



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นในแท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน

Effect of microstructure of materials on the wave properties in standard calibration blocks for ultrasonic test on aerospace components

คณะผู้วิจัย

นายสุธรรม	ศิวารุธ
นายใหม่	น้อยพิทักษ์
นายธีรยุทธ	กาญจนแสงทอง

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณะผู้วิจัย : นายสุธรรม ศิวารุ
นายใหม่ น้อยพิทักษ์
นายธีรยุทธ กาญจนแสงทอง
ชื่องานวิจัย : ผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นใน
แท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วน
อากาศยาน
หน่วยงาน : สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่อุตสาหกรรม 4.0 โดยมีแนวทางการพัฒนากลุ่มอุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ของประเทศเพื่อให้มีทักษะเทคโนโลยีที่ทันสมัย สามารถเข้าแข่งขันกับนานาชาติได้ ซึ่งปัจจุบันทางกลุ่มมหาวิทยาลัยราชวมงคลได้ดำเนินการสร้างหลักสูตรฝึกอบรมช่างซ่อมบำรุงอากาศยาน มาตรฐาน EASA ขึ้น นอกจากนั้นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายถือเป็นหลักสูตรหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงอากาศยาน ซึ่งกระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายนี้จำเป็นต้องมีองค์ความรู้และเครื่องมือที่ค่อนข้างมีราคาสูง จำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์พื้นฐานผลิตใช้เองภายในประเทศ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นเสียงในแท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน โดยวัสดุทดสอบสมบัติการลดทอนคลื่นเสียง คือ เหล็กกล้า S45C SS400 และ SUS304 ทำการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโดยมีหัวส่งสัญญาณความถี่ตั้งแต่ 2MHz 5MHz และ 10 MHz จากนั้นนำวัสดุทดสอบมาผ่านกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ การอบชุบแข็ง การอบคืนตัว และการอบปกติ การทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบกับแท่งสอบเทียบมาตรฐาน IIW TYPE V1 นำเข้าจากต่างประเทศ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

วัสดุทดสอบ SS400 มีการลดทอนคลื่นเสียงที่ใกล้เคียงกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศมากที่สุดทุกความถี่ของหัวส่งสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปผลิตในการสร้างแท่งสอบเทียบมาตรฐานต้นแบบ ในขณะที่ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุทดสอบต้นแบบพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ให้ค่าความแข็งต่ำกว่าวัสดุอื่นทั้งก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน นอกจากนั้นโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคทั้งก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อนเมื่อเทียบกับวัสดุทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

คำสำคัญ : โครงสร้างจุลภาค การทดสอบโดยไม่ทำลาย แท่งสอบเทียบมาตรฐาน การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง

Name : Mr.Sutham Siwawut
Mr.Mai Noipitak
Mr.Teerayut Kanchanasangtong
Research : Effect of microstructure of materials on the wave properties in
Title standard calibration blocks for ultrasonic test on aerospace
components
Organization : Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Krungthep

Abstract

Now, Thailand is entering the 4.0 industry. There is guidelines to develop the country's aviation and logistics industry in order to have modern technology skills and able to compete with the international, so the group of Rajamangala University has been creating the EASA standard aircraft maintenance technician training course. However, Non-destructive testing is an important course in the inspection process for aircraft maintenance, which needs to know to require knowledge and the expensive tools. In addition, it needs to develop technology, basic equipment, produced for the nation use.

This research aimed to study the effect of microstructure of materials on the wave properties in standard calibration blocks for ultrasonic test on aerospace components. The testing materials for attenuation property of sound waves are S45C SS400 carbon steels and SUS304 austenitic stainless steel by the ultrasonic testing. Whereas, there had used the ultrasonic probe such 2-10 MHz to measuring after that the materials were carried out the heat-treatment process and hardness testing. Finally, the all results from experiment were compared with the V1 IIW type 1 calibration block imported from abroad. The experimental results can be summarized as follows.

It was found that the SS400 carbon steel has had the attenuation property of sound waves, which closes to the same with calibration block on every conditions of examination significantly. Hence, it be suitable to be produced for the prototypical standard calibration block. As, the result of hardness testing for the SS400 carbon steel showed lower hardness than other materials both before and after the heat treatment process. Furthermore, the microstructure of SS400 carbon steel does not effect of microstructure change both before and after the heat-treatment process. When it was compared with S45C carbon steel, which there has changed clearly.

Keywords: microstructure, nondestructive testing, standard calibration block, ultrasonic testing

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สถาบันการวิจัยและพัฒนา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2562 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนิน การไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสดำเนินการวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุธรรม ศิวารุช
ใหม่ น้อยพิทักษ์
ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน	3
2.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT)	6
2.3 ทฤษฎีกระบวนการอบชุบ	8
2.4 ทฤษฎีอัลตราโซนิก	11
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน	16
2.6 ทฤษฎีการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานทดลองงานวิจัย	26
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	27
3.2 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)	32
3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์งานวิจัย	35
4.1 ผลการตรวจสอบความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งมาตรฐานสอบเทียบ IIW TYPE V1	35
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเกรนของวัสดุต้นแบบ	37
4.3 อิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ส่งผลโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่น	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก ก	59

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400	3
2.2	คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C	4
2.3	คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	5
2.4	การใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับวัสดุเชิงประกอบ	6
2.5	ความหนาแน่นและชนิดของวัสดุที่ส่งผลต่อความเร็วคลื่น	7
2.6	ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและคลื่นเสียงตามขวาง	13
2.7	รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวจสอบที่เป็นหลัก	19
3.1	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)	29
4.1	ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การใช้งานแท่งสอบเทียบมาตรฐาน	8
2.2 ลักษณะคลื่นเสียงตามยาว	12
2.3 ลักษณะคลื่นเสียงตามขวาง	12
2.4 แท่งสอบเทียบมาตรฐาน V1	14
2.5 แท่งสอบเทียบมาตรฐาน V2	14
2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	17
2.7 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา	17
2.8 เครื่องอัดขึ้นงานขึ้นรูปแบบร้อน	18
2.9 การขัดกระดาษทราย	18
2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	20
2.11 ชิ้นงานเชื่อม	22
2.12 การทดสอบการลดทอนและการหาค่าความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูง	22
2.13 ชิ้นส่วนหลักของจรวด	23
2.14 เครื่องมือทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงและชิ้นงานสอบเทียบมาตรฐาน IIW Block	23
2.15 ทดสอบการยึดเกาะผิวอลูมิเนียม วิธี Pull off Test	24
3.1 ขั้นตอนแนวคิดของโครงการวิจัย	26
3.2 หลักการทำงานของกล้องอัลตราโซนิก	27
3.3 การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	28
3.4 เครื่อง Optical Emission Spectrometer	28
3.5 การตัดวัสดุด้วยเครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ	29
3.6 การวัดความสูงของวัสดุด้วยเวอร์เนียไฮเกจ	30
3.7 ขนาดของวัสดุในการทดลอง	30
3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค	31
3.9 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบ (Quenching)	32
3.10 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบ (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering)	33
3.11 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบคืนตัว (Normalizing)	33
3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส	34
4.1 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 2 MHz	35
4.2 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 5 MHz	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 10 MHz	36
4.4 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐาน IIW TYPE V1	37
4.5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400	38
4.6 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C	38
4.7 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าโรสนิมเกรด SUS304	39
4.8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 2 MHz	39
4.9 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 5 MHz	40
4.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 10 MHz	40
4.11 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400	41
4.12 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 2 MHz	42
4.13 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 5 MHz	42
4.14 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 10 MHz	43
4.15 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C	43
4.16 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 2 MHz	44
4.17 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 5 MHz	44
4.18 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 10 MHz	45
4.19 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าโรสนิม SUS304	46
4.20 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing)	47
4.21 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านการชุบแข็ง (Quenching)	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านการชุบแข็ง (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering)	48
4.23 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 2 MHz	49
4.24 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 5 MHz	50
4.25 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 10 MHz	50
4.26 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing)	51
4.27 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 2 MHz	51
4.28 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 5 MHz	52
4.29 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 10 MHz	52
4.30 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งตามความถี่ต่างๆ	53
4.31 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 2 MHz	53
4.32 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 5 MHz	54
4.33 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 10 MHz	54
4.34 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวตามความถี่ต่างๆ	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่ยุคของประเทศไทย 4.0 โดยมีการกำหนดกลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมายของประเทศหลัก 10 S-Curve ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมเดิมที่มีประสิทธิภาพ 5 อุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมในอนาคตอีก 5 อุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องนำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาช่วยในการดำเนินกิจกรรมทางธุรกิจ ดังนั้นประเทศไทยจำเป็นต้องมีการสร้างผู้ประกอบการและบุคลากรเพื่อช่วยสนับสนุนอุตสาหกรรมดังกล่าว เพื่อให้มีทักษะเทคโนโลยีที่ทันสมัยสามารถแข่งขันกับนานาชาติได้

หนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าสนใจและควรส่งเสริม พัฒนาบุคลากรให้มีความรู้เป็นอย่างดี เพื่อสามารถช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมหลักที่มีศักยภาพเช่น อุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) ซึ่งปัจจุบันทางกลุ่มมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ได้ดำเนินการสร้างหลักสูตรฝึกอบรมช่างซ่อมบำรุงอากาศยาน มาตรฐาน EASA Part 66 (CAT B1.1 และ CAT B2) ขึ้น นอกจากนี้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายถือเป็นหลักสูตรหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงอากาศยาน ซึ่งกระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายนี้จะมีความรู้และเครื่องมือที่ค่อนข้างมีราคาสูง เนื่องจากเป็นมาตรฐานระดับสากลและส่งผลต่อความปลอดภัยของการซ่อมบำรุงอากาศยาน โดยแนวทางการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์พื้นฐานใช้เองภายในประเทศเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงอย่างยิ่ง การทดสอบโดยไม่ทำลายในอากาศยานเป็นงานเฉพาะด้านที่ยังขาดแคลนบุคลากรและเทคโนโลยีภายในประเทศ ซึ่งขึ้นส่วนอุปกรณ์การตรวจสอบต่างๆต้องนำเข้าจากภายนอกประเทศเกือบทั้งหมด และบุคลากรภายในประเทศโดยมากเป็นเพียงผู้ใช้เท่านั้น

ดังนั้นคณะผู้ดำเนินการจึงเล็งเห็นประโยชน์ของการสร้างองค์ความรู้และการสร้างอุปกรณ์พัฒนาเทคโนโลยีจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงประเทศเพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรมศักยภาพ โดยงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นในแท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถให้กับประเทศไทยได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นเสียง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุแห่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นในแห่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ แท่งวัสดุตามมาตรฐานสอบเทียบ
- 1.3.2 กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค โดยใช้กระบวนการทางโลหะวิทยาและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์
- 1.3.3 การตรวจสอบการแพร่กระจายของคลื่นเสียงด้วยกระบวนการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างระบบกลุ่มนักวิจัยความร่วมมือระหว่างความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านที่สอดคล้องกันเพื่อการผลิตชิ้นส่วนมาตรฐานสอบเทียบ (Standard and calibration blocks) ตามมาตรฐานสากลทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ
- 1.4.2 สามารถนำไปต่อยอดสร้างต้นแบบแห่งมาตรฐานสอบเทียบในงานตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงที่ใช้เทคโนโลยีภายในประเทศ
- 1.4.3 สามารถต่อยอดพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนมาตรฐานและอุปกรณ์อื่นๆในงานทดสอบโดยไม่ทำลายต่อไปในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) คือโลหะผสมชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักคือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย เหล็กกล้าเป็นวัสดุโลหะที่ไม่ได้มีอยู่ตามธรรมชาติแต่ถูกผลิตขึ้นโดยฝีมือมนุษย์และเครื่องจักร โดยต้องอยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงเหล็ก (Fe/iron) ให้มีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้น อย่างไรก็ตามโครงการงานวิศวกรรมนี้ได้พิจารณาเอาเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าไร้สนิมมาเป็นวัสดุทดลองในงานวิจัย โดยเหล็กกล้าแต่ละชนิดมีข้อมูลจำเพาะและรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)

เป็นเหล็กกล้าที่นำมาใช้งานทั่วไป จึงมีการนำมาใช้มากที่สุด คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กมีผลอยู่ประมาณ 0.05% - 0.35% เมื่อธาตุคาร์บอนมีผลอยู่น้อยทำให้มันมีความแข็ง และความแข็งแรงไม่มาก ตัวเหล็กกล้าสามารถนำมาแปรรูปด้วยเครื่องมือกล เช่น กลึง, กัด, ใส ได้ง่ายคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีดังนี้

- มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.05-0.35%
- มีความแข็งแรงน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอื่น ๆ
- มีความแข็งน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอื่น ๆ
- แปรรูปและขึ้นรูปผ่านเครื่องมือกลได้ง่าย
- ราคาถูกกว่าเหล็กกล้าอื่น ๆ
- ผลิตออกมาใช้งานมากที่สุด

โดยวัสดุที่เลือกใช้จากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประเภทนี้คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 (มาตรฐาน JIS SS400) เป็นหนึ่งในเกรดเหล็กพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอย่างสูงสุด ได้รับความนิยมในการใช้งานด้าน โครงสร้างต่างๆ จำหน่าย ในรูปแบบของ แผ่น แผ่นตัด แผ่นบาง ท่อน้ำ โปรไฟล์ เนื่องจากด้วยราคาที่ถูกลงและความสามารถในการเชื่อมประกอบกับง่ายต่อการตัดกลึงทำให้ได้รับการยอมรับในหลากหลายการใช้งาน คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 มีดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400

Density	7860 kg/m ³
Young's Modulus	190-210 GPa
Tensile Strength	400 - 510 MPa
Yield Strength	205-245 MPa
Poisson's ratio	0.26

2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กประมาณ 0.35% ถึง 0.50% เมื่อเหล็กกล้าชนิดนี้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อน (Heat treatment) แล้ว มันค่อนข้างจะแข็ง และแข็งแรง เหล็กกล้าชนิดนี้มักจะนำไปทำการการตีขึ้นรูป (Forgings) ตัวอย่างการนำไปใช้งานอาทิเช่น ประแจขันสลักเกลียวต่างๆ, แกนล้อ, แกนเพลลา, เพลลาข้อเหวี่ยง (Crankshafts) และเฟือง ฯลฯ คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีดังนี้

- มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.35% ถึง 0.50%
- มีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการปรับสภาพทางความร้อน
- มีราคาที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

โดยวัสดุที่เลือกใช้จากเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางประเภทนี้คือ S45C (มาตรฐาน JIS S45C) เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความต้านทานแรงกระแทกและแรงกระแทกเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงจึงมีความต้านทานแรงดึงสูงความเหนียวและการต้านทานการสึกหรอสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับการเชื่อมหรือขึ้นรูป เหล็กประเภทนี้ตัวอย่างการนำไปใช้งานอาทิเช่น สลักเกลียว เพลาลูกกลิ้ง ลูกกลิ้ง สปริง ล้อเฟรมแท่ง ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ฯลฯ คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C มีดังนี้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C

Tensile strength	$\geq 58 \text{ kgf / mm}^2$
Strength	$\geq 35 \text{ kgf / mm}^2$
Elongation	$\geq 20 \%$
Cross-sectional reduction rate	$\geq 45 \%$
Hardness	167 ~ 229 Hb

2.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิม

เป็นโลหะผสม (Ferrous alloy) ระหว่างเหล็กกับสารหลายที่สามารถทนการกัดกร่อน และ ทนสนิมทั้งจากธรรมชาติและจากสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์สร้างขึ้น สแตนเลส แบ่งออกได้มากกว่า 150 ชนิด แต่สามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ 8 กลุ่มด้วยกันขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุต่างๆ ที่ทำให้มีคุณสมบัติบางอย่างที่แตกต่างกันไป การเลือกใช้ต้องพิจารณาจากคุณสมบัติ และความเหมาะสมของงานด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมมีส่วนผสมหลักคือ โครเมียม (Chromium) ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อน และนิเกิล (Ni) มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง โครเมียมป้องกันการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) เป็นโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide film : CrO_2 หรือเรียกว่า Passive film) ซึ่งเป็นฟิล์มบางมาก ติดแน่นที่ผิวของเหล็กกล้า ถ้าฟิล์มนี้ถูกทำลายจากแรงกล สารเคมี หรือ

ออกซิเจน จะถูกสร้างทดแทนขึ้น ใหม่ด้วยตัวเอง เหล็กกล้าไร้สนิมต้องมีโครเมียม (Chromium) ผสมอยู่ อย่างน้อย 10.5% และอาจมีส่วนผสมอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน เช่น โมลิบดีนัม (Molybdenum) และไนโตรเจน (nitrogen) ซึ่งช่วยจัดการเกิดการกัดกร่อนประเภทรูเข็มและมุมอับ ทองแดง (Copper) จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม มักบอกเป็นสัดส่วน เช่น สเตนเลส 18/8 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มี โครเมียม 18% และนิกเกิล 8% คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมมีดังนี้

- สามารถใช้ในสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อนได้ (Corrosive Environment)
- เหมาะสำหรับงานอุณหภูมิเย็นจัดเพราะสามารถป้องกันการแตกเปราะ
- เหมาะสำหรับการใช้งานอุณหภูมิสูง (High temperature) เพราะป้องกันการเกิดคราบ

ออกไซด์ (Scale) และยังคงความแข็งแรงไว้ได้

- มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับมวล (High strength vs. mass)
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการสุขอนามัย (Hygienic condition) และความสะอาดสูง
- เหมาะสำหรับงานด้านสถาปัตยกรรม (Aesthetic appearance) เพราะไม่เป็นสนิม ไม่

ต้องทาสี

- ไม่ปนเปื้อน (No contamination) ป้องกันการทำ ปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยา
- ต้านทานการขัดถูแบบเปียก (Wet abrasion resistance)

โดยวัสดุที่เลือกใช้จากเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางประเภทนี้คือ SUS304 (มาตรฐาน JIS SUS304) เป็นสเตนเลสที่มีสารโครเมียมอยู่ 18% และนิกเกิลอยู่ 8% ซึ่งจะไม่มีการโมลิบดีนัม, มีคาร์บอน ต่ำ ทนการกัดกร่อนต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (Corrosion) เนื่องจากมีสารนิกเกิลจึงทำให้แม่เหล็กดูดไม่ ติด คาร์บอนต่ำจึงมีความเหนียวสูง สามารถใช้กับการปั๊มขึ้นรูปต่างๆ ได้ เช่น การทำอ่างซิงค์หรือภาชนะ ในครัวต่างๆ เพราะสามารถทนความร้อนได้ดี เช่น หม้อ กระทะ เป็นต้น คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้า ไร้สนิม SUS304 มีดังนี้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

Tensile strength	$\sigma_b \geq 520 \text{ MPa}$
Elongation rate	$\geq 40 \%$
Shrinkage	$\geq 60 \%$
Hardness	$\leq 187\text{HBW} \leq 90\text{HRB} \leq 200\text{HV}$
Density	$7.93 (20^\circ\text{C}, \text{g}/\text{cm}^3)$
Melting point	$1398 \sim 1454 \text{ }^\circ\text{C}$
Long elastic modulus	$193 (20^\circ \text{C}, \text{KN}/\text{mm}^2)$

2.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT)

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับจำแนกและแยกแยะความเสียหายบริเวณผิวและภายในชิ้นงานโดยไม่ต้องตัดหรือทำลายชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ ปัจจุบัน NDT ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านวัสดุเชิงประกอบในงานด้านต่างๆ เช่น การผลิตท่อ การผลิตถัง อุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมการทหาร อุตสาหกรรมนิวเคลียร์ เป็นต้น เทคนิคที่ถูกใช้ในการตรวจสอบวัสดุเชิงประกอบหลักๆ ประกอบด้วย การทดสอบด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic testing; UT), การตรวจวัดค่าความร้อน (Thermographic testing), การตรวจสอบความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Thermography Testing; IR Test), การตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic testing; RT), การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual testing; VT), การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียง (Acoustic emission testing; AE), การตรวจสอบด้วยกล้อง (Optical testing), การตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic testing), การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid penetrant testing; PT), การตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic particle testing; MT) [1] เป็นต้น โดยกระบวนการตามเทคนิคต่างๆ สามารถตรวจสอบลักษณะของความเสียหายของวัสดุเชิงประกอบได้แตกต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับวัสดุเชิงประกอบ [2]

NDT Method	Porosity	Laminate Delamination and Disbond	Skin-to-Core Disbond	Cracks	Surface Damage	Water Ingress	Wrinkles
Visual					R		R
Tap test		L	R				
Ultrasound TTU	R	R	R			R	
Ultrasound PE	R	R		L			R
Bond testers		R	R			L	
Radiography	L	L		R		R	L
Thermography	L	R	R			R	
Shearography	L	R	R			L	L
Electromagnetic		L		L			
Acoustic emission*		R		R			

R: recommended; L: limited applicability.

