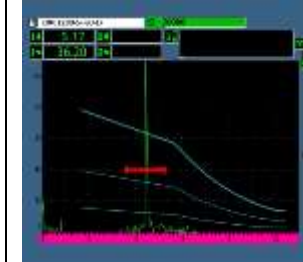
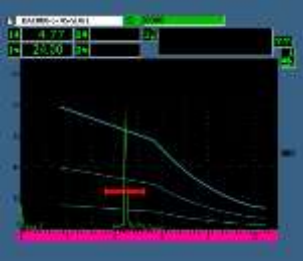
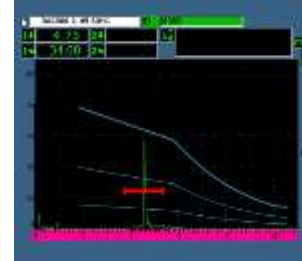
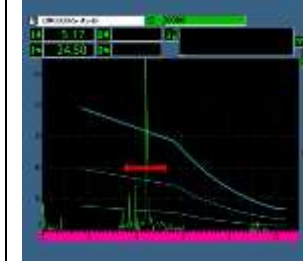
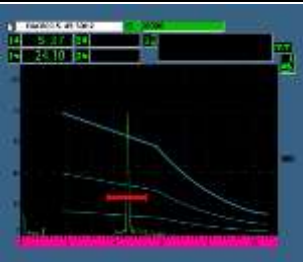


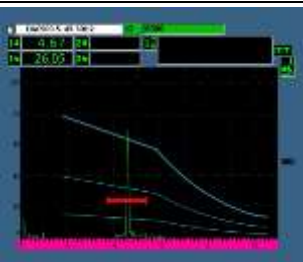
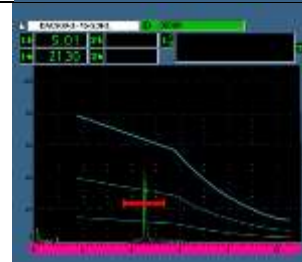





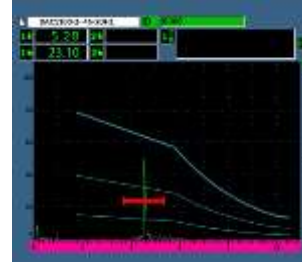

- K. J. Langenberga, R. Hannemanna, T. Kaczorowskia, et al., “Application of Modeling Techniques for Ultrasonic Austenitic Weld Inspection”, *NDT&E International*, 2000, Vol. 33; pp. 465–480.
- P. E. Lhuillier, “Investigation of The Ultrasonic Attenuation in Anisotropic Weld Materials with Finite Element Modeling and Grain-Scale Material Description”, EDF R&D – SINETICS Department. Saclay, France, 2017; pp. 1-10.
- P. J. Shull, “Nondestructive Evaluation”, The Pennsylvania State University Altoona, Pennsylvania, 2002; pp.63-190.
- R. Alberto, J. Kevin, H. Victo, et al., “Microstructural and Ultrasonic Characterization of 2101 Lean Duplex Stainless Steel Welded Joint”, a Instituto de Investigation en Metalurgia y Materiales. UMSNH, Edificio U, Av. Francisco J. Múgica S/N, C.P. 58030 Morelia. Michoacán. Mexico, 2017; pp. 1-8.
- S. Akira, S. Masayoshi, M. Koji, et al., “Simulations of Grain Growth in Titanium and Stainless Steels”, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 2014, No. 106
- S. Halkjær, M.P. Sørensen, W.D. Kristensen. The propagation of ultrasound in an austenitic weld. *Ultrasonics* 38, 2000; pp. 256–261
- S. Kou, “Welding Metallurgy”, 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2003.
- S. Pudovikov, A. Bulavinov, M. Kroning, “Ultrasonic Inspectability of Austenitic Stainless Steel and Dissimilar Metal Joints”, 34.MPA-Seminar, 9<sup>th</sup> -10<sup>th</sup> Oct 2008, Stuttgart
- The American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Nondestructive Examination Section V. Two Park Avenue. New York, NY. 10016 USA; 2019
- Z. Larouk, H. Bouhalais. Recrystallization behavior of a low carbon steel wire. *Physics Procedia* 2, 2009; pp.1223–1229.