* Requires loading of the structure.

โดยเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจและใช้ในการตรวจสอบในอุตสาหกรรมซ่อมบำรุงอากาศยาน คือ เทคนิคการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง

การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Test; UT)

เป็นการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโดยการส่งและรับสัญญาณคลื่นความถี่สูง แล้วนำมาวิเคราะห์สัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น R.H. Bossi และ V. Giurgiutiu [3] กล่าวถึงการแบ่งเทคนิคการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงออกเป็นเทคนิคต่างๆ ดังนี้

UT: shear wave ultrasonic testing

AUT: automated ultrasonic testing
 PAUT: phased array ultrasonic testing
 TOFD: time of flight diffraction ultrasonic testing
 GWUT: guided wave ultrasonic testing
 LGWUT: long-range guided wave testing
 SWUT: surface wave ultrasonic testing technology

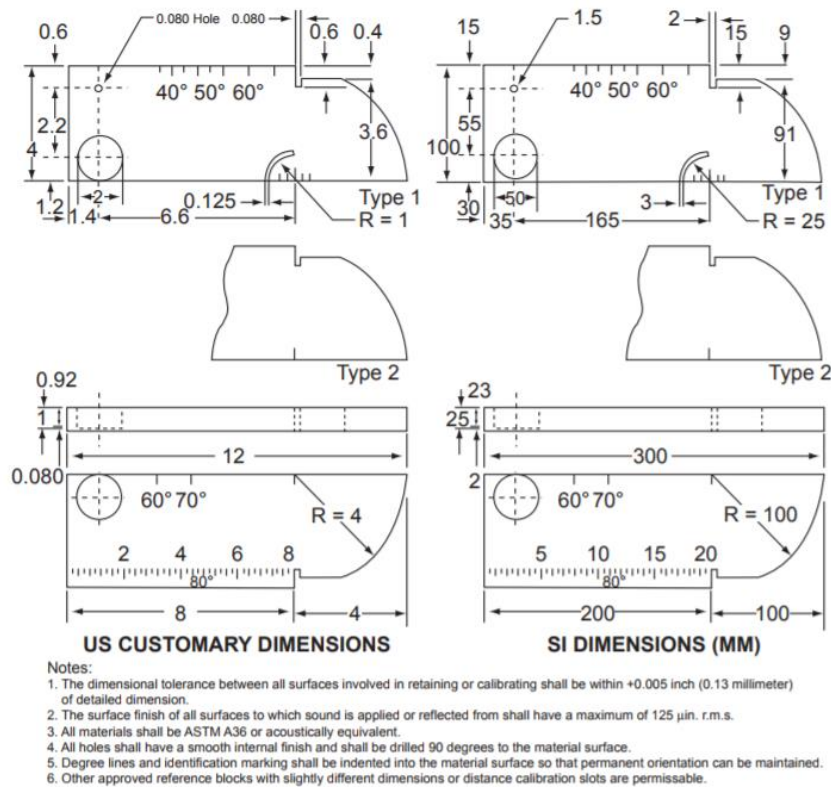
ซึ่งในเทคนิคการตรวจสอบต่างๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้ผู้มีทักษะ ความสามารถในการตรวจสอบ

2.2.1 อิทธิพลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณคลื่น

โดยทั่วไปการตรวจสอบความเสียหายด้วยคลื่นความถี่สูง เป็นการส่งสัญญาณ ผ่านวัสดุซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวกลางในการเคลื่อนที่จะส่งผลต่อความเร็วและมุมในการสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 2.5 ดังนั้นอิทธิพลหลักที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคือชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบ ความหนาแน่น ขนาดของเกรน สมบัติความเป็นออสติกของวัสดุ ดังนั้นในการตรวจสอบชิ้นงานชนิดต่างๆ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเครื่องมือด้วยชิ้นงานที่เป็นมาตรฐานเสมอ ซึ่งในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงนี้จะมีแท่งสอบเทียบมาตรฐาน เรียกว่า Standard calibration blocks ลักษณะดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.5 ความหนาแน่นและชนิดของวัสดุที่ส่งผลต่อความเร็วคลื่น [3]

Material	Density g/cm ³	Longitudinal Velocity	
		cm/μSec	
Air	0.001	0.033	738
Water	1.00	0.149	3,333
Plastic (Acrylic)	1.18	0.267	5,972
Aluminum	2.8	0.625	13,981
Steel		0.56	
Cast Iron		0.35 to 0.56	
Mercury	13.00	0.142	3,176
Beryllium	1.82	1.28	28,633



รูปที่ 2.1 การใช้งานแท่งสอบเทียบมาตรฐาน [3]

2.3 ทฤษฎีกระบวนการอบชุบ

กระบวนการอบชุบที่ใช้ในการทดลองมี 3 กระบวนการตามวัสดุแต่ละชนิด ดังนี้

2.3.1 กระบวนการอบปกติ (Normalising)

กรรมวิธีการอบเหล็กอีกวิธีหนึ่ง ที่ช่วยให้อะตอมของเหล็กเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ พร้อมกับทำให้เกรนเหล็กที่หยาบกลายเป็นเกรนละเอียด เมื่อพิจารณาจะรูปคำศัพท์จะเห็นได้ว่า Normal หมายถึงปกติ ดังนั้น Normalizing จึงเป็นวิธีการที่จะทำให้เหล็กที่มีโครงสร้างจุลภาคที่ผิดปกติให้กลับเป็นปกติ ดังนั้นการทำ Normalizing จึงเป็นการทำให้เหล็กร้อนขึ้นจนเนื้อเหล็กทั้งหมดกลายเป็นสารละลายของแข็ง จากนั้นจึงทำให้เย็นลง ในกรณีของเหล็กเหนียวคาร์บอนชนิดส่วนผสม Hypoeutectoid ระดับอุณหภูมิของเหล็กจะอยู่ที่ 50-60°C เหนือ Ac_m และเหล็กเหนียวคาร์บอนชนิด Hyper eutectoid จะทำการอบที่ 50-60°C เหนือ Ac_m การอบแช่จะใช้ระยะเวลาเพียง สั้นๆ พอที่จะทำให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกของเนื้อเหล็ก จากนั้นจะปล่อยในอากาศ ทำให้วิธีการนี้เหมาะสมกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กเหนียวคาร์บอนที่ผ่านการหล่อขึ้นรูป รีดร้อน หรือ พุขึ้นรูป (ทั้งการขึ้นรูป Open die และ Closed die) เท่านั้น ไม่เหมาะสมกับ Tool steel และ High alloy steel การขึ้นรูปด้วยวิธีการดังกล่าวที่ระดับอุณหภูมิสูงมาก จึงมีผลทำให้เกรนของเนื้อเหล็กหยาบและมี

Toughness ต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน การทำ Normalizing จะทำให้อัตราการลดอุณหภูมิของ Austenite ลดลงค่อนข้างรวดเร็วด้วยอากาศ ทำให้ Austenite เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ระดับอุณหภูมิต่ำ Ferrite-Cementite ที่แยกออกมาจาก austenite จึงเป็นแถบที่ละเอียดและกระจายตัวมากกว่าการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ การลดอุณหภูมิลงค่อนข้างเร็วนี้จะมีผลทำให้ Ferrite ในเหล็ก Hypoeutectoid และ Cementite ในเหล็ก Hypereutectoid แยกตัวออกมาได้น้อยลง จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กเหนียวคาร์บอนที่ผ่านการทำ Normalizing สูงกว่าการทำ Anneal นอกจากนี้การที่ Grain ของเหล็กละเอียดมากขึ้น มีผลทำให้ Toughness ของเหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย วัตถุประสงค์การทำ Normalizing นั้นแตกต่างกันไปตามปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กเหนียว (Low carbon steel) การทำ Normalized จะทำได้ง่ายกว่าการ the Annealed ในเหล็กมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ผิวเหล็กจากการตัด-ปอกขนาดด้วยเครื่องจักรมีความเรียบร้อยสวยงามดีกว่าการ Annealed ในเหล็กเหนียว Medium carbon steel การ Normalizing จะใช้แทนการชุบแข็งและ Tempered ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เหล็ก Medium carbon steel ไม่เกิดการบิดงอหรือเป็นคลื่น ดังเช่นที่เกิดในการชุบแข็ง ส่วนการทำ Normalized ให้กับเหล็กเหนียว High carbon steel เพื่อป้องกันการเกิดขึ้นของโครงข่าย Cementite (Cementite network) ในบริเวณขอบเกรนซึ่งจะ เกิดขึ้นได้ง่ายถ้าการลดอุณหภูมิเป็นการลดลงอย่างช้าๆ จากระดับอุณหภูมิเหนือเส้น Ac1

2.3.2 กระบวนการอบชุบ (Hardening)

การชุบแข็งเหล็กเหนียวคาร์บอน เป็นการเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเหล็กโดยการทำให้เกิดโครงสร้าง Martensite ในเนื้อเหล็กด้วยการลดอุณหภูมิ Austenite ลงสู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วมากๆ ในกรณีเหล็กเหนียวคาร์บอนการอบเหล็กให้เป็น Austenite จะนิยมปฏิบัติดังนี้คือ เหล็ก Hypoeutectoid จะทำการอบเหล็กให้เป็น Austenite ที่อุณหภูมิ 30-50°C เหนืออุณหภูมิ A3 ส่วนเหล็กเหนียว Eutectoid และ Hypereutectoid จะอบที่ 30-50°C เหนืออุณหภูมิ A จากนั้นจะทำการอบแช่ เพื่อให้เนื้อเหล็กเกิดความสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนทั้งส่วนผสมเคมี และระดับอุณหภูมิ เมื่อ Austenite มีความสม่ำเสมอแล้วจะทำการลดอุณหภูมิของเหล็กลงอย่างรวดเร็ว ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่มากกว่าอัตราการลดอุณหภูมิวิกฤติ (Critical cooling rate) การลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า การชุบ หรือ Quenching ในกรณีที่ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทำให้เกิดโครงสร้าง Martensite นี้ จะเรียกว่า การชุบแข็ง (Hardening by quenching) อัตราการลดอุณหภูมิมากกว่าอัตราการลดอุณหภูมิวิกฤตินี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อใช้สารชุบแข็ง (Quenching media) ซึ่งโดยมากจะเป็นของไหลที่อาจจะเป็นของเหลวหรืออากาศเป็นตัวกลางดึงความร้อนออกจากเหล็ก ในกรณีของเหล็กเหนียว คาร์บอนชนิด Medium Carbon steel จะนิยมใช้น้ำ ส่วนเหล็กเหนียว Alloy steel และ High carbon steel จะใช้น้ำมันหรืออากาศเป็นตัวกลางดึงความร้อน และ Alloy tool steel จะใช้อากาศแห้งที่ถ่ายเทความร้อนออกจากเหล็ก

เหล็กเหนียวแต่ละชนิดจะมีความสามารถรับการชุบแข็งได้ แตกต่างกันไป ทำให้เหล็กบางชนิดไม่สามารถชุบให้ความแข็งแรงของเหล็กเพิ่มสูงขึ้นได้เลย ด้วยวิธีการเดียวกันเหล็กบางชนิด

สามารถชุบให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่เหล็กบางชนิดหลังการชุบแข็งกลับทำให้เหล็กมีค่าความแข็ง
ทั้งนี้แล้วแต่ส่วนผสมของเนื้อเหล็ก ตัวอย่างเช่นเหล็ก Austenitic high manganese steel หลัง
การชุบจากระดับอุณหภูมิ 1050°C เนื้อเหล็กจะมีแต่ Austenite ทำให้เหล็กมี Toughness สูงมาก แต่
ถ้าปล่อยให้ลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ กลับทำให้เกิดโครงสร้าง Martensite และทำให้ความแข็งของเหล็ก
เพิ่มสูงขึ้นได้ ในกรณีทั่วไปทั้ง Carbon structural steel และ Alloy structural steel การชุบจาก
Austenite จะทำให้เกิด Martensite ในเนื้อเหล็กที่มีผลทำให้ความแข็งของเหล็ก เพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม
ก็ตามความแข็งที่เกิดขึ้นเมื่อวัดจากผิวเหล็กเข้าสู่ส่วนกลางความหนาของเหล็กจะมีระยะทางที่ แตกต่าง
กันไป เราเรียกคุณสมบัติที่เหล็กจะสามารถเกิดโครงสร้าง Martensite ได้ระยะทางลึกจากผิวมาก-น้อย
นี้ว่า Hardenability ซึ่งเหล็กที่มีคุณสมบัตินี้ดีมากๆจะสามารถชุบให้เกิดความแข็งได้ถึงศูนย์กลางความ
หนาหรือแนว ศูนย์กลางของชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ได้ดี ดังนั้นชิ้นงานแต่ละชิ้น แต่ละขนาดที่ต้องการ
ค่าความแข็งสูงๆ หลังการ ชุบจึงจำเป็นต้องเลือกใช้งานจากคุณสมบัติในด้าน Hardenability นี้

เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งแล้ว จะมีความเค้นตกค้างอยู่ภายในเนื้อเหล็ก ความเค้นดังกล่าวเป็น
ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Austenite ไปเป็น Martensite ทำให้เหล็กหลัง
การชุบแข็งเปราะและ แตกหักได้ง่าย (Brittleness) ดังนั้นจึงควรจะให้ความร้อนใหม่กับเหล็กอีกครั้งที่
ระดับอุณหภูมิต่ำๆ หลังการชุบลด อุณหภูมิทันที การให้ความร้อนอีกครั้งหลังการชุบแข็งเรียกว่า
Tempering ซึ่งจะมีผลทำให้เหล็กสามารถลดความ เค้นที่ตกค้างลงได้ โดยไม่ลดความแข็งลง การลด
ความเค้นตกค้างในเนื้อเหล็ก โดยการทำ Tempering นี้จะมีผลทำให้ Toughness และ ความแข็งแรง
ของเหล็กเพิ่มสูงขึ้น จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การทำ Tempering หลังการชุบแข็งนี้
มีความจำเป็นอย่างยิ่งกับเหล็กเครื่องมือที่ใช้ในการแปรรูปโลหะ ทั้งนี้เนื่องจาก เหล็กเครื่องมือจะต้องมี
ความแข็งสูงมากพอที่จะทนทานการเสียดสีและไม่เกิดการยุบตัวเมื่อใช้แรงกดเหล็กเครื่องมือ ดังกล่าวลง
บนผิวโลหะชิ้นงานที่ต้องการแปรรูป นอกจากนี้ยังจะต้องมี toughness สูง เพื่อให้สามารถรับแรง
กระแทกที่เกิดจากการใช้แรงในการแปรรูปโลหะชิ้นงานได้

2.3.3 กระบวนการอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กที่ถูกลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนเกิดโครงสร้าง Martensite ขึ้นในเนื้อเหล็ก อะตอม
ของคาร์บอนทั้งหมดจะแทรกในระหว่างอะตอมของเหล็ก ทำให้ Martensite ที่เกิดขึ้นเป็น High carbon
martensite การทำ Tempering จะทำให้ Martensite สลายตัว โดยอะตอมของคาร์บอนจะแพร่
อะตอม โดยอะตอมของคาร์บอนที่แพร่ออกมานี้จะจับตัวกลายเป็น Ferrite-Cementite ที่มี
ผลกระทบต่อคุณสมบัติ ด้านต่างๆ ของเหล็กอย่างมากตามปริมาณการสลายตัวของ Martensite ที่
เพิ่มขึ้น ถ้าอะตอมคาร์บอนที่แพร่ออกมามี ปริมาณน้อย โดยโครงสร้าง Martensite ยังคงไม่สลายตัว
Martensite ดังกล่าวก็จะลดการขัดตัวของอะตอมพร้อมกับถูกเรียกเป็น Low carbon martensite ซึ่ง
มีผลทำให้ความเค้นที่ตกค้างจากการชุบแข็งลดลง

เมื่ออบเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (200-250°C) ระดับอุณหภูมิ
ดังกล่าวจะมีผลน้อย มากต่อความแข็งของเหล็ก ทั้งเนื่องจากการอบที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวไม่ทำให้
เกิดการสลายตัวของ Martensite จึงไม่ทำให้ความแข็งของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปจากความแข็งที่ได้หลัง

การชุบจนสามารถสังเกตได้ชัดเจน แต่การอบที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวทำให้อะตอมคาร์บอนปริมาณเพียงเล็กน้อยแพร่ออกจาก Martensite เป็นผลทำให้ความเค้นที่ตกค้างหลังการชุบแข็งลดต่ำลงมาก ดังนั้นจึงมีผลทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงหลังการชุบ แต่ถ้าเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมากแล้วได้รับความร้อนจนมีระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงมากกว่านี้ อะตอมของคาร์บอนจะแพร่ออกกระบวนผลึก Martensite มากขึ้นๆ ตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากการที่ Martensite มีระบบผลึกเป็น Body center tetragonal เมื่ออะตอมของคาร์บอนแพร่ออกไป เหล็กจึงมีการจับตัวกันของอะตอมที่มีระบบผลึกเป็น Body center cubic เป็นผลทำให้ความแข็งแรงของเหล็กลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นพร้อมกันนั้น Tensile strength, Elongation, Reduction of area ของเหล็กก็จะเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวคาร์บอนเมื่อมีโครงสร้างจุลภาคชนิดเดียวกัน แต่วิธีการที่จะทำให้เกิด โครงสร้างจุลภาคดังกล่าวแตกต่างกัน โดยโครงสร้างที่มาจากการชุบแข็งและ Tempered จะมีคุณสมบัติในด้านต่างๆ ดีกว่าโครงสร้างชนิดเดียวกันที่ได้จากการ Annealed ทั้งนี้เนื่องจากแถบของ Ferrite-cementite ที่เกิดขึ้นจากวิธีการอบชุบทั้งสองวิธีจะมีขนาดความละเอียด-หยาบที่ต่างกัน ส่วนความสามารถในการรับแรงกระแทก ของเหล็กจะแตกต่างกันไปตามวิธีการอบชุบที่นำมาใช้ปฏิบัติ ในกรณีที่อบเหล็กเหนียวคาร์บอนที่ชุบแข็งมาแล้วที่ระดับอุณหภูมิ 250-400°C จะมีผลทำให้เหล็กมีคุณสมบัติรับแรงกระแทกที่ต่ำมาก เนื่องจากเหล็กเกิดภาวะที่เรียกว่า Tempered brittleness ของเนื้อเหล็กขึ้น เหล็กเหนียวทุกชนิดจะมีอุณหภูมิเกิด Tempered brittleness ที่แตกต่างกันไป เราเรียกการลดความสามารถในการรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นนี้ว่า Tempered brittleness of the first order ซึ่งในเหล็กเหนียวคาร์บอนค่า Impact strength ของเหล็กจะลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ Alloy steel ค่าดังกล่าวจะลดลงมากถึง 50-60% ของค่า Impact strength ที่ถูกต้องของเหล็กนั้นเมื่อเทียบการ Tempered ที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่า และต่ำกว่าอุณหภูมิ Tempered brittleness

2.4 ทฤษฎีอัลตราโซนิก

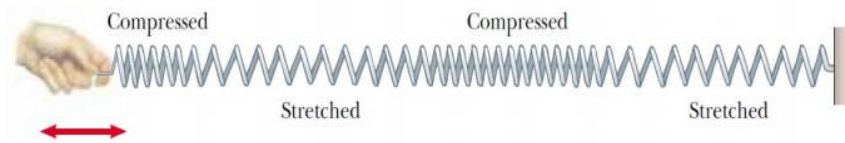
2.4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นเสียงความถี่สูง (Fundamental property of ultrasound)

ถ้าปล่อยพลังงานเสียงลงในวัตถุจะเห็นเป็นอนุภาค (Particle) ของวัตถุเกิดการสั่นสะเทือน พลังงานเสียงจะเป็นตัวแพร่กระจายผ่านวัตถุ อนุภาคมิได้เป็นตัวแพร่กระจายผ่านวัตถุ แต่อนุภาคเพียงแค่สั่นสะเทือนรอบจุดคงที่ (Fix point) เท่านั้น

2.4.2 ชนิดของคลื่นเสียง

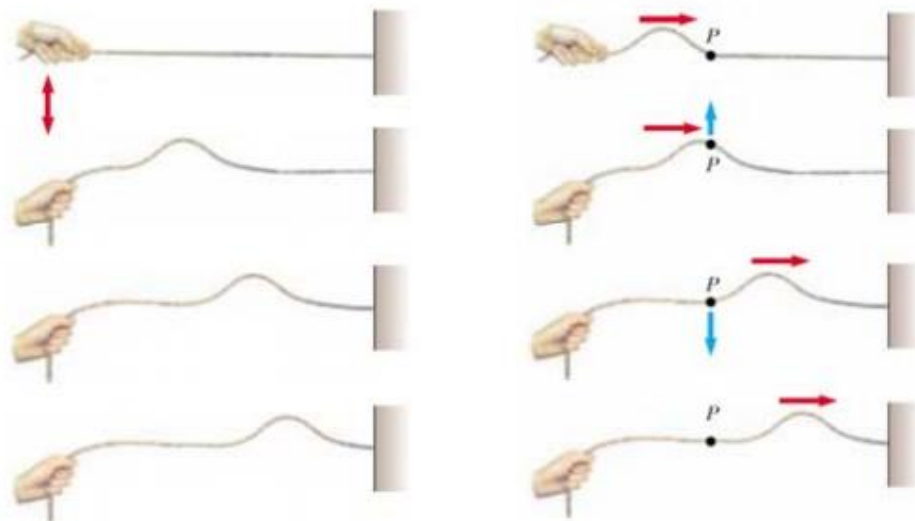
ชนิดของคลื่นเสียงมี 4 ชนิด ดังนี้

- คลื่นเสียงตามยาว (Compressional or longitudinal waves) อนุภาคของตัวกลางจะมีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง จะมีช่วงอัดและขยายสลับกันไป ซึ่งถ้าวัดระดับพลังงานจะปรากฏออกมาในรูปคลื่นซาวน์ คือ มีพลังงานสูงในช่วงอัด และลดลงในช่วงขยายสลับกันไป



รูปที่ 2.2 ลักษณะคลื่นเสียงตามยาว

- คลื่นเสียงตามขวาง (Transverse or shear waves) อนุภาคของตัวกลางจะมีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง มีความเร็วประมาณเท่ากับ 0.5 เท่าของคลื่นเสียงตามยาว คลื่นเสียงตามขวาง สามารถเคลื่อนที่ในวัตถุที่เป็นของแข็งได้ เนื่องจากมีความต้านทานต่อแรงเฉือน



รูปที่ 2.3 ลักษณะคลื่นเสียงตามขวาง

- คลื่นผิว (Surface or rayleigh waves) คลื่นผิวเกิดจากการสั่นสะเทือน และมีการเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิว ที่การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะเป็นวงรีดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยคลื่น 2 ชนิดรวมกัน คือคลื่นเสียงตามยาวและคลื่นเสียงตามขวาง คลื่นผิวมีความเร็วประมาณ 0.9 เท่าของคลื่นเสียงตามขวาง โดยที่คลื่นเสียงสามารถแพร่ลึกลงไปใ้เนื้อของวัสดุจากผิวด้านบนได้ประมาณหนึ่งความยาวคลื่นเสียง

- คลื่นแลมบ์ (Lamb waves) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคลื่นเพลท (Plate waves) เกิดขึ้นในวัตถุที่มีความหนาใกล้เคียงกันกับความยาวคลื่น คลื่นแลมบ์ มี 2 รูปแบบคือ

- แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical or bending waves)
- แบบสมมาตร (Symmetrical waves)

2.4.3 ความเร็วของคลื่นเสียง

ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของคลื่นเสียงได้แก่ชนิดของตัวกลางและชนิดของคลื่นเสียง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าคลื่นเสียงแต่ละชนิดที่ความเร็วที่แตกต่างกัน เรียงตามลำดับความเร็ว คือ คลื่นเสียงตามยาว คลื่นเสียงตามขวางและคลื่นเสียงผิว ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเสียงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ v คือ ความเร็วคลื่นเสียง (เมตรต่อวินาที)
 λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)
 f คือ ความถี่ (ครั้งต่อวินาที หรือเฮิรตซ์ (Hz))

ในตารางที่ 2.6 แสดงความเร็วของคลื่นเสียงตามยาวและคลื่นเสียงตามขวางของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.6 ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและคลื่นเสียงตามขวาง

วัสดุ	ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วคลื่นเสียงตามขวาง (เมตรต่อวินาที)
เหล็กกล้าคาร์บอน	5900	3230
สแตนเลส	5664	3120

2.4.4 การลดทอนของเสียง (Sound attenuation)

การลดทอนของเสียง หมายถึงการที่เสียงมีพลังงานลดลงเมื่อเสียงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลาง การลดทอนของเสียงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 ประการคือ มุมบาน และการลดทอนเนื่องจากวัสดุ (Material attenuation)

มุมบานเป็นองค์ประกอบสำคัญในการลดทอน เมื่อมุมบานมากขึ้นทำให้พลังงานกระจายไปในบริเวณที่กว้างทำให้ระดับพลังงานที่ตรงกึ่งกลางลำคลื่นลดลง

การลดทอนเนื่องจากวัสดุ อาจเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า การกระเจิง (Scattering) เนื่องจากคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านเกรน และการสะท้อนที่ขอบของเกรน (Grain boundaries)

2.4.5 เครื่องมือทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแยกตามประเภทตามการแสดงสัญญาณสะท้อน

A - scan เป็นเครื่องมือที่แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างแกนเวลา (แกนนอน) กับความสูงของแอมพลิจูด (แกนตั้ง) หรือเป็นแบบพัลส์ – เอกโค ที่นิยมใช้กันอยู่ในงานสนามนั่นเอง

B - scan เป็นเครื่องมือที่แสดงของพื้นที่หน้าตัด (Cross section) และแสดงความลึกของรอยความไม่ต่อเนื่อง รวมถึงผิวบนชิ้นงาน ผิวบนของรอยความไม่ต่อเนื่อง และผิวล่างของชิ้นงาน

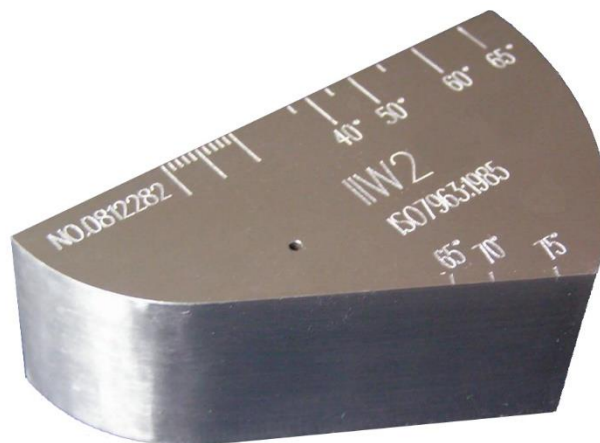
C-Scan เป็นเครื่องมือที่แสดงภาพในแนวระนาบ (Plane view) ของชิ้นงาน แต่ไม่แสดงขนาดของความลึก เพียงแต่แสดงความแตกต่างของความลึกออกมาในระดับความเข้มที่ไม่เท่ากัน

2.4.6 แท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบ

เป็นแท่งมาตรฐานไว้สำหรับสอบเทียบหาจุดศูนย์กลางลำคลื่นของหัวตรวจสอบ (Probe index) เพื่อหามุมที่แท้จริงของหัวตรวจสอบแบบเอียง และตั้งระยะทดสอบ ฯลฯ แท่งสอบเทียบมาตรฐาน V1 และ V2 แสดงดังในรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 แท่งสอบเทียบมาตรฐาน V1



รูปที่ 2.5 แท่งสอบเทียบมาตรฐาน V2

2.4.7 สารช่วยสัมผัส (Couplant)

เป็นสารที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างของอากาศระหว่างหัวตรวจสอบกับชิ้นงานเนื่องจากอากาศมีความต้านทานเสียง (Impedance) ที่ต่างจากชิ้นงานมากทำให้คลื่นเสียงผ่านจากหัวตรวจสอบเข้าไปในชิ้นงานได้น้อยมากสารช่วยสัมผัสมีสถานะเป็นได้ทั้งของเหลวถึงของเหลวเช่นแบ่งเปียกหรือแม่กระทั่งของแข็งสารช่วยสัมผัสที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นงานหัวตรวจสอบและผู้ทดสอบ
- มีส่วนผสมสม่ำเสมอกระจายได้ดีตลอดทั่วทั้งชิ้นงานไม่มีช่องอากาศ
- สามารถเกาะติดได้บริเวณผิวชิ้นงานและสามารถกำจัดออกได้ง่าย
- สามารถส่งผ่านคลื่นเสียงได้ดีมีค่าความต้านทานคลื่นเสียงใกล้เคียงกับชิ้นงาน

2.4.8 หัวตรวจสอบ

ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ตัวเรือนภายนอก (Case) เพื่อให้หัวตรวจสอบรักษารูปร่างอยู่ได้และคงทนต่อการใช้งาน
- แผ่นป้องกันการสึก (Wear plate) เป็นแผ่นที่ใช้รองกันสึกเพื่อไม่ให้ผลึกที่มักทำจะวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (PZT) ชัดสีกับผิวชิ้นงานโดยตรง
- ผลึกเพียโซอิเล็กทริก เป็นส่วนสำคัญที่สุดของหัวตรวจสอบ เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล และเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ขนาดของควมถี่ธรรมชาติของผลึกเป็นตัวกำหนดความไวในการทดสอบ
- วัสดุรองหลัง (Backing material) เป็นตัวที่ทำหน้าที่ป้องกันเสียงสะท้อนภายในผลึกและเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการสั่นสะท้อนของผลึก ถ้าใช้วัสดุรองหลังที่มีการหน่วงสูง (Damp) จะทำให้ระยะเวลาในการสั่นสะท้อนของผลึกสั้นลง ทำให้หัวตรวจสอบมีความสามารถในการแยกแยะที่สูงขึ้น แต่ความสามารถในการทดสอบต่ำลง และจะให้ผลในทางที่กลับกันถ้าเลือกวัสดุที่มีความหน่วงต่ำ
- อีพอกซี (Epoxy) ใช้เติมลงไปช่องว่างของหัวตรวจสอบ เพื่อให้ชิ้นส่วนต่างๆ คงอยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดระยะเวลาการใช้งาน

2.4.9 ชนิดของหัวตรวจสอบ

มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน ได้แก่

- หัวตรวจสอบแบบหัวตรง (Normal probe หรือ Straight beam) ใช้ทดสอบความหนาของชิ้นงานหรือรอยความไม่ต่อเนื่องที่มีทิศทางขนานกับผิวของชิ้นงาน คลื่นที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดคลื่นตามยาว
- หัวตรวจสอบแบบเอียง (Angle probe หรือ Angle beam) ใช้ทดสอบรอยความไม่ต่อเนื่องที่วางอยู่ในแนวเอียงกับผิว หรือทดสอบในบริเวณที่ใช้ทดสอบแบบหัวตรงไม่ได้เช่น ในงานเชื่อม
- หัวตรวจสอบแบบดีเลย์ทิป (Delay tip) จะมีหูเป็นส่วนประกอบทำให้แยกแยะความกว้างของพัลส์เริ่มต้น (IP) ออกจากผิวหน้า หรือลดระยะเขตอับ (Dead zone) ได้นั่นเอง
- หัวตรวจสอบแบบแปรงทาสี (Paint brush) มีรูปร่างคล้ายแปรงทาสี มีขนาดใหญ่สามารถทดสอบครั้งเดียวได้เป็นบริเวณกว้าง

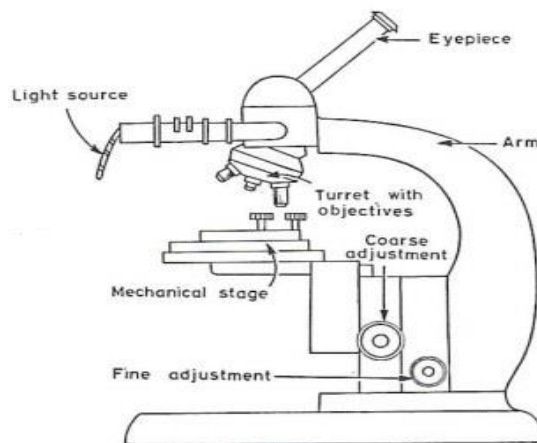
- หัวตรวจสอบแบบทีอาร์ (T - R probe) เป็นหัวตรวจสอบที่มีผลึกจำนวน 2 ผลึกแยกทำหน้าที่ในการส่งและรับคลื่นเสียง ทำให้เพิ่มความสามารถในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ใกล้ผิว หรือใช้ทดสอบความหนาของชิ้นงานที่มีขนาด 1 - 3 มิลลิเมตรได้

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน [20]

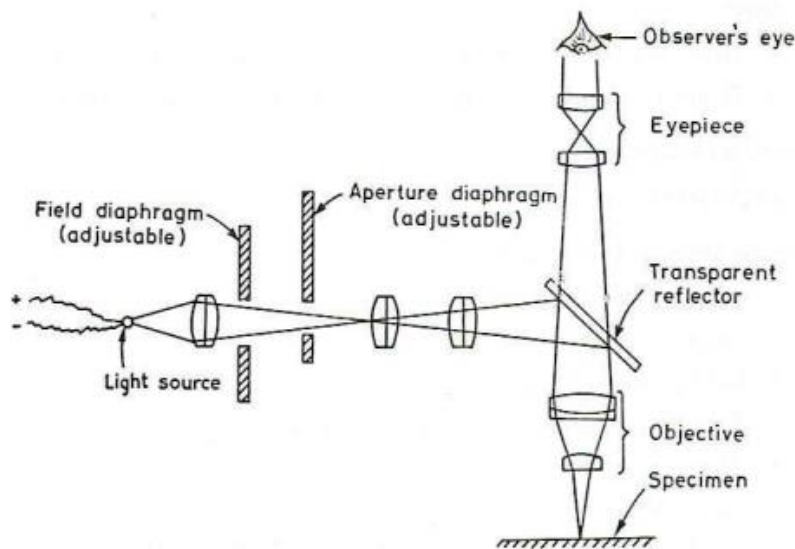
ก. สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโลหะและการจัดเรียงตัวของอะตอมในโลหะ การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของโลหะเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการตรวจสอบคุณภาพ ตลอดจนใช้เป็นหลักฐานเบื้องต้นในการวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายของชิ้นส่วนโลหะนั้นๆ การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา แบ่งเป็น

ข. การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macro-scopic Examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำกล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual Inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

ค. การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Micro-scopic Examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างในระดับจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical Microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ดังแสดงรูปที่ 2.6 โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่าที่กำลังขยายสูงช่วยให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่ รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือโครงสร้างนั้นๆ ในชิ้นงานตัวอย่างได้ง่ายขึ้น ในบางกรณีที่โครงสร้าง หรือเฟสที่ปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยาย 10-1,000 เท่า จึงต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง ในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอน ดังนั้นกล้องชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานในทางโลหะกรรมมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน) กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกันกล้องจุลทรรศน์ที่เรานำมาใช้ คือกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ฐานแท่นรองรับชิ้นงานตัวอย่างสามารถเลื่อนไป-มาได้ดังรูปที่ 2.7 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 2.7 กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะส่งลำแสงผ่านเลนส์รวมแสงไปตกกระทบแผ่นแก้วสะท้อนแสง (Transparent Reflector) ทำให้แสงดังกล่าวตกลงในลักษณะที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ได้ผ่านการเตรียมมาแล้วก็จะสะท้อนแสงกลับขึ้นไปผ่านเลนส์วัตถุ (Objective Lenses) แล้วผ่านเลนส์ตา (Eyepiece) ก่อนจะผ่านเข้าตา (Observer's Eye) ทำให้เห็นภาพขยายของโครงสร้างชิ้นงานดังกล่าว



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [1]



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา [1]

2.6 ทฤษฎีการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.6.1 ณรงค์ ธรรมโชติ ได้อธิบายหลักการขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน (Hot mounting) โดยการใช้เทอร์โมเซตติงเรซินหรือเทอร์โมพลาสติกเรซินชนิดผงอัดและหลอมด้วยความร้อนแล้วปล่อยให้แข็งตัวรอบชิ้นงาน เรซินที่ใช้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เบเคไลต์ (Bakelite) หรือ เรซินฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ และเรซินไดอัลลิลพทาเลต

โดยวิธีการขึ้นเรือนแบบร้อนนี้ใช้เครื่องอัดที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แม่พิมพ์โลหะ (Metal mold) รูปทรงกระบอกมีระบบแรงดันใช้ลมหรือน้ำมัน ระบบหล่อเย็น ระบบการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โลหะซึ่งขดลวดความต้านทานสามารถตั้งอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบแม่พิมพ์ขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน