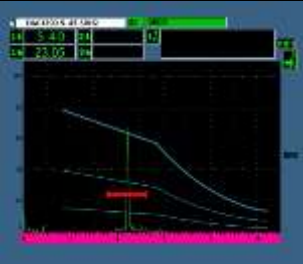
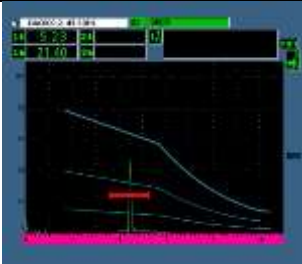
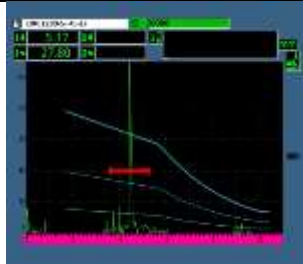
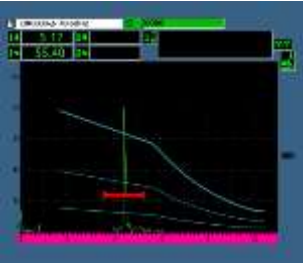
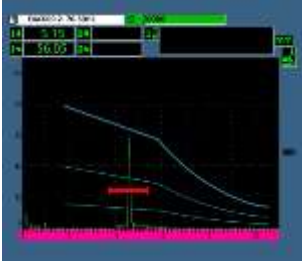
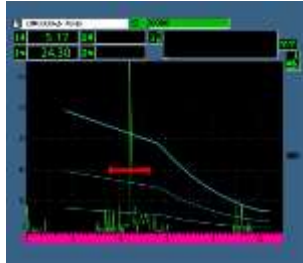

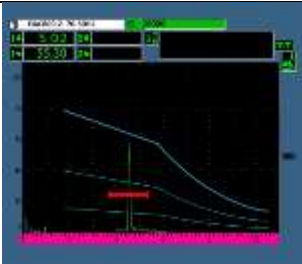

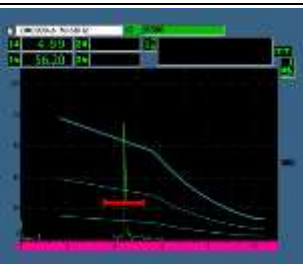
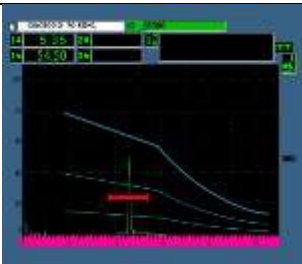

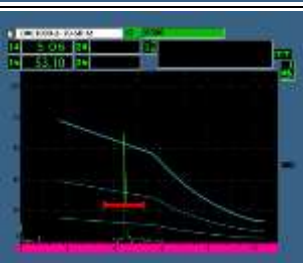
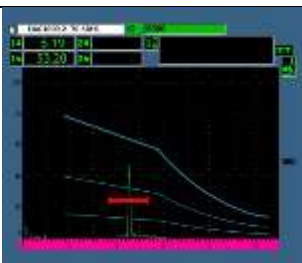


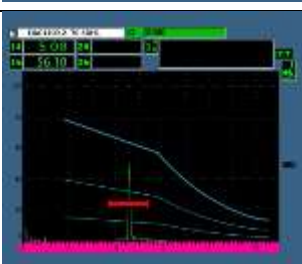

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องด้วยเส้น DAC สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง

	อุณหภูมิในการอบ	SDH 2.5	SDH 1.0	Lack of Fusion
DAC 5 MHz 70 องศา ชิ้นงาน เหล็ก กล้า คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			

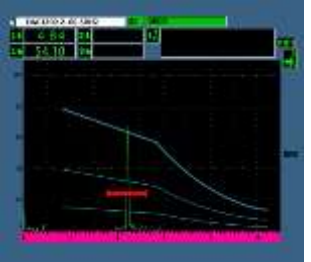
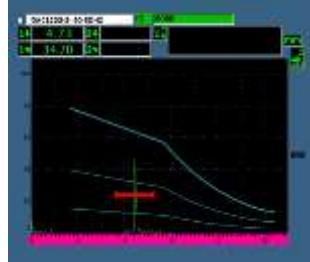
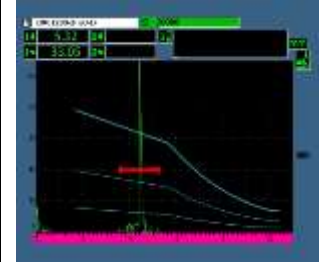
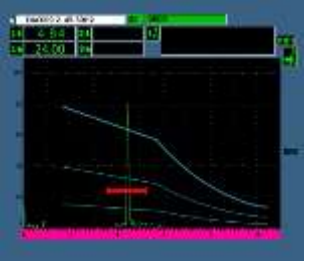
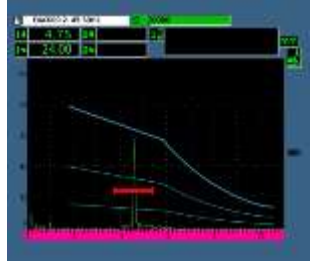
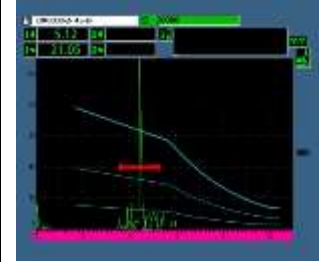
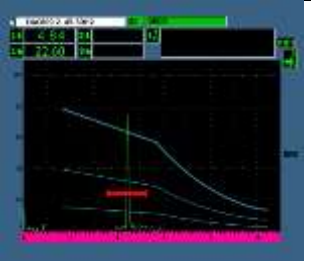
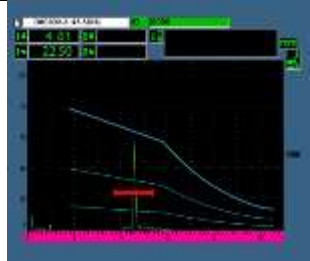
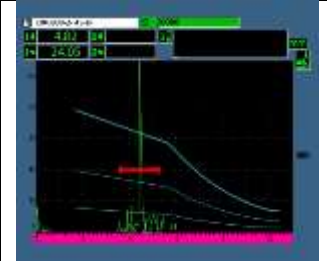

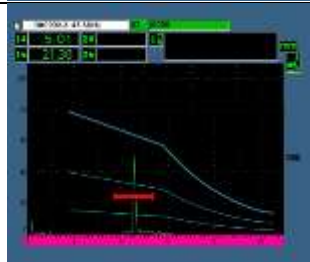
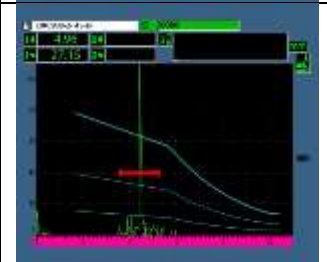