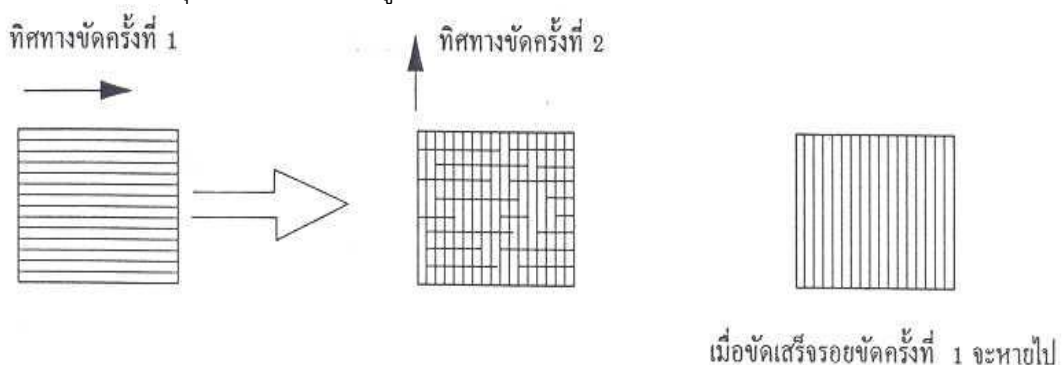
ในขั้นตอนการปฏิบัติขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน เริ่มต้นจากชิ้นงานให้มีขนาดเล็กกว่าแม่พิมพ์โลหะรูปทรงกระบอกตามที่ผู้ตรวจสอบต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานมาวางตรงกึ่งกลางฐานดันชิ้นงานออก แล้วนำผงเบเคไลค์ มาใส่ลงในแม่พิมพ์ตามความเหมาะสมของผู้ตรวจสอบ จากนั้นปิดฝาแม่พิมพ์โลหะ แล้วทำการปรับตั้งเวลาอัตโนมัติในการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิสูงจนถึงผงเบเคไลค์หลอมละลายหลังจากนั้นเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นระบบน้ำหล่อเย็นจะเริ่มทำงานจนอุณหภูมิเย็นตัวลง จากนั้นเปิดฝาเครื่องอัดจะได้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อนแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องอัดขึ้นงานขึ้นรูปแบบร้อน

2.6.2 การขัดหยาบชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา เริ่มต้นขัดด้วยกระดาษทรายหยาบที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 240 300 400 600 800 1,000 จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในขั้นตอนการขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างเศษสิ่งสกปรกขณะทำการขัดชิ้นงาน เช่น ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย แสดงดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การขัดกระดาษทราย

2.6.3 การขัดมันชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อขจัดรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการขัดผิวด้วยกระดาษทรายให้เรียบมันวาว ผ้าขัดที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ ผ้าใบ ผ้าสักหลาด ผ้าไนลอน และหนังขามัวร์ เป็นต้น

ผงขัดที่ใช้ในการขัดมัน เป็นผงขัดที่มีความละเอียดสูง ได้แก่ ผงขัดออกไซด์ (Oxide polishing) เช่น อลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา และผงขัดเพชร (Diamond polishing : DP) ขนาดตั้งแต่ 9-0.1 μm

2.6.4 การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2-4 ผสมแอลกอฮอล์ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆ แยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ดังตารางที่ 2.7 นี้ จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อ น้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

วิธีการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลาย กระทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ

- 1) วิธีการจุ่ม เป็นการนำเอาชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดผิวมันและทำความสะอาดมาแล้วกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการจุ่มผิวหน้าที่ต้องการตรวจสอบ
- 2) วิธีการหยด เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการหยดน้ำยาเคมีลงบนผิวหน้าชิ้นงาน โดยหงายผิวชิ้นงานด้านที่ต้องการตรวจสอบแล้วหยดน้ำยาเคมีลงบนผิวชิ้นงาน
- 3) วิธีการจุ่มในน้ำยาเคมี 2 ชนิด เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการกัดนำ (Pre-etching) ก่อนโดยใช้น้ำยาเคมีชนิดหนึ่ง แล้วจึงกัดอีกครั้งหนึ่งด้วยน้ำยาเคมีชนิดหนึ่ง
- 4) วิธีการทา เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการใช้ผ้าสำลี หรือแปรงขนสัตว์จุ่มน้ำยาเคมีทาบนผิวหน้างานให้ทั่ว
- 5)

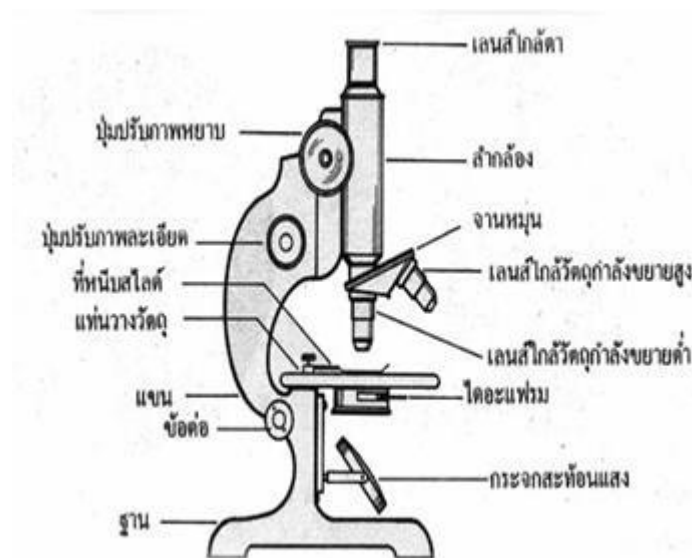
ตารางที่ 2.7 รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric acid and hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มขึ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที

2.6.5 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ อาจเป็นการตรวจสอบดูโครงสร้างมหภาค หรือ โครงสร้างจุลภาค กล้องจุลทรรศน์ สำหรับดู

โครงสร้างภายในเนื้อโลหะที่ใช้กันมากมี 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes) และกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Electron microscopes)

1) หลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือใช้หลักการให้แสงจากแหล่งกำเนิด (Light source) ผ่านไปตามท่ออิลลูมินเนชัน (Illumination tube) ไปกระทบกับแผ่นกระจกสะท้อนแสง (Plane glass reflector) ให้แสงหักเหไปยังเลนส์วัตถุ แสงจะตกกระทบกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบแล้วสะท้อนกลับไปที่เลนส์วัตถุ (Objective lens) ผ่านแผ่นกระจกสะท้อนแสงไปยังเลนส์ตา (eyepiece lens) และแสงไปกระทบนัยสตา ทำให้สามารถมองเห็นภาพโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดิเรก หาญณรงค์ และ อาษา ประทีปเสน [4] ได้ทำการศึกษาชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน โดยทำการตรวจสอบหารอยบกพร่องในชิ้นงานพ่นพอกอลูมิเนียมด้วยการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลกระทบต่อการลดทอน (Attenuation) ของแอมพลิจูดของสัญญาณ และความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูง รวมทั้งความแม่นยำของการกำหนดตำแหน่งและ ขนาด ของรอยความไม่ต่อเนื่องที่ผ่านการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงบนชิ้นงานที่มีการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนของอลูมิเนียมที่มีความหนาต่างกัน การทดลองได้ทดสอบกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด S420 ผ่านการเคลือบผิว ที่ความหนา 100, 200, 300, 400, 500 ไมครอน ทดสอบความสมบูรณ์ของการยึดเกาะของพื้นผิวกับอลูมิเนียมด้วยวิธีการดึง (Pull off Test) การทดสอบใช้คลื่นชนิด

ตามยาว (Longitudinal wave) และ คลื่นผิว (Surface wave) กับหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)

และ 2.25 เมกะเฮิรตซ์ วัดความเปลี่ยนแปลงของความสูงของสัญญาณสะท้อน (Echo height) การลดทอน และความเร็วของคลื่นเสียง จากผลการทดลองการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยใช้คลื่นชนิดตามยาวที่มีความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงมีความสูงของสัญญาณสะท้อน (Echo height) ลดลงแปรผันตามความหนาของอลูมิเนียมที่พอก ส่วนหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2.25 เมกะเฮิรตซ์ ให้ผลตรงกันข้าม ซึ่งมีผลต่อการประเมินตัดสินผลการยอมรับหรือปฏิเสธรอยความไม่ต่อเนื่อง นั้น ส่วนค่าความเร็วของคลื่นเสียงมีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของการพ่นพอกเพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลต่อตำแหน่งและ ขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่อง

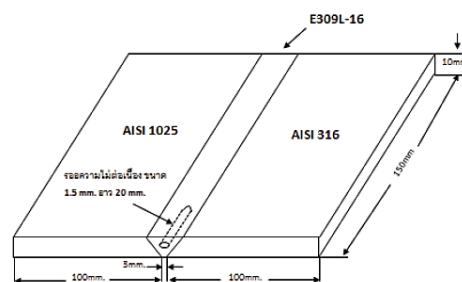
ไหม นอยพิทักษ์ และ สิทธิศักดิ์ จารุเนตรรัศมี [5] ได้ทำการศึกษา ความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมโลหะทางชนิด โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1025 และเหล็กกล้าโรสนิมเกรด AISI 316 เชื่อมต่อดวยกระบวนการเชื่อมอาร์กลดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ลวดเชื่อม E309L-16 และสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องที่บริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม จากนั้นทดสอบความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับการหารอยความไม่ต่อเนื่องในรอยเชื่อม โดยใช้ความถี่หัวตรวจสอบ 4 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ผลการทดลองพบว่าพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงถูกลดทอนอย่างมากในบริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากทิศทางการเรียงตัวของเดนไดรต์ในโครงสร้างออสเทนติก โดยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถส่งผ่านพลังงานในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของเดนไดรต์ได้มากกว่าทิศทางทำมุมกับการเรียงตัวของเดนไดรต์ และจากการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องโดยใช้หัวตรวจสอบแบบเอียง พบว่าทดสอบจากด้านเหล็กกล้าโรสนิมสามารถพบรอยความไม่ต่อเนื่องภายใน แต่ทดสอบจากด้านเหล็กกล้าคาร์บอนไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง

ธารทิพย์ ฉายศิริวัฒนา บวรโชค ผู้พัฒนา [2] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับวัสดุเติมป้องกันการกัดกร่อน บริเวณหน้าแปลนข้อต่อ โดยการนำวัสดุซึ่งเป็น Wax Base มาอุดลงในช่องว่างระหว่างหน้าแปลน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนผิวด้านในของหน้าแปลนแต่เนื่องจากวัสดุเติมดังกล่าวอาจมีการสลายตัวหรือหลุดลอกในระหว่างการใช้งาน จึงได้พัฒนาวิธีการตรวจสอบ โดยการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงด้วย เทคนิคการส่งผ่านคลื่นเสียง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าพัลส์และรับสัญญาณพัลส์ (Pulser - Receiver) ยี่ห้อ OLYMPUS PANAMETRICS - NDT รุ่น 5077PR ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าพัลส์ให้กับหัวตรวจสอบและในทางกลับกัน จะรับสัญญาณพัลส์จากชิ้นงานส่งกลับไปยัง Pulser - Receiver ซึ่งหัวตรวจสอบ (Probe) ที่ใช้ในการทดลองมีความถี่ 1.25 MHz จำนวน 2 หัวตรวจสอบ ซึ่ง Wax Base มีการลดทอนทางคลื่นเสียงที่สูง ในการศึกษาครั้งนี้ได้จำลองรอยความไม่ต่อเนื่องต่างๆ โดยพิจารณาผลกระทบของรอยความไม่ต่อเนื่องจากค่าแอมพลิจูดสัญญาณ ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของรอยความไม่ต่อเนื่องกับแอมพลิจูดได้

บุญเหลือ ขวัญศรี อาษา ประทีปเสน [3] จากงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดเกรนและแนวรืดต่อความเร็วและการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง โดยนำทฤษฎีการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของคลื่นเสียงและยกความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วและ

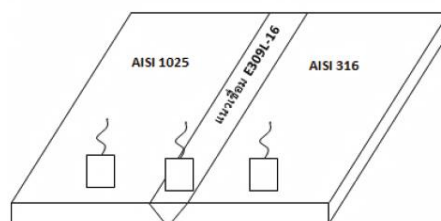
การลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงมาใช้ร่วมกับการทดสอบกับวัสดุทดลองประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่างเกรด SS400 S420 และ A516 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบและผ่านการอบปกติ (Normalizing) ซึ่งได้ทดสอบทั้งสองทิศทางของแนวการรีด การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงใช้คลื่นทั้งที่เป็นชนิดคลื่นตามขวาง (Shear Wave) และคลื่นผิว (Surface Wave) ใช้หัวตรวจสอบที่ความถี่ 2.25 เมกะเฮิรตซ์ และ 4 เมกะเฮิรตซ์ ผลที่ได้คือความเร็วของคลื่นเสียงที่เปลี่ยนแปลง ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดเกรนและแนวรีดของโลหะ แต่ค่าการลดทอนของพลังงานคลื่นเสียงเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของเกรนและความแตกต่างของแนวรีดในโลหะ

ใหม่ น้อยพิทักษ์ สิทธิศักดิ์ จารุเนตรรัศมี [4] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการทดสอบหารอยความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อมโลหะต่างชนิด โดยใช้วัสดุในการทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1025 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI316 ขนาดหนา 10 มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตรยาว 150 มิลลิเมตร นำมาเชื่อมแบบต่อชน (Single vee groove 60°) เชื่อมต่อกับกระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ลวดเชื่อม E309L -16 ขึ้นงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2 11 ชิ้นงานเชื่อม

ในการทดสอบได้ใช้เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงรุ่น GE USM 35X หัวตรวจสอบความถี่ 4 เมกะเฮิรต (MHz) ใช้หัวตรวจสอบแบบตรง หัวตรวจสอบแบบเอียง มุม 45° 60° 70°และหัวตรวจสอบแบบตรง 2 หัว ใช้เทคนิคการส่ง-รับคลื่นเสียงความถี่สูง (Through transmission)



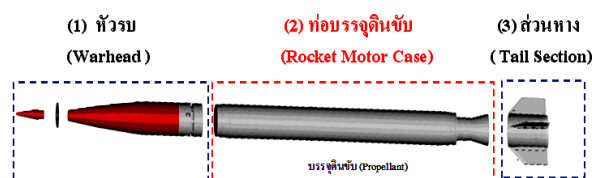
รูปที่ 2 12 การทดสอบการลดทอนและการหาค่าความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูง

ค่าการลดทอนเนื่องจากการกระเจิงของสัญญาณที่บริเวณรอยต่อของสองโครงสร้าง เนื่องจากการลดทอนเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างแนวเชื่อมกับบริเวณที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อน ซึ่งบริเวณ

ดังกล่าวเป็นจุดเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์ริติกไปเป็นออสเทนติก ทำให้มีการเกิดกระเจิงของคลื่นเสียงความถี่สูง จึงไม่สามารถตรวจพบรอยความไม่ต่อเนื่อง

นครินทร์ โพธิ์ดอกไม้ อาษา ประทีปเสน [5] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมที่ทำให้เกิดรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดการหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ ด้วยการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งบุคลากรที่ทดสอบรอยเชื่อมถ้าขาดความรู้ความเชี่ยวชาญในการทดสอบ จะส่งผลให้มีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผล โดยคณะผู้วิจัยได้เชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เตรียมรอยต่อแบบต่อชน ใช้เทคนิคการให้ความร้อนไม่เพียงพอในการหลอมละลายชิ้นงาน และเทคนิคการเอียงลวดเชื่อมไปด้านใดด้านหนึ่ง ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์ก และทดลองโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสีและทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อยืนยันผล งานวิจัยสามารถสร้างชิ้นทดสอบฝึกหัด สำหรับใช้ในการทดสอบหรือ ใช้ในการฝึกบุคลากรด้านการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงได้

ธีรพงศ์ นิรัตติวงศกรณ์ น.ท. สิทธา สายดาราสุมทร ร.น. ธีรทัศน์ พรยงยืน [6] จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาท่อบรรจุดินขับด้วยการใช้เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยการตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง โดยวิธีที่นี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติต่างๆของท่อบรรจุดินขับลดลง



รูปที่ 2.13 ชิ้นส่วนหลักของจรวด

เครื่องมือทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นชนิด Pulse – Echo ซึ่งใช้ตัวส่งและตัวรับสัญญาณเป็นชุดเดียวกัน ปรับตั้งเป็นชนิด A-Scan ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องมือทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงและชิ้นงานสอบเทียบมาตรฐาน IIW Block

ผู้ศึกษาได้เลือกใช้ในการตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง ชนิดแบบ Pulse –Echo โดยเลือกใช้หัวส่งสัญญาณเป็นชนิดหัวตรง (Normal Probe) ในการตรวจหาการแยกชั้นในเนื้อวัสดุ (Lamination) และหัวมุม

(Angle Probe) ใช้ในการตรวจหารอยตำหนิในแนวเชื่อม รวมถึงการทำ DAC Curve การคำนวณระยะสแกนหรือพื้นที่ที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่รอยเชื่อมทั้งหมดโดยอ้างอิงหลักการ วิธีการ และข้อกำหนด จากมาตรฐาน ASME

ดิเรก หาญณรงค์ อาษา ประทีปเสน [7] จากงานวิจัยได้มีการตรวจสอบหารอยบกพร่องในชิ้นงานทั้งที่ชิ้นงานได้ผ่านการพ่นสีหรือพ่นพอกด้วยวัสดุชนิดต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการพ่นพอกอลูมิเนียมด้วยความร้อน (Aluminum Thermal Spray Coating) ที่มีผลต่อการทดสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง การทดลองได้ทดสอบกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด S420 ผ่านการเคลือบผิวด้วยการพ่นพอกอลูมิเนียมด้วยความร้อน ที่ความหนา 100, 200, 300, 400, 500 ไมครอน การทดสอบความสมบูรณ์ของการยึดเกาะของพื้นผิวกับอลูมิเนียมด้วยวิธีการดึง (Pull off Test) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ทดสอบการยึดเกาะผิวอลูมิเนียม วิธี Pull off Test

การทดสอบใช้คลื่นชนิดตามยาว (Longitudinal wave) และ คลื่นผิว (Surface wave) กับหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) และ 2.25 เมกะเฮิรตซ์ และวัดความเปลี่ยนแปลงของความสูงของสัญญาณสะท้อน (Echo height) การลดทอน และความเร็วของคลื่นเสียง จากผลการทดลองการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงบนชิ้นงานที่เคลือบผิวอลูมิเนียมโดยใช้คลื่นตามยาวที่มีความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ พบว่า (Echo height) ลดลงแปรผันตามความหนาของอลูมิเนียมซึ่ง สามารถปรับ Gain dB ให้สัมพันธ์กับค่าของการลดทอนนั้นได้และการทดลองไม่แนะนำให้ใช้หัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2.25 เมกะเฮิรตซ์ ตรวจสอบบนชิ้นงานที่เคลือบผิวอลูมิเนียมซึ่งอาจทำให้มีผลต่อการประเมินการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธของรอยความไม่ต่อเนื่องนั้นได้

Dan Dobrotă [8] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Vulcanization of Rubber Conveyor Belts with Metallic Insertion Using Ultrasounds งานวิจัยได้ศึกษาถึงชนิดของสายพานลำเลียงที่เสริม metallic เข้าไปในยาง ATRBZ เพื่อเพิ่มอายุของสายพานลำเลียง พิจารณาจาก 2 กระบวนการ Ultrasounds และไม่ได้ใช้ กระบวนการที่มีการใช้ Ultrasounds ที่ความถี่อยู่ในช่วง 17-19 kHz ซึ่ง Metallic มีการหลอมรวมกับการแทรกโลหะและฝังได้ดีกว่า