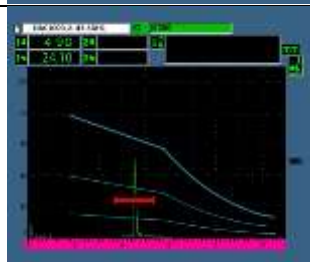
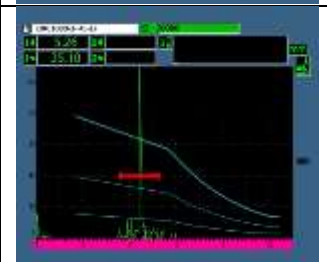

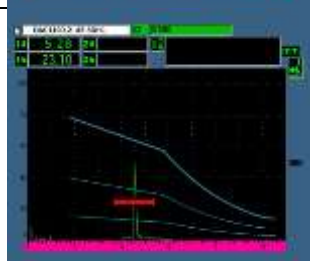
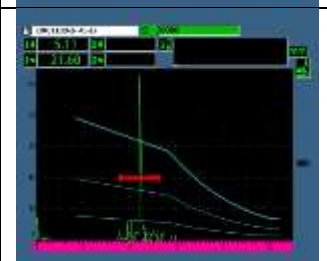

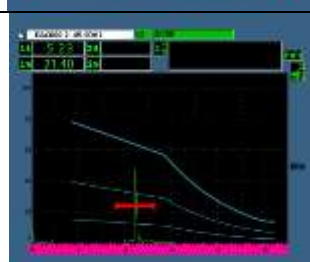
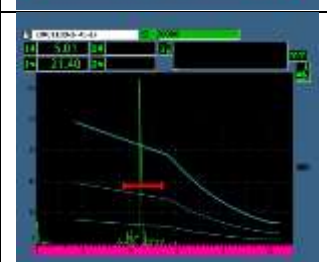
	1200			
	0			
	800			
DAC 5 MHz 60 องศา ชิ้นงาน เหล็กกล้า คาร์บอน	900			
	1000			
	1100			

	1200			
DAC 5 MHz 45 องศา ขึ้นงาน เหล็กกล้า คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			

	1200			
DAC 2 MHz 70 องศา ขึ้นงาน เหล็ก กล้า คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			



	1200			
DAC 2 MHz 60 องศา ขึ้นงาน เหล็กกล้า คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			

	1200			
DAC 2 MHz 45 องศา ชั้นงาน เหล็กกล้า คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200			

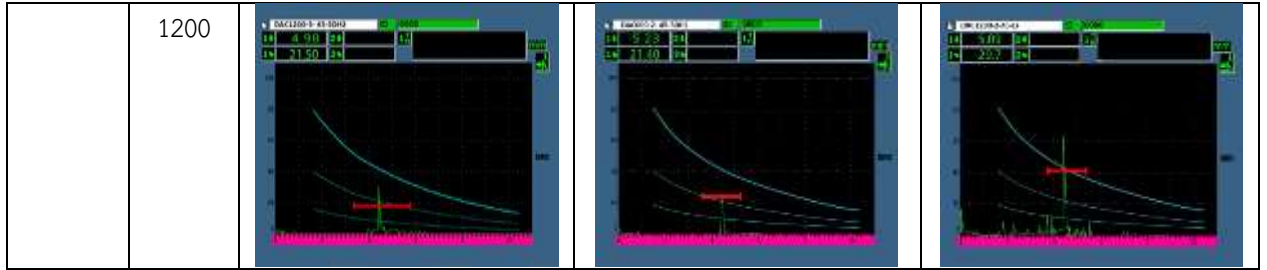
DAC 5 MHz 70 องศา ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200			
	DAC 5 MHz 60 องศา ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	0		

	800				
	900				
	1000				
	1100				
	1200				
	0				
	800				
	DAC 5 MHz 45 องศา ขึ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม				

DAC 2 MHz 70 องศา ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	900			
	1000			
	1100			
	1200			
	0			
	800			
	900			

DAC 2 MHz 60 องศา ชั้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	1000				
	1100				
	1200				
	0				
	800				
	900				
	1000				

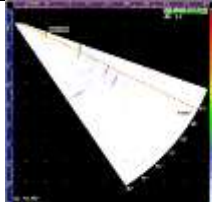
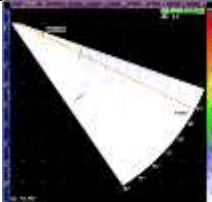
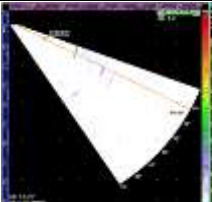
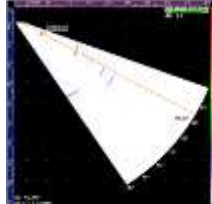
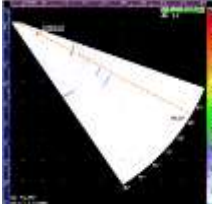
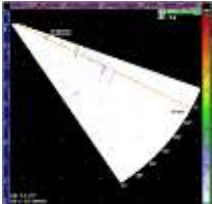
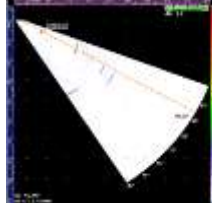
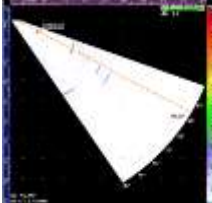
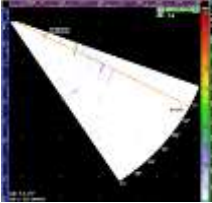
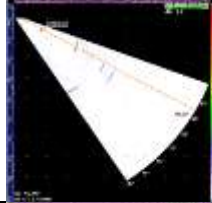
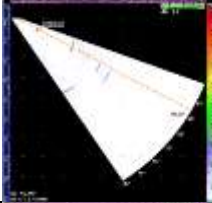
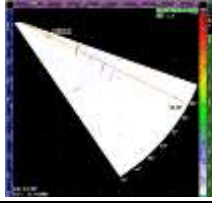
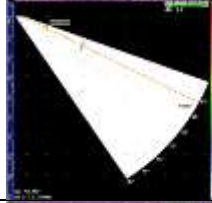
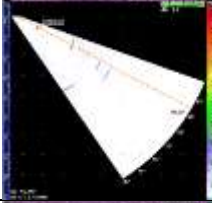
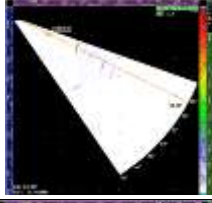
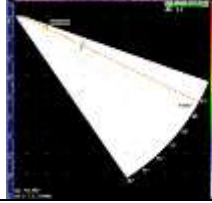
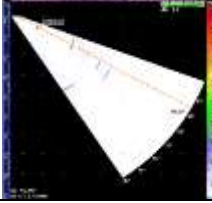
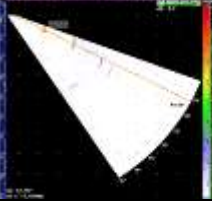
	1100			
	1200			
DAC 2 MHz 45 องศา ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1100			