E. Pan, J. Rogers, S.K. Datta, A.H. Shah [9] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Mode selection of guided waves for ultrasonic inspection of gas pipelines with thick coating โดยได้มีการสร้าง

แบบจำลองพฤติกรรม viscoelastic ของชั้นเคลือบ และสมบัติของ Viscoelastic ของชั้นเคลือบทำให้จำนวนคลื่นทั้งหมดซับซ้อนมีการวิธี Rayleigh-Ritz ใช้เพื่อให้ได้ค่าประมาณของจำนวนคลื่นที่ซับซ้อน โหมดเหล่านี้สามารถเลือกใช้สำหรับการตรวจสอบ stress-corrosion cracks ในงานท่อขนส่ง pipelines

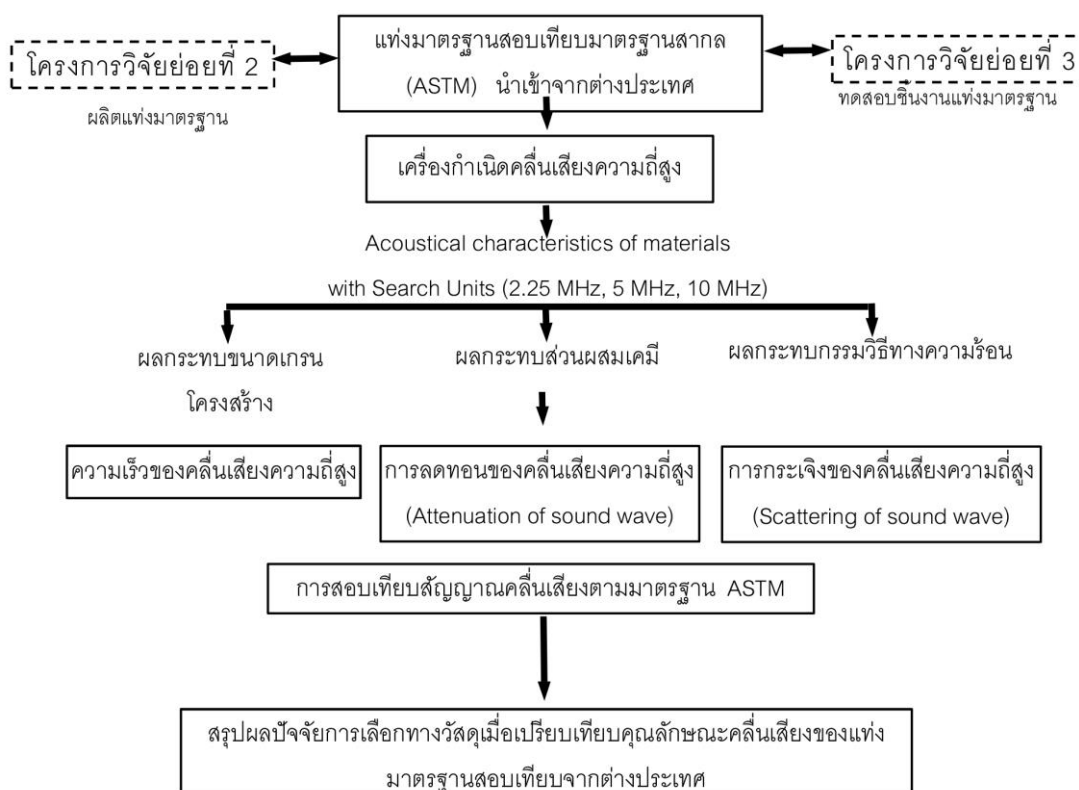
Junho Song and D. E. Chimenti [10] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacitive Air-Coupled Ultrasonic Transducer การออกแบบหัวรับสัญญาณที่ไม่มีกระจกรองภายนอกแต่ใช้แผ่น copper/polyimide ทดสอบหนึ่งชิ้นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. และโพกัส 2.54 ซม. และอีกเส้นหนึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรและโพกัส 5.1 ซม. อุปกรณ์ทั้งสองมีสเปกตรัมความถี่อยู่ตรงกลางที่ 840 kHz โดยมี -6 dB ที่ 310 และ 1200 kHz เมื่อใช้เครื่องรับสัญญาณกึ่งกลางเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงจะอยู่ที่ 2.7 มม. (อุปกรณ์ 1 ซม.) และ 1.32 มม. (อุปกรณ์ 5 ซม.) ซึ่ง confocal geometry จะแสดงความละเอียดที่ขีดจำกัด การเลี้ยวเบนของอุปกรณ์นี้

M. Arone, D. Cerniglia, V. Nigrelli [11] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique โดยใช้เทคนิค Non-contact ultrasonic inspection เพื่อตรวจจับข้อบกพร่องในข้อต่อและข้อได้เปรียบของคลื่น Lamb ซึ่งการกระจายตัวของคลื่น Lamb จะช่วยให้สามารถตรวจสอบความหนาที่สมบูรณ์ได้ด้วยการสแกนเพียงครั้งเดียว ตรวจจับและกำหนดขนาดของข้อบกพร่องทั้งภายในและพื้นผิวได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้คอนฟิกูเรชัน L-scan เพื่อตรวจสอบโครงสร้างการเข้าถึงด้านเดียวและเปรียบเทียบกับ A, B, C และ P-scan

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานทดลองงานวิจัย

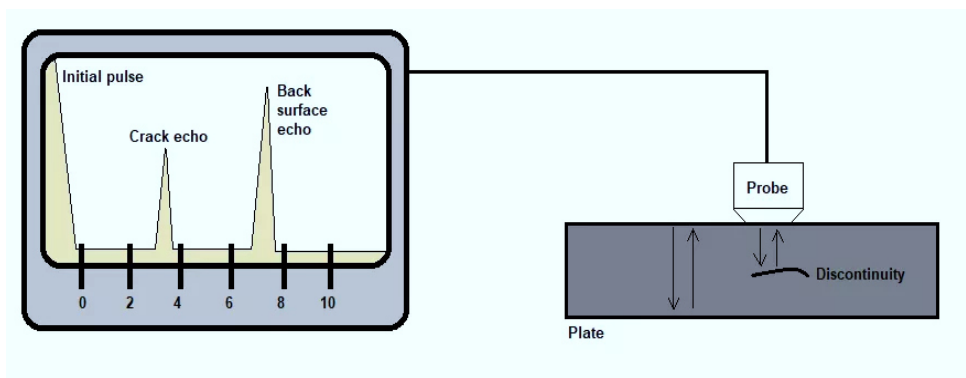
วิธีการดำเนินงานผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นในแท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน เพื่อเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยเริ่มจากการศึกษาคุณลักษณะแท่งมาตรฐานสอบเทียบ IIW type V-I ในการตรวจสอบ UT จากชิ้นส่วนที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยสำรวจแท่งมาตรฐานสอบเทียบหลากหลายจาก สถานประกอบการเอกชน สถาบันวิจัย สถาบันการศึกษาต่างๆ จากนั้นนำวัสดุทั้ง 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (เกรด SS400) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (เกรด S45C) และเหล็กกล้าไร้สนิม (เกรด SUS304) มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ผ่านกรรมวิธีการอบชุบ การตรวจสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง การเปรียบเทียบโครงสร้างของวัสดุ การเลือกวัสดุตามความเหมาะสม, กรรมวิธีการผลิตแท่งสอบเทียบมาตรฐาน ภายใต้มาตรฐาน ASTM E164 และการเปรียบเทียบแท่งสอบเทียบอัลตราโซนิก V1 ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีขั้นตอนแนวคิดของการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนแนวคิดของโครงการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของแท่งมาตรฐานสอบเทียบ IIW type V-I ในการตรวจสอบ UT จากชิ้นส่วนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยสำรวจแท่งมาตรฐานสอบเทียบหลากหลายจากสถานประกอบการเอกชน สถาบันวิจัย สถาบันการศึกษาต่างๆแสดงดังรูปที่ 3.2 และนำแท่งมาตรฐานสอบเทียบจากต่างประเทศ (Fabricated IIW type V-I calibration blocks) มาทำการตรวจสอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อศึกษาคุณสมบัติและสมบัติคลื่นเสียงที่เหมาะสมกับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงโดยจะสอบเทียบกับหัวโพรบความถี่ 2.25 MHz, 5 MHz, 10MHz ในลักษณะ A-Scan ดังรูปที่ 3.3 ก) และ ข) เพื่อเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของอัลตราโซนิก



ก) เครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic testing)
รุ่น Krautkramer USM 36



ข) การสอบเทียบแท่งมาตรฐานสอบเทียบ IIV type V-I

รูปที่ 3.3 การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

3.1.2 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (เกรด SS400), เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (เกรด S45C) และเหล็กกล้าไร้สนิม (เกรด SUS304) จากนั้นนำวัสดุทั้ง 3 ชนิดมาทำการตรวจสอบการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition analysis) ที่เรียกว่า Spectrometer โดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยมีผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 เครื่อง Optical Emission Spectrometer

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
SS400	0.222	0.240	0.435	0.013	0.009	-	-	Bal.
S45C	0.458	0.264	0.727	0.014	0.015	-	-	Bal.
SUS304	0.054	0.4071	1.677	0.031	0.018	8.439	18.109	Bal.

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

นำวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่นำมาใช้เป็นรูปร่างเหล็กเพลากลมมาทำการตัดให้ได้มีขนาดความสูง 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm โดยขั้นตอนมีดังนี้

1) ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด ด้วยเครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ โดยตัดให้มีระยะเผื่อในการกลึงประมาณ 2 mm ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นทำการกลึงปาดหน้าวัสดุให้ได้ฉาก 1 ด้าน และวัดเวอร์เนียไฮเกจโดยกำหนดให้แต่ละวัสดุมีความสูงดังนี้ 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm ดังรูปที่ 3.6 และทำการกลึงให้ได้ขนาดตามที่กำหนดทั้ง 3 วัสดุ ดังรูปที่



รูปที่ 3.5 การตัดวัสดุด้วยเครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 การวัดความสูงของวัสดุด้วยเวอร์เนียไฮเกจ

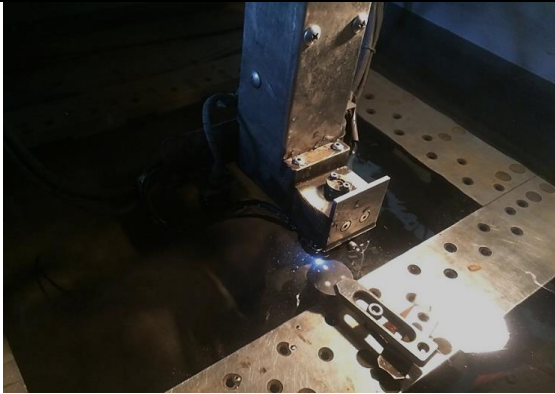
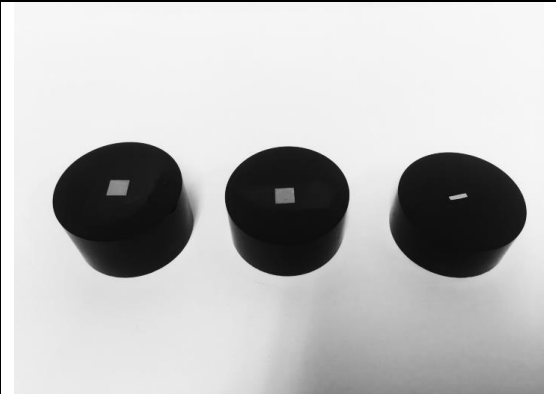
		
ก) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400	ข) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S45C	ค) เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304

รูปที่ 3.7 ขนาดของวัสดุในการทดลอง

3.1.4 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้าง (Microstructure)

นำวัสดุทั้ง 3 ชนิด มาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยขั้นตอนการตรวจสอบมีดังนี้

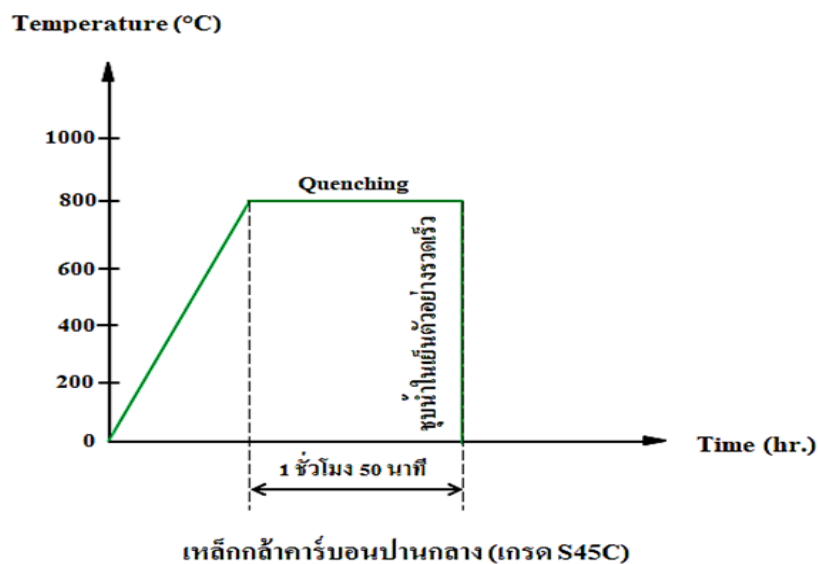
1) ทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง (Wire cut machining) ดังรูปที่ 3.8 ก) ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ SS400, S45C, SUS304 ขนาด 3x3 mm อย่างละ 1 ชิ้น เพื่อนำมาขึ้นรูปชิ้นงาน (Mounting) ด้วย Bakelite Black สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 3.8 ข) จากนั้นนำวัสดุทั้ง 3 ชนิด มาทำการขัดกระดาษโดยมีขนาดของกระดาษทรายที่ใช้ตั้งแต่เบอร์ 240 – 4,000 ดังรูปที่ 3.8 ค) จากนั้นทำการขัดด้วยผ้าสักหลาดกับผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร จนมีลักษณะมันวาวเหมือนกระจก ขั้นตอนต่อมานำวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการขัดมันมาทำการกัดกรดโดยขั้นตอนการกัดจะใช้ส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM E407-99 ดังรูปที่ 3.8 ง) และ จ) จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูปที่ 3.8 ฉ)

	
ก) ตัดชิ้นงานด้วยลวดไฟฟ้า	ข) ขึ้นรูปชิ้นงานตรวจโครงสร้างจุลภาค
	
ค) ขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240 - 4000	ง) การผสมกรดตามมาตรฐาน ASTM E407
	
จ) ขั้นตอนการกัดกรด	ฉ) ตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

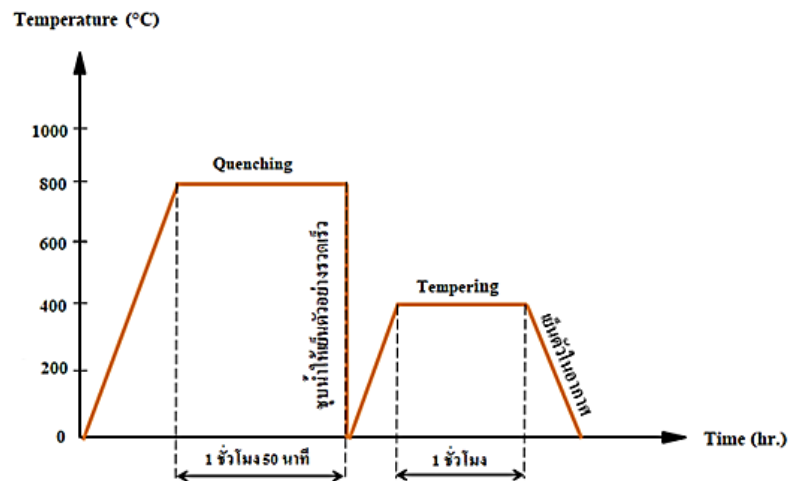
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

3.2 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบ (Quenching) ของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอย (Hypo -Eutectoid) โดยมีปริมาณของคาร์บอนประมาณ 0.45 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเหนือเส้น A_3 ที่อุณหภูมิประมาณ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเผาแช่ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 1 ชั่วโมง 50 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำในอ่างด้วยน้ำทันที .ในขณะรูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบและการอบคืนตัว (Tempering) ซึ่งนำชิ้นงานทดสอบอีกชิ้นหนึ่งมาทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเหนือเส้น A_3 ที่อุณหภูมิประมาณ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเผาแช่ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 1 ชั่วโมง 50 นาที จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำในอ่างน้ำเปล่าหลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแช่ด้วยน้ำมาทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเผาแช่ประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาให้ความร้อนและปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวด้วยอากาศจากอุณหภูมิห้องนอกเตาจากนั้นทำการขัดชิ้นงานทดสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและทำการตรวจสอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อศึกษาคุณลักษณะและสมบัติคลื่นเสียงที่เปลี่ยนไปจากกระบวนการทางความร้อน



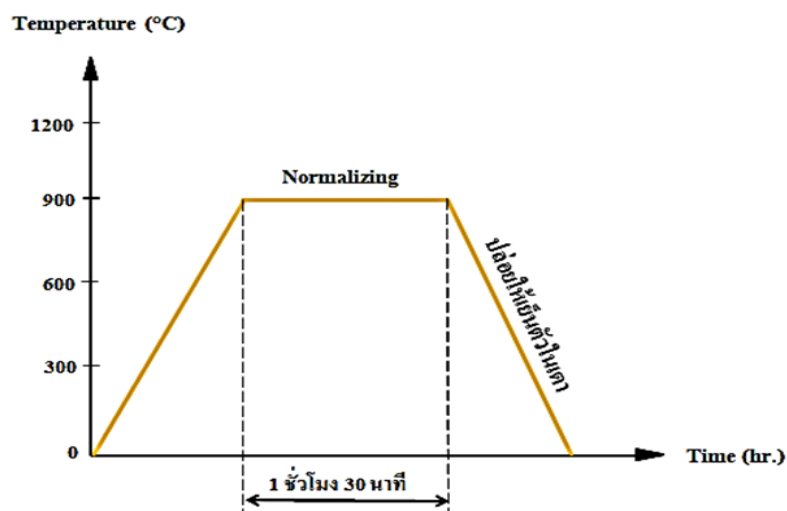
รูปที่ 3.9 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบ (Quenching)



เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (เกรด S45C)

รูปที่ 3.10 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบชุบ (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering)

รูปที่ 3.11 แสดงแผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนด้วยกระบวนการอบอ่อนปกติ (Normalizing) ของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 โดยนำชิ้นงานทดสอบมาทำการให้ความร้อนในเตาจนถึงอุณหภูมิ 900 °C หลังจากนั้นทำการเผาแช่ที่อุณหภูมิ 900 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที และเมื่อครบกำหนดเวลาทำการเย็นตัวในเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและตรวจสอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อพฤติกรรมของคลื่นเสียงที่เปลี่ยนไปหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน



เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (เกรด SS400)

รูปที่ 3.11 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการอบคืนตัว (Normalizing)

3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกลใช้วิธีการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) ด้วยเครื่อง Matsuzawa MMT-X7 โดยการทดสอบทำการกดทดสอบ 3 จุดบนชิ้นงาน จากนั้นนำค่าความแข็งทั้ง 3 ตำแหน่ง มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งในการกดทดสอบความแข็งใช้โหลดที่ 300 gf ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งกับวัสดุที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบชุบ หลังจากนั้นทำการบันทึกผลการทดลองเพื่อนำไปเปรียบเทียบผลของค่าความแข็ง

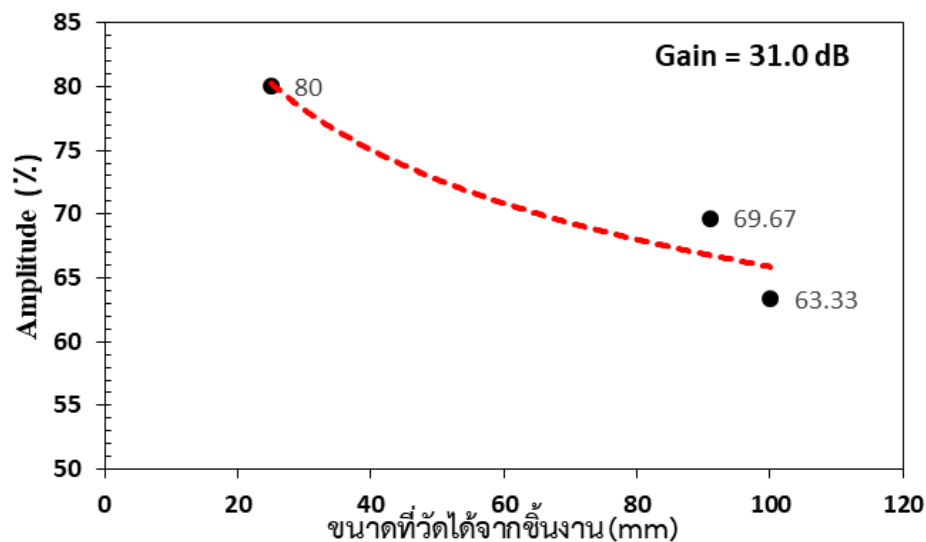


รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

บทที่ 4

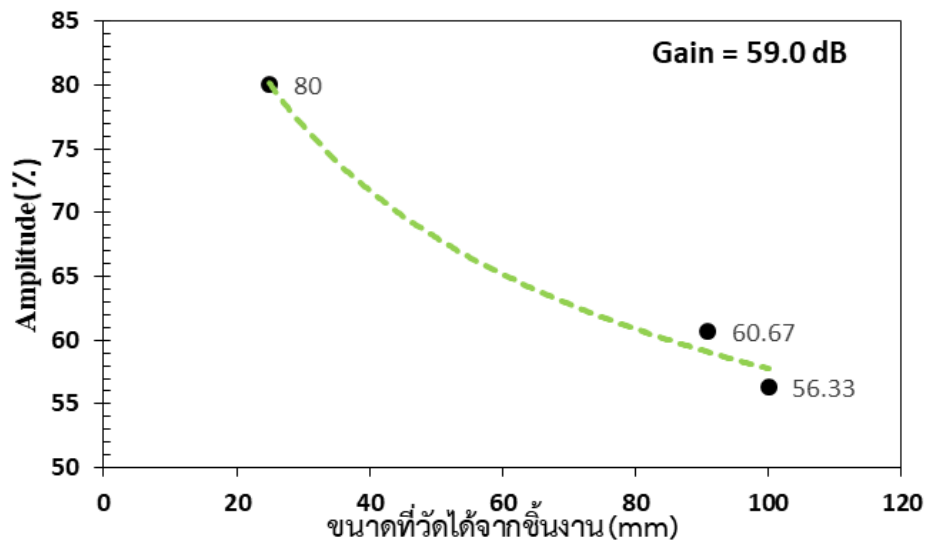
ผลการทดลองและวิเคราะห์งานวิจัย

4.1 ผลการตรวจสอบความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งมาตรฐานสอบเทียบ IIW TYPE V1

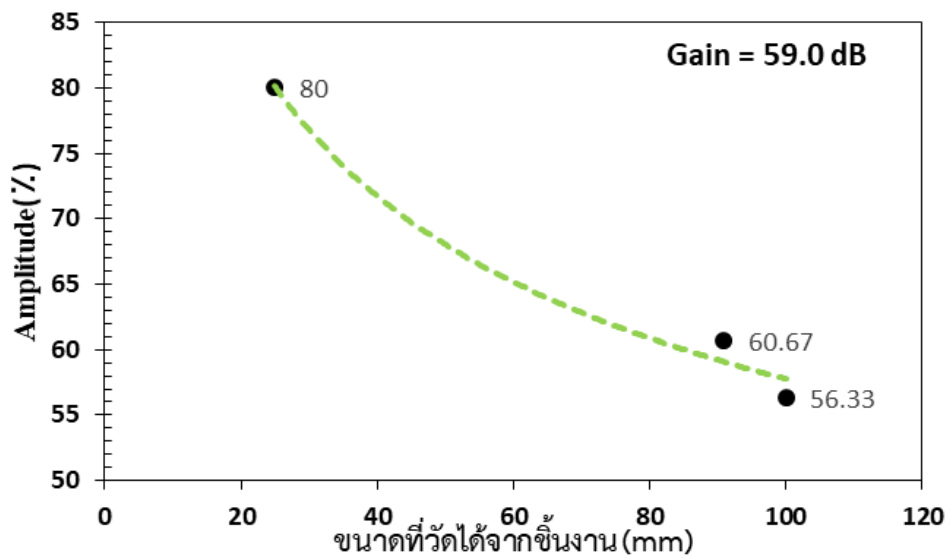


รูปที่ 4.1 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 2 MHz

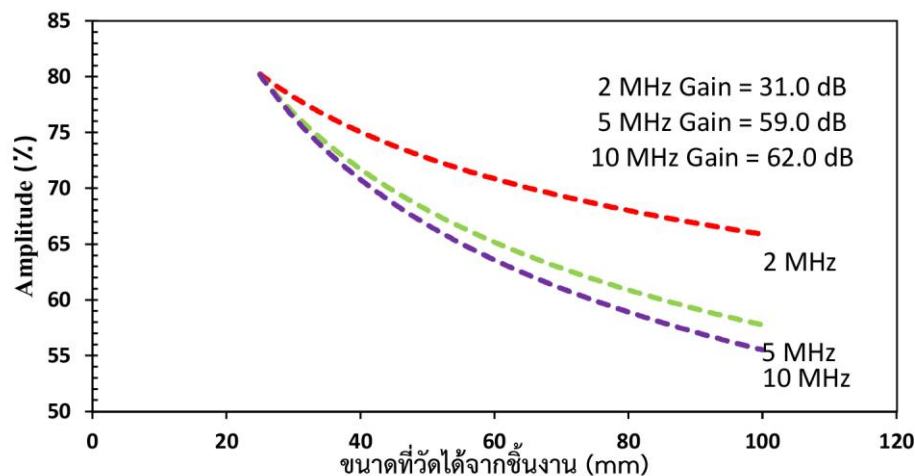
รูปที่ 4.1 แสดงการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 2 MHz ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือระยะทางของชิ้นงานและแกน Y คือแอมพลิจูดของคลื่นเสียง โดยจุดแรกของการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของชิ้นงานจะเริ่มต้นแอมพลิจูดที่ 80 และจะลดลงจนถึงแอมพลิจูดสุดท้ายที่ค่า 63.33 จากนั้นทดสอบที่ความถี่ 5 MHz แสดงผลการทดสอบดังกราฟรูปที่ 4.2 พบว่า จุดแรกของการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงเริ่มต้นที่แอมพลิจูด 80 จากการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงอยู่ที่แอมพลิจูด 56.33 และเมื่อเปลี่ยนหัว Probe การตรวจสอบที่ความถี่ 10 MHz จากการตรวจสอบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงดังรูปที่ 4.3 พบว่าจุดเริ่มต้นการลดทอนของคลื่นเสียงอยู่ที่แอมพลิจูดที่ 80 จากนั้นการลดทอนของคลื่นเสียงมีค่าอยู่ที่แอมพลิจูดที่ 56.33 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหัว Probe การตรวจสอบที่ความถี่ 5 MHz มีค่าการลดทอนของคลื่นเสียงมีลักษณะคล้ายกันเนื่องจากลำเสียงของความถี่ 5 และ 10 MHz มีลักษณะอาจจะแคบใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.2 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 5 MHz



รูปที่ 4.3 การลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศความถี่ 10 MHz

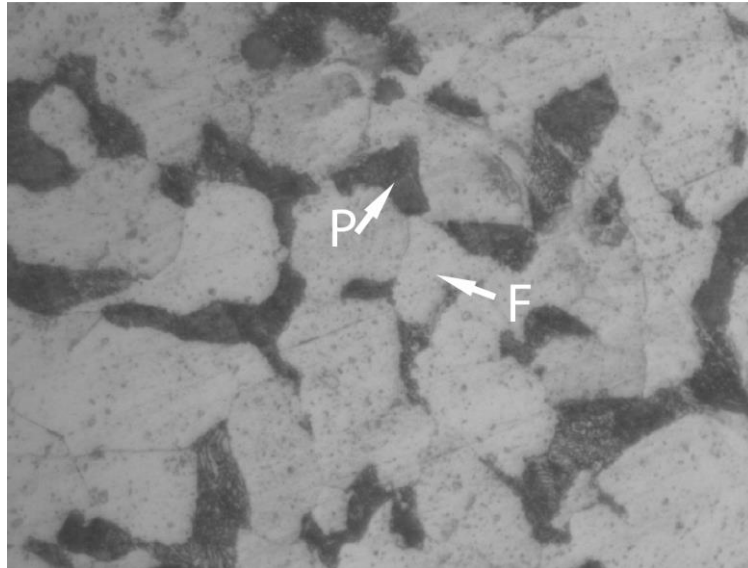


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐาน IIW TYPE V1

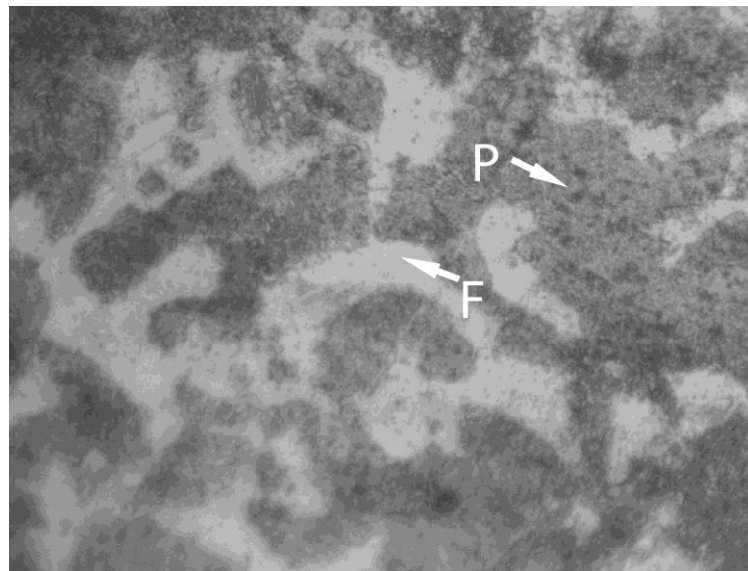
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศ โดยความถี่ 2, 5 และ 10 MHz ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือ ระยะทางของชิ้นงาน จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 ความถี่ของคลื่นเสียง พบว่า หากมีการใช้ความถี่ของคลื่นเสียงในการตรวจสอบชิ้นงานจะให้ค่าการลดทอนของคลื่นเสียงค่อนข้างต่ำกว่าหากมีการเลือกใช้หัวตรวจสอบที่มีคลื่นเสียงความถี่ที่สูงค่าการลดทอนของคลื่นเสียงที่ส่งผ่านไปยังชิ้นงานตรวจสอบจะส่งผลต่อการลดทอนของคลื่นเสียงสูงกว่าโดยแสดงดังกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 4.4

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเกรนของวัสดุต้นแบบ

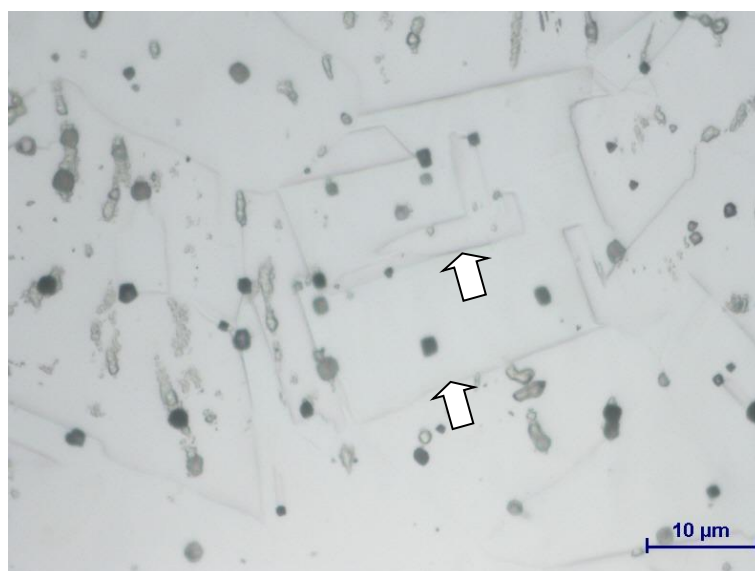
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ซึ่งเป็นวัสดุต้นแบบที่นำมาศึกษาสมบัติความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูง จากการตรวจสอบพบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 มีลักษณะของโครงสร้างประกอบไปด้วย โครงสร้างพื้นที่สีดำคือ Pearlite โดยแสดงอักษรตัว P ซึ่งเป็นโครงสร้างผสมกันระหว่าง Ferrite กับ Cementite และโครงสร้างพื้นที่สีขาวที่มีปริมาณมากกว่าพื้นที่สีดำ คือโครงสร้าง Ferrite โดยแสดงอักษรตัว F อย่างไรก็ตามจากการสังเกตภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคยังสามารถประเมินชนิดของวัสดุได้เบื้องต้นคือจัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ขณะที่รูป 4.6 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C พบว่าประกอบไปด้วยพื้นที่สีดำและสีขาว แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแล้วพบว่าในโครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C มีปริมาณพื้นที่สีดำมากกว่าพื้นที่สีขาวหรือมีเฟส Pearlite มากกว่า Ferrite อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.5 สามารถประมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนได้ว่าจัดอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ในขณะที่รูป 4.7 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าลักษณะโครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบผลึกหรือมีขอบเกรนขนานกัน (Twin) เป็นเส้นสีดำแสดงดังลูกศรชี้ ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้าง Austenite 100% ดังในแผนภาพสมมูลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

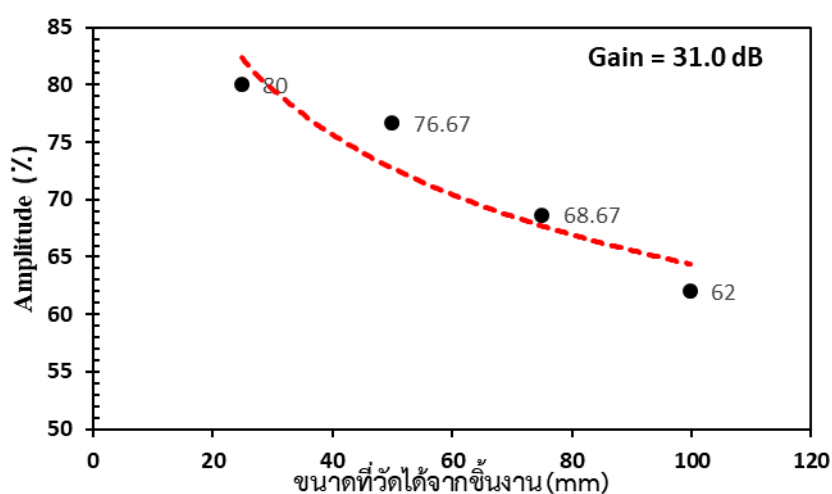


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าโรสนิมเกรด SUS304

4.2 อิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่น

4.2.1 ผลการตรวจสอบการลดทอนของคลื่นความถี่สูง

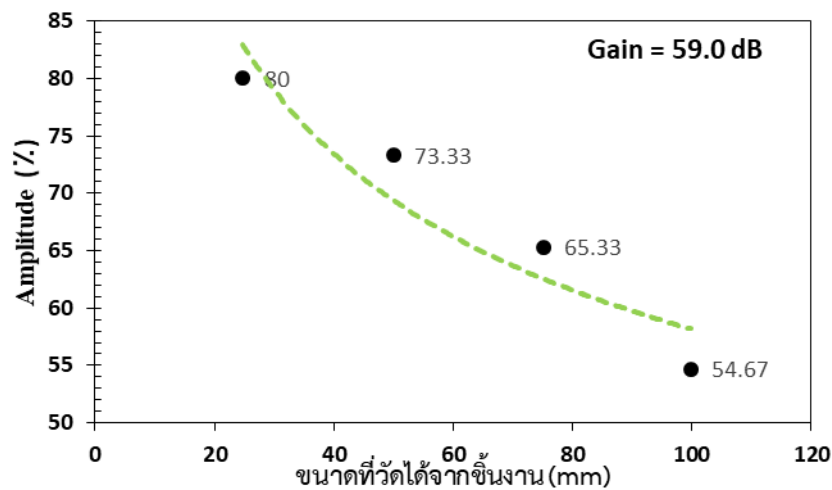
ก) วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400



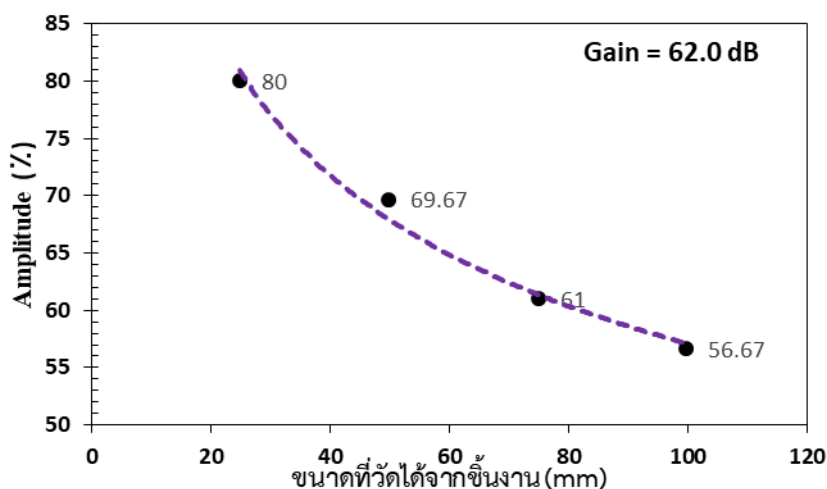
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 2 MHz

ในรูปที่ 4.8 แสดงผลการตรวจสอบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ความถี่ 2 MHz กับชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่มีขนาด 25, 50, 75, และ 100 mm พบว่า จุดแรกของการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของชิ้นงานที่มีขนาด 25 mm จะเริ่มต้นแอมพลิจูดที่ 80 จากนั้นเมื่อทำการวัดชิ้นงานที่ขนาดความยาวเพิ่มขึ้นค่าแอมพลิจูดของการลดทอนของคลื่นเสียงมี