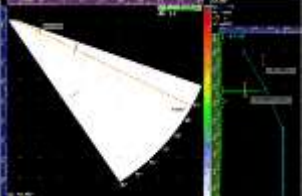
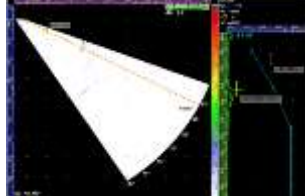
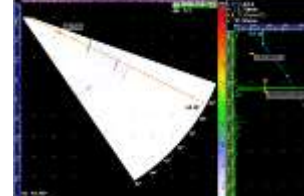
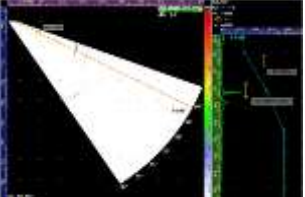
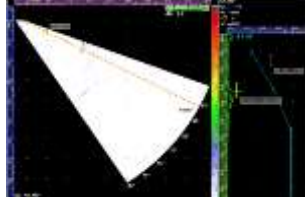
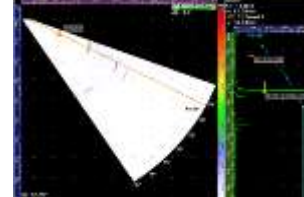
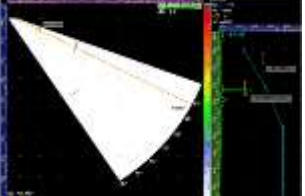
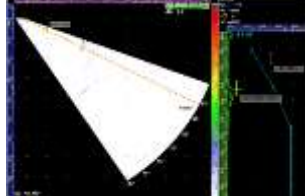
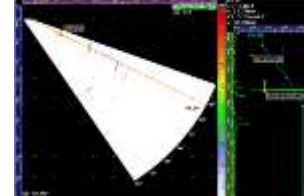
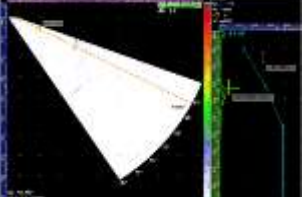
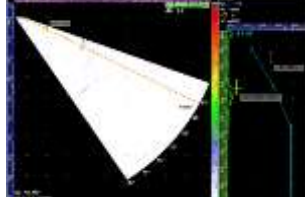
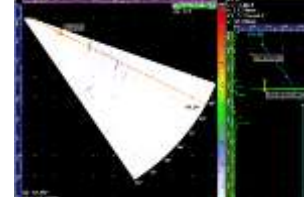
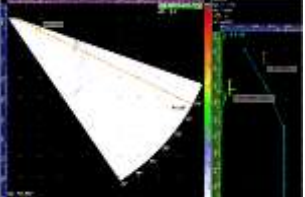
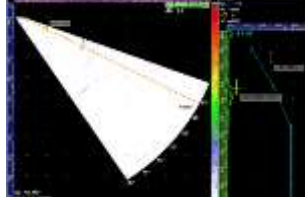
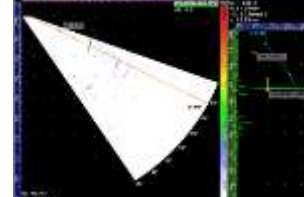
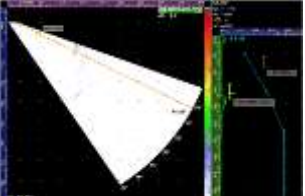
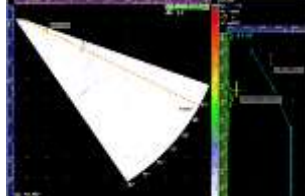
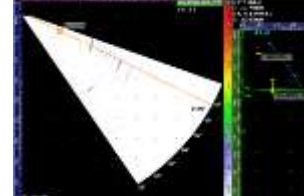