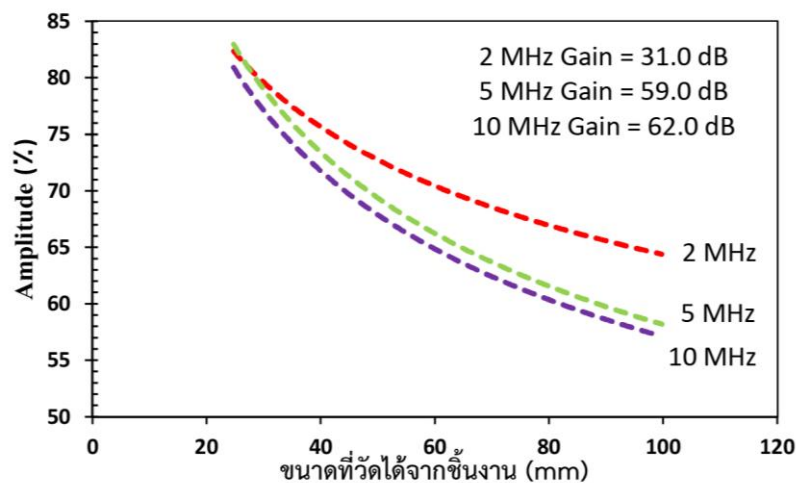
แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความยาวของชิ้นงานตรวจสอบที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ชิ้นงานตรวจสอบที่มีความยาว 100 mm ค่าแอมพลิจูดการลดทอนคลื่นเสียงมีค่าอยู่ที่ 62 เปอร์เซ็นต์แอมพิจูด อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปลี่ยนหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 5 และ 10 MHz พบว่าการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงในชิ้นงานที่มีความยาวเพิ่มขึ้นจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดต่ำกว่าการใช้หัวตรวจสอบที่ความถี่ 2 MHz ในทางกลับแสดงถึงการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงค่อนข้างมากกว่านอกจากนั้นชิ้นงานตรวจสอบที่มีความยาว 100 mm ที่ใช้หัวความถี่ 5 และ 10 MHz ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแอมพิจูดมีค่าใกล้เคียงกันคือ 54.67 และ 56.67 เปอร์เซ็นต์แอมพิจูดโดยแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 5 MHz



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400 ที่ความถี่ 10 MHz

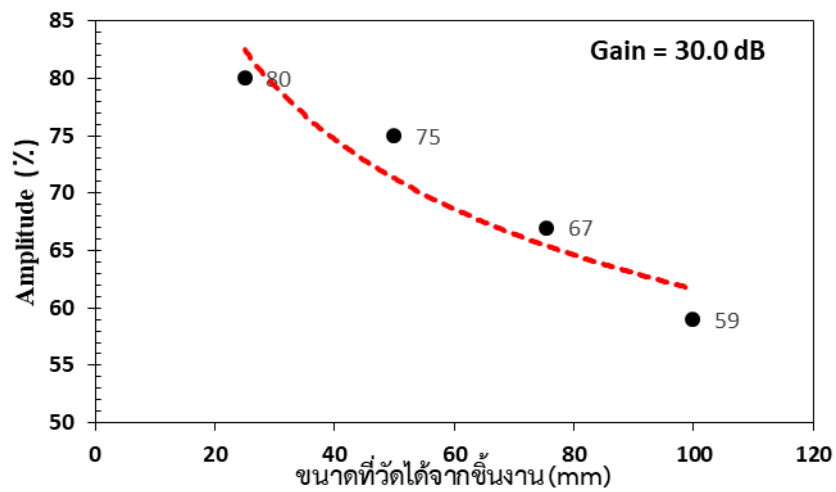


รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าคาร์บอนของ SS400

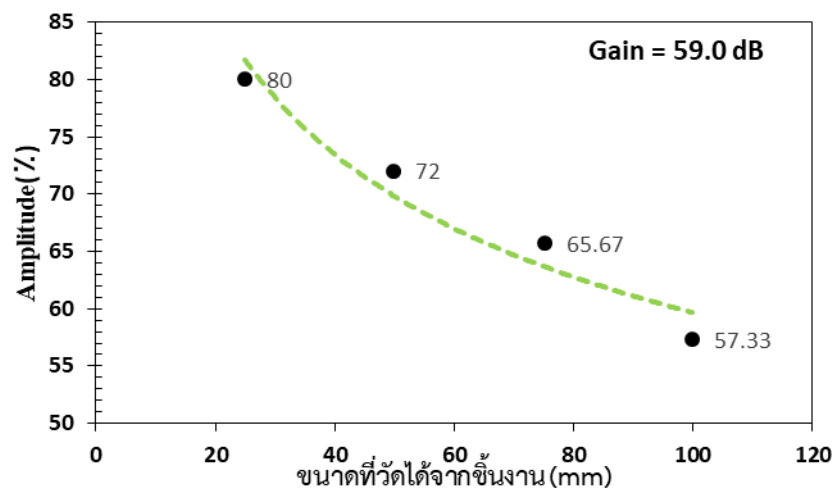
จากกราฟเปรียบเทียบสัญญาณการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ระหว่างขนาดความยาวของชิ้นงานตรวจสอบกับหัวตรวจสอบที่มีความถี่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า หัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2 MHz ให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดของการลดทอนคลื่นเสียงน้อยกว่าการใช้หัวตรวจสอบที่มีความถี่ 5 และ 10 MHz ที่มีความยาวของชิ้นงานเท่ากันซึ่งแสดงเส้นแนวโน้มเห็นได้อย่างชัด

ข) วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

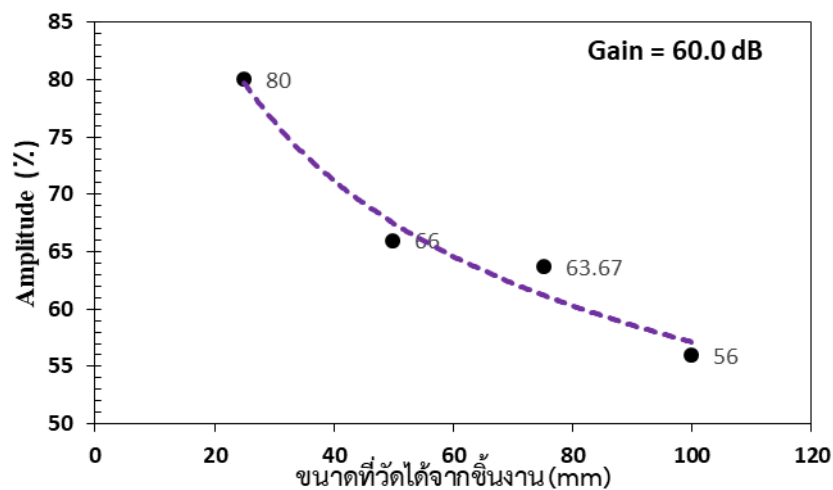
ในรูปที่ 4.12 แสดงผลการตรวจสอบสัญญาณการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ความถี่ 2 MHz กับชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่มีขนาด 25, 50, 75, และ 100 mm พบว่า ขนาดความยาวของชิ้นงานตรวจสอบเริ่มต้น คือ 25 mm มีค่าการลดทอนของคลื่นเสียงอยู่ที่ 80 เปอร์เซ็นต์แอมพิจูด จากนั้นเมื่อทำการตรวจที่ความยาวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 50, 75, และ 100 mm พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดของการลดทอนคลื่นเสียงมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อความยาวของชิ้นงานเพิ่มยาวขึ้น จากนั้นทำการเปลี่ยนหัว Probe ตรวจสอบที่มีความถี่เพิ่มสูงขึ้น คือ 5 และ 10 MHz แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดลดต่ำลงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความยาวของชิ้นงานตรวจสอบที่ยาวขึ้น พบว่าไม่ส่งผลต่อการลดทอนของคลื่นความถี่สูงเมื่อมีการใช้หัวตรวจสอบที่มีความถี่ต่างกันซึ่งอาจจะเป็นเพราะลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ไม่ต่อสัญญาณการลดทอนของเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดก็เป็นได้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 2 MHz

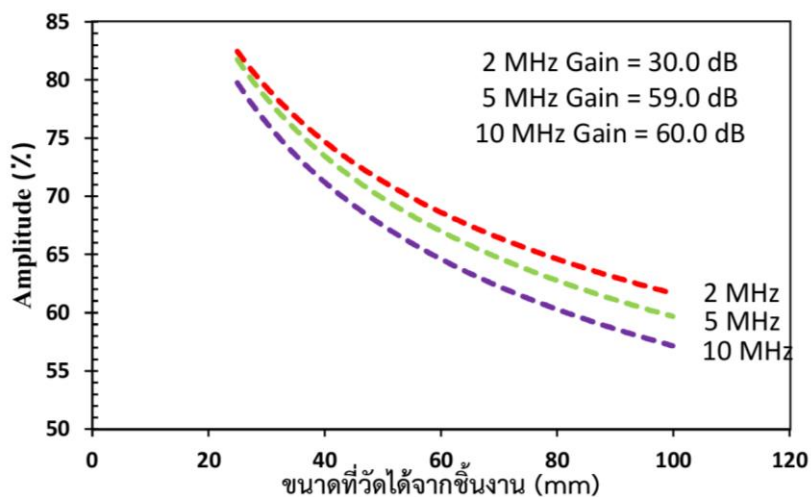


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 5 MHz



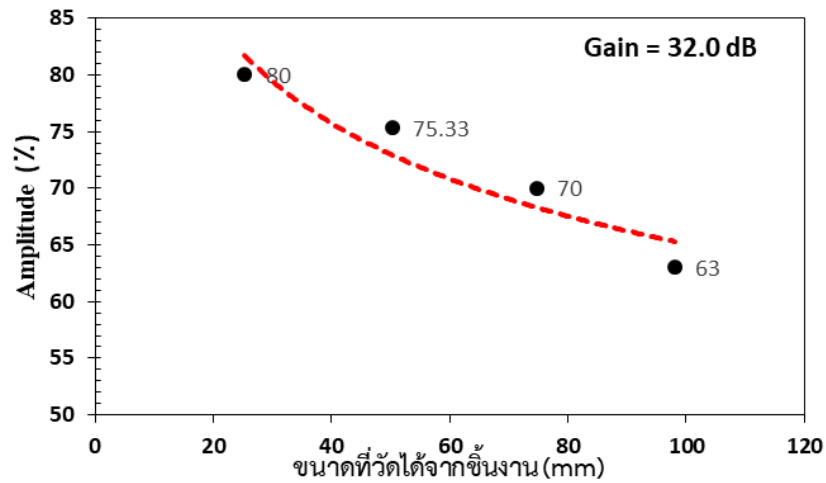
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C ที่ความถี่ 10 MHz

ในรูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดกับแต่ละขนาดความยาวของชิ้นงานตรวจสอบและความถี่ของหัวตรวจสอบที่ใช้ต่างกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแอมพิจูดของแต่ละหัวตรวจสอบที่ความยาวขนาดชิ้นงานต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 มีความแตกต่างกันชัดเจน

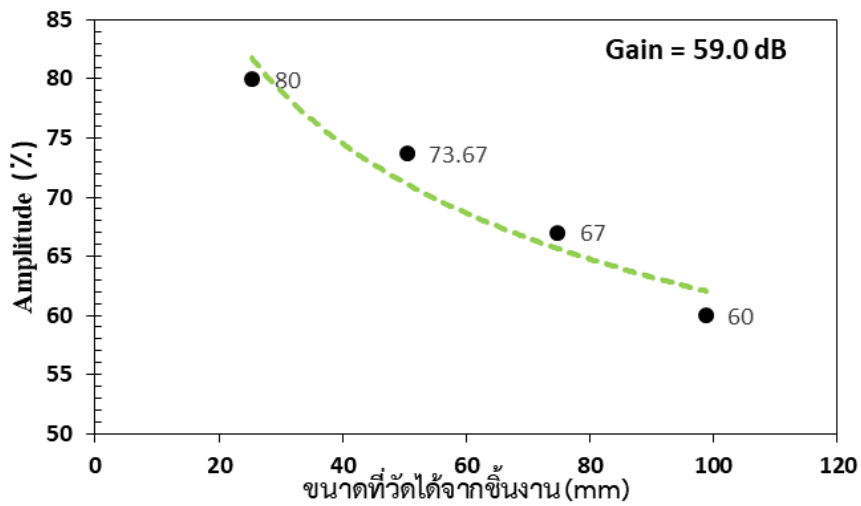


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าคาร์บอนของ S45C

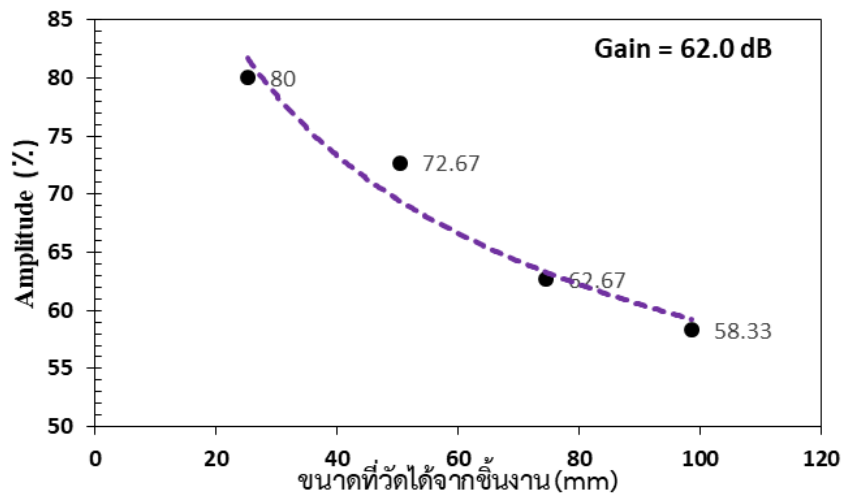
ค) วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 2 MHz

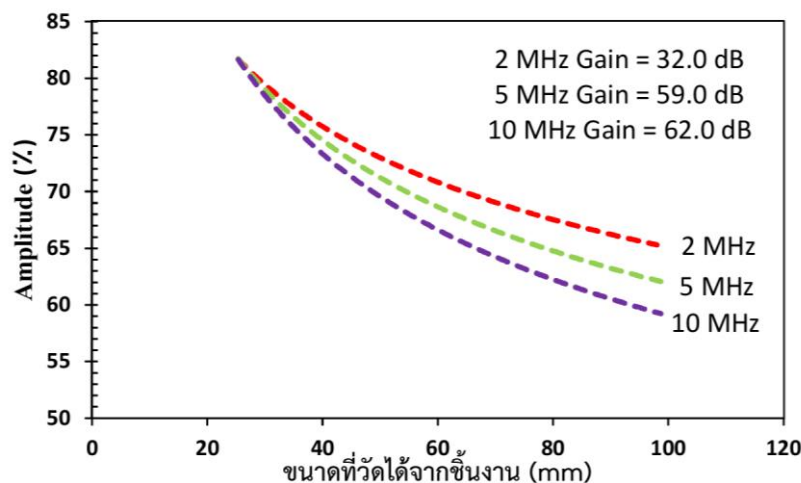


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 5 MHz



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนของ SUS304 ที่ความถี่ 10 MHz

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 กับ รูปที่ 4.18 แสดงผลการตรวจสอบสัญญาณการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่มีขนาด 25, 50, 75, และ 100 mm ที่ความถี่ 2, 5 และ 10 MHz กับ พบว่า ขนาดความยาวของชิ้นงานตรวจสอบเริ่มต้น คือ 25 mm มีค่าการลดทอนของคลื่นเสียงอยู่ที่ 80 เปอร์เซ็นต์แอมพิจูด ทั้ง 3 ความถี่ของหัวตรวจสอบ จากนั้นเมื่อทำการตรวจที่ความยาวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 50, 75, และ 100 mm พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดของการลดทอนคลื่นเสียงมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อความยาวของชิ้นงานเพิ่มยาวขึ้น อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนแอมพิจูดมีแนวโน้มลดต่ำตามความถี่ของหัวตรวจสอบที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่รูป 4.19 แสดงการเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SUS304 ตามความถี่ความถี่ 2 MHz, 5 MHz และ 10 MHz พบว่าจากกราฟมีการลดทอนคลื่นเสียงมีการลดลงตามลำดับความถี่ โดยถ้าคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่น้อย การลดทอนคลื่นเสียงก็จะน้อยตาม แต่ถ้าคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่มาก การลดทอนคลื่นเสียงก็จะมากเช่นกัน

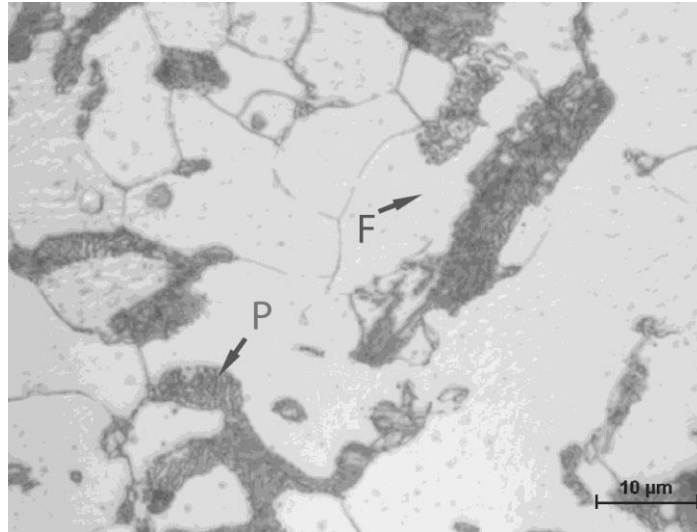


รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงกับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

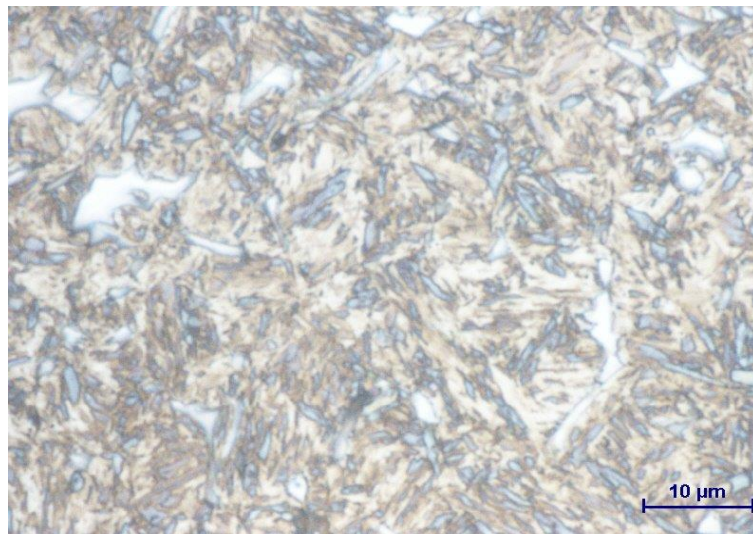
4.3 อิทธิผลของการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ส่งผลโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่น

4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

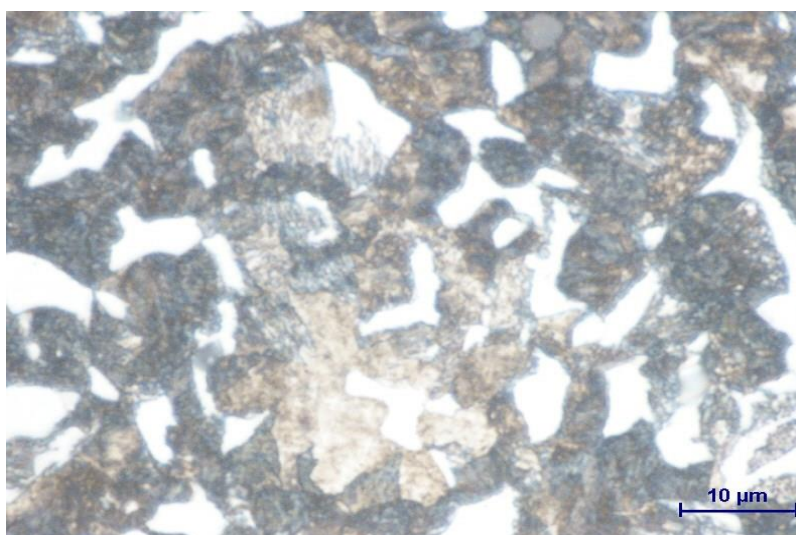
รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 หลังจากการปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อนการอบคืนตัว พบว่า มีขอบเกรนของโครงสร้าง Ferrite เกิดขึ้นเห็นได้อย่างชัดเจน ในขณะที่โครงสร้าง Pearlite เกิดการเคลื่อนที่ไปอยู่ตามขอบเกรนของเฟส Ferrite และยังสามารถมองเห็นการเรียงสลับแบบลายเส้นของโครงสร้างเฟส Ferrite สลับกับเฟส Cementite ในบริเวณโครงสร้าง Pearlite โดยแสดงดังลูกศรชี้ในรูป 4.20 และในรูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบแข็งด้วยน้ำพบว่า มีลักษณะของโครงสร้าง Ferrite สลับปะปนอยู่ในรูปน้อย ในขณะที่โครงสร้างสีน้ำตาลซึ่งลักษณะคล้ายรูปเข็มปลายแหลมบ่งบอกถึงลักษณะคล้ายโครงสร้าง Martensite ที่เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในรูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำและทำอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 C เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา ผลการตรวจสอบโครงสร้างพบว่า มีโครงสร้างของเฟส Ferrite เป็นรูปร่างที่ไม่สมมาตรค่อนข้างใหญ่ ในขณะที่โครงสร้าง Pearlite มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มและบางบริเวณจะเห็นเฟส Ferrite สลับกับ Cementite ดังในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing)



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านการชุบแข็ง (Quenching)



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านการชุบแข็ง (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering)

4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ

วัสดุทดสอบ (เกรด)	จำนวนของการทดสอบ (ครั้งที่)			ค่าเฉลี่ย (Unit : HV)
	1	2	3	
SS400	254	225	283	254
SS400 (อบปกติ)	128	132	132	131
S45C	251	298	223	257
S45C (ชุบแข็ง)	674	615	597	628
S45C (อบคืนตัว)	370	358	346	358
SUS304	218	210	212	213

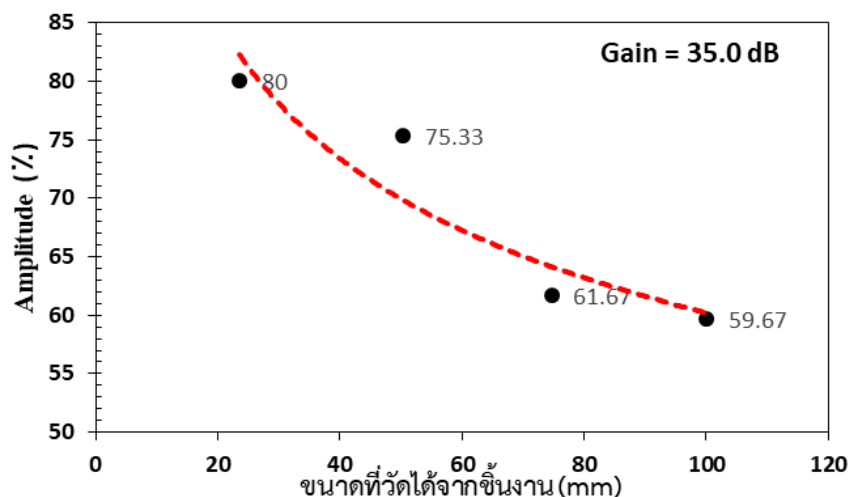
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุต้นแบบของแท่งมาตรฐานสอบเทียบ V1 พบว่า วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ 254 HV เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 257 HV และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 213 HV อย่างไรก็ตามเมื่อนำวัสดุเหล็กกล้า SS400 และ S45C ผ่านกระบวนการทางความร้อนอบปกติพบว่า เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 131 HV ซึ่งมีค่าความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน นอกจากนั้นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน การชุบแข็งและการอบคืนตัว มีค่าความ

แข็งสูงกว่าที่ผ่านไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 0.45 % ซึ่งง่ายต่อการเพิ่มความแข็ง

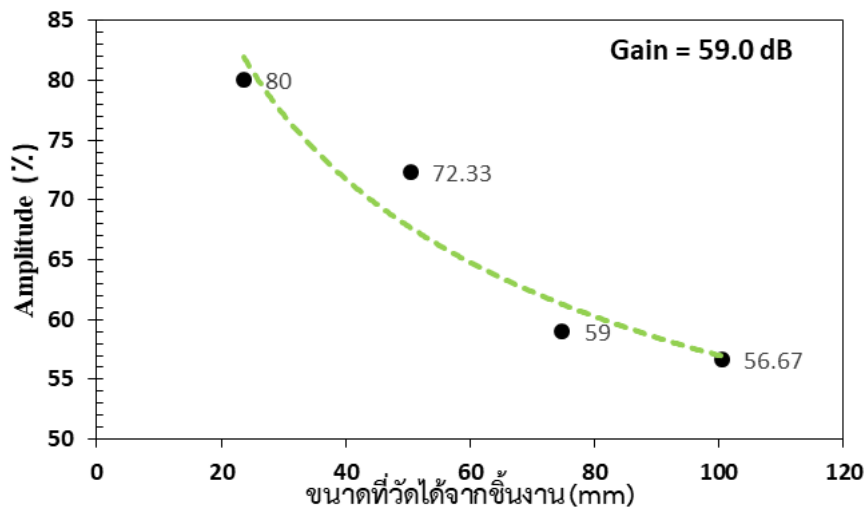
4.3.3 ผลการตรวจสอบการลดทอนของคลื่นความถี่สูงของวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

ก) วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing)

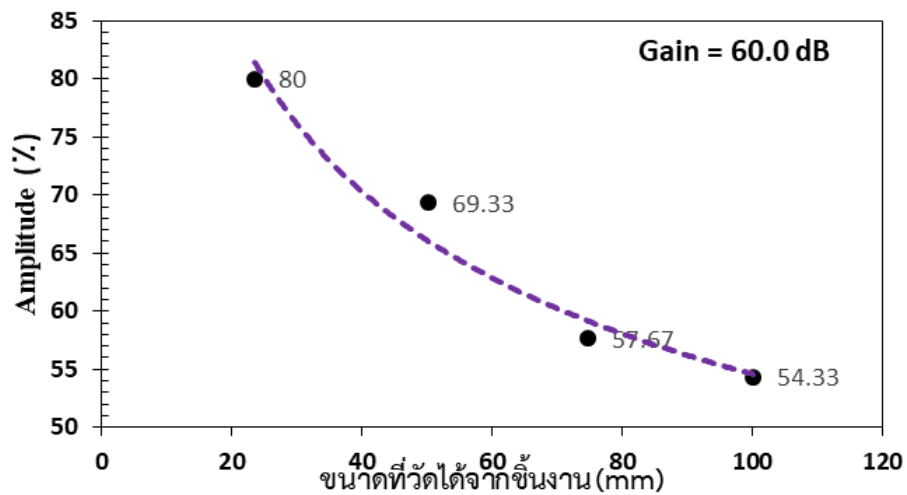
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดกับขนาดความยาวของชิ้นงาน โดยใช้หัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2 MHz ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ซึ่งส่งผลต่อการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงในชิ้นงานตรวจสอบ พบว่า ชิ้นงานตรวจสอบที่มีขนาด 25 mm มีเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดสูงอยู่ที่ 80 % จากนั้นทำการตรวจสอบชิ้นงานที่มีความยาวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 50, 75, และ 100 mm พบว่าลักษณะของเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดมีแนวโน้มลดลงตามความยาวของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นที่ทำการตรวจสอบ โดยชิ้นงานตรวจสอบที่มีความยาว 100 mm มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแอมพิจูดอยู่ที่ 59.67 % จากนั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 5 MHz แสดงดังกราฟ รูปที่ 4.24 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแอมพิจูดมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกับหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2 MHz และในรูปที่ 4.25 ได้ทดลองเปลี่ยนหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 10 MHz พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแอมพิจูดมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกับหัวตรวจสอบที่มีความถี่ 2 และ 5 MHz กับขนาดชิ้นงานตรวจสอบที่ยาวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 2 MHz

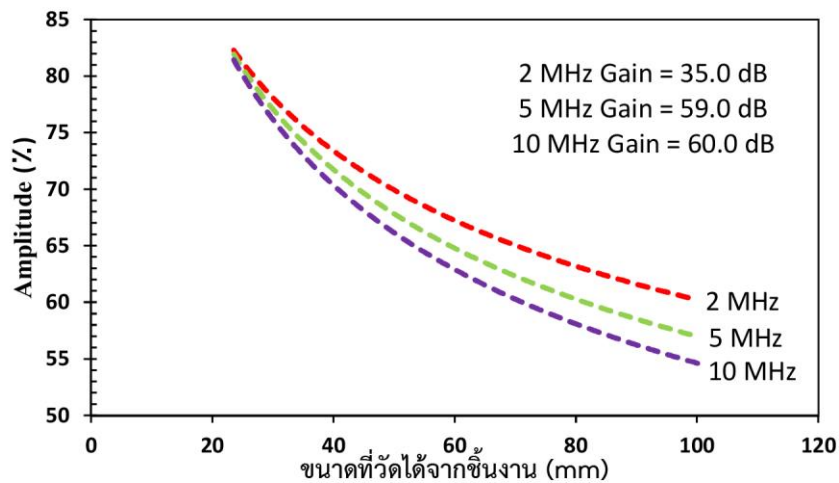


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 5 MHz



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ความถี่ 10 MHz

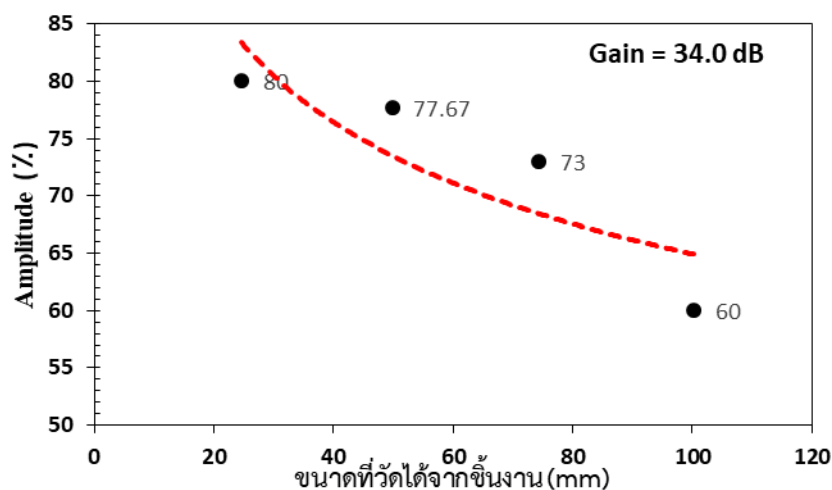
ในรูปที่ 4.26 แสดงกราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing) ที่ใช้หัวตรวจสอบความถี่ 2, 5 และ 10 MHz พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดของการลดทอนของคลื่นเสียงมีค่าใกล้เคียงกันมากที่แต่ละความยาวของชิ้นงานตรวจสอบ อย่างไรก็ตามหากเปรียบกับรูปที่ 4.11 ของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน การอบอ่อนแบบปกติ พบว่า การใช้หัวตรวจสอบความถี่ 2 MHz มีการลดทอนของคลื่นเสียงน้อยกว่าการใช้หัวตรวจสอบ 5 และ 10 MHz สาเหตุของกราฟที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากโครงสร้างของเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน



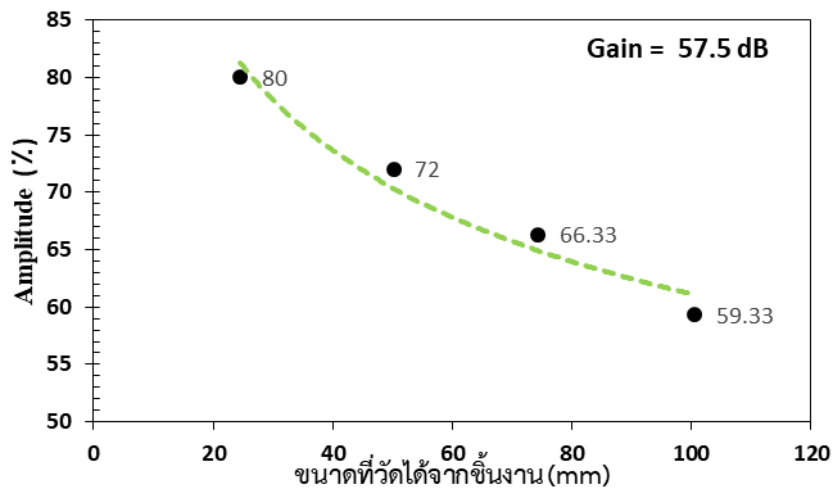
รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ผ่านการอบอ่อนแบบปกติ (normalizing)

ข) การลดทอนของคลื่นความถี่สูงของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง

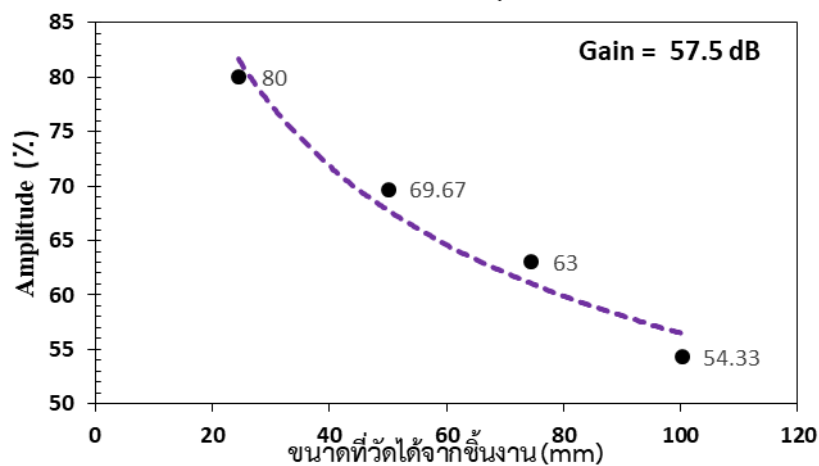
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการลดทอนของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งโดยใช้หัวตรวจสอบความถี่ 2 MHz ผลการตรวจสอบพบว่า ขนาดชิ้นงานที่ตรวจสอบยาว 50 และ 75 mm สัญญาณการลดทอนของคลื่นเสียงมีค่าเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดใกล้เคียงกัน ในขณะที่การตรวจสอบชิ้นงานยาว 100 mm เปอร์เซ็นต์แอมพิจูดการลดทอนของคลื่นเสียงมีค่าการลดทอนค่อนข้างสูง ในขณะที่ทำการตรวจสอบด้วยหัวตรวจสอบความถี่ 5 MHz ดังรูปที่ 4.28 พบว่าขนาดชิ้นงานตรวจสอบที่ 50 และ 75 mm มีค่าการลดทอนของคลื่นเสียงของเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดมีค่าเข้าใกล้เส้นโค้งแนวโน้มมากกว่าการใช้หัวตรวจสอบ 2 MHz ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการใช้หัวตรวจสอบ 10 MHz ในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 2 MHz



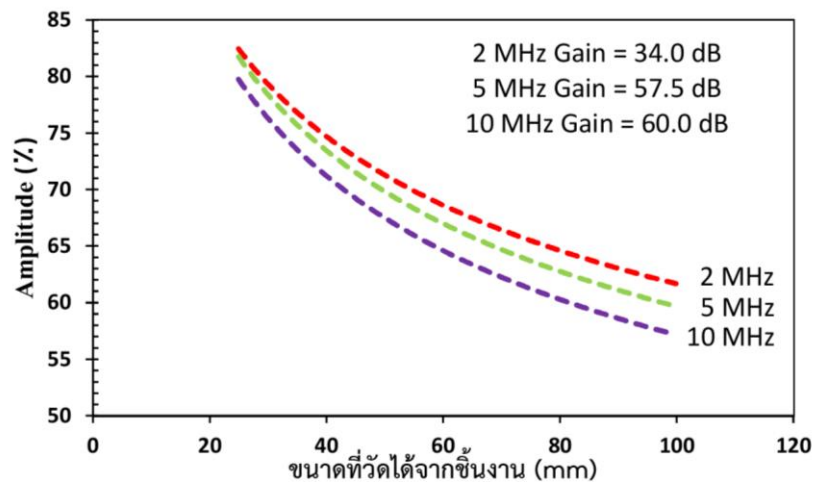
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 5 MHz



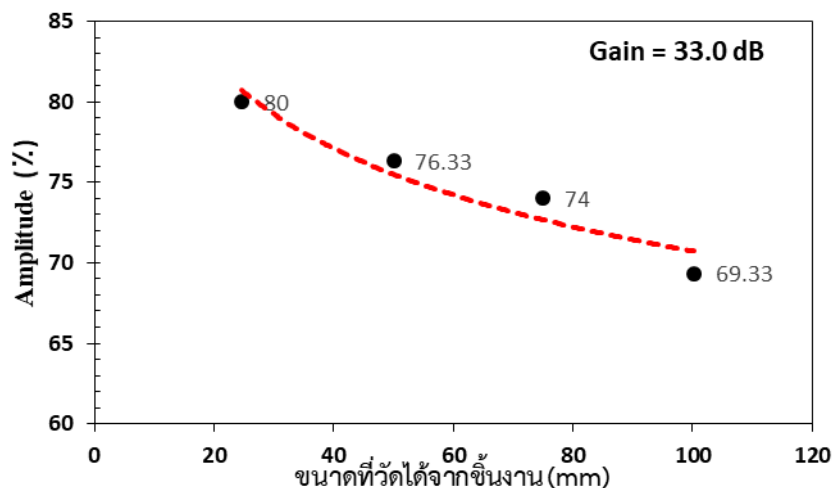
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ที่ความถี่ 10 MHz

รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์แอมพิจูดของการลดทอนของคลื่นเสียงที่ความถี่ 2, 5 และ 10 MHz ของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง พบว่าจากกราฟมีการลดทอนคลื่นเสียงมีการลดลงตามลำดับความถี่ โดยถ้าคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่น้อย การลดทอนคลื่นเสียงก็จะน้อยตาม แต่ถ้าคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่มาก การลดทอนคลื่นเสียงก็จะมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.15 ของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน การชุบแข็ง พบว่า ลักษณะของกราฟมีความคล้ายคลึงกัน

หรือไม่แตกต่างกันเท่าไร กล่าวสรุปคือ การปรับสมบัติทางความร้อนของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ไม่มีผลต่อการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง