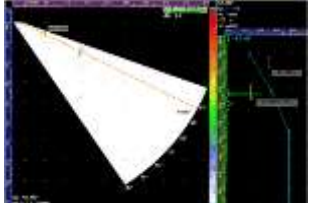
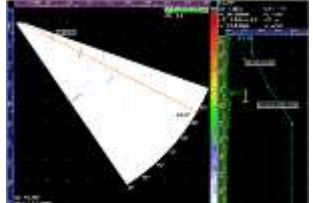
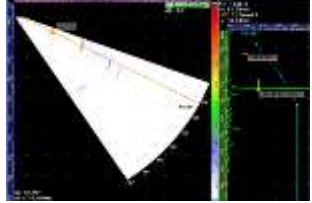
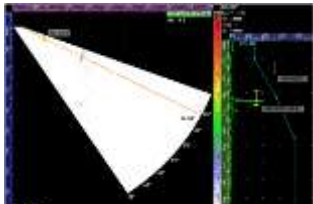
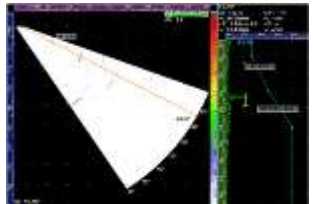
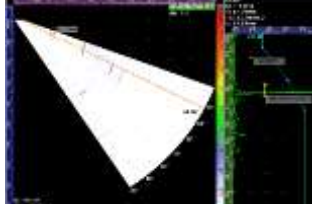
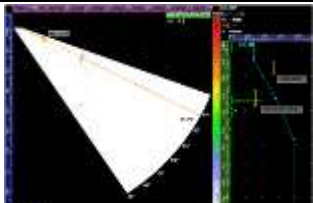
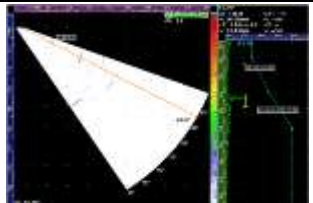
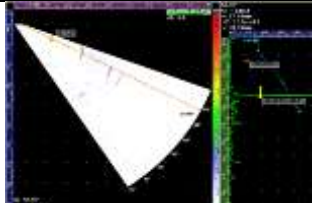
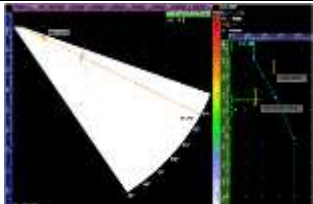
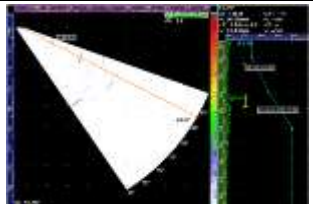
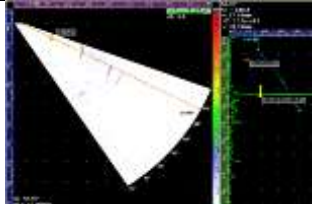
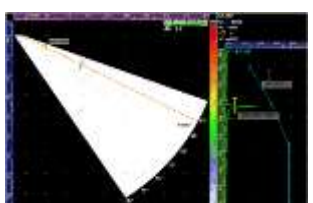
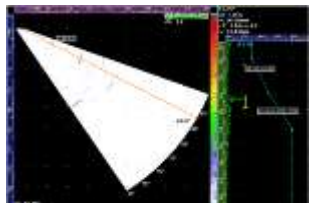
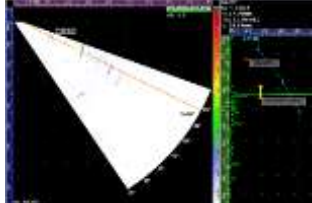
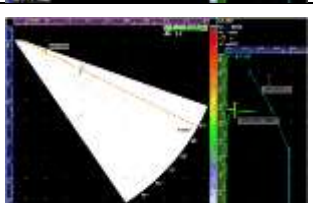
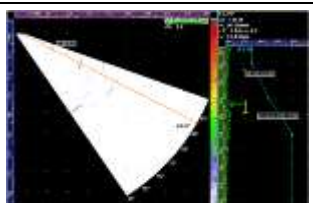
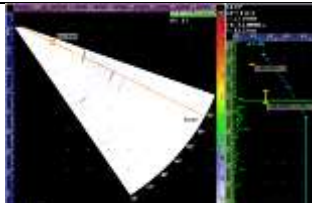


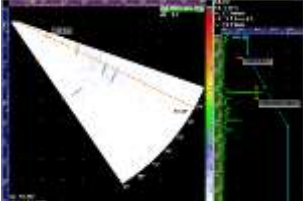
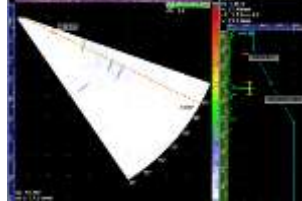
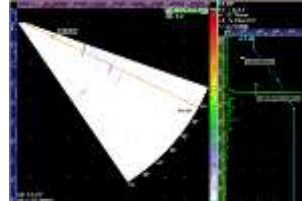
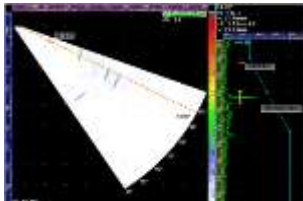
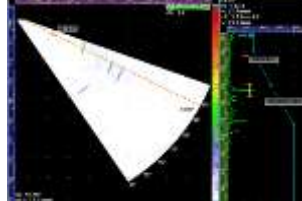
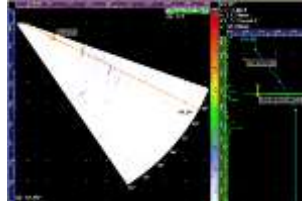
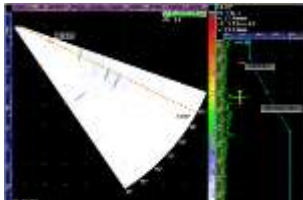
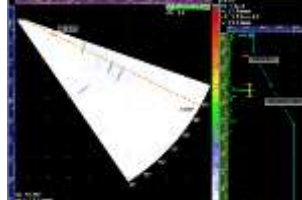
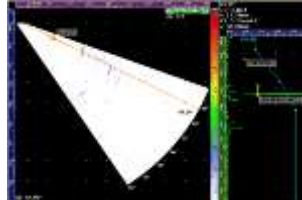
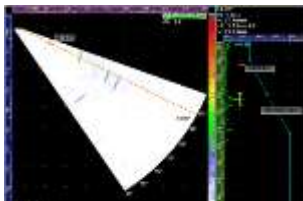
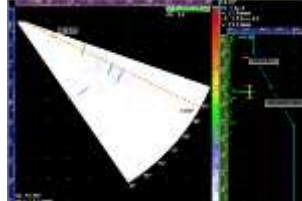
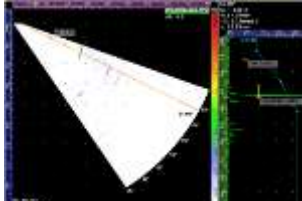
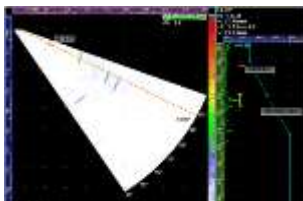
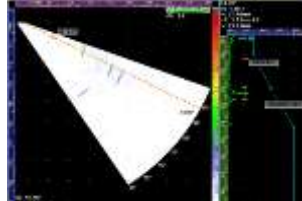
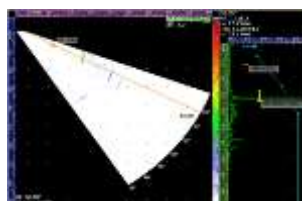
## ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1 ผลการทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องด้วย TCG สำหรับการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเรียงเฟส

	อุณหภูมิในการอบ	SDH 2.5	SDH 1.0	Lack of Fusion
TCG ชิ้นงาน คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200			

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5	SDH 1.0	Lack of Fusion
TCG ชิ้นงาน เหล็กกล้า ไร้สนิม	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200			

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5	SDH 1.0	Lack of Fusion
TCG ชิ้นงาน คาร์บอน	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200			

	อุณหภูมิ ในการ อบ	SDH 2.5	SDH 1.0	Lack of Fusion
TCG ชิ้นงาน เหล็ก กล้าไร้ สนิม	0			
	800			
	900			
	1000			
	1100			
	1200	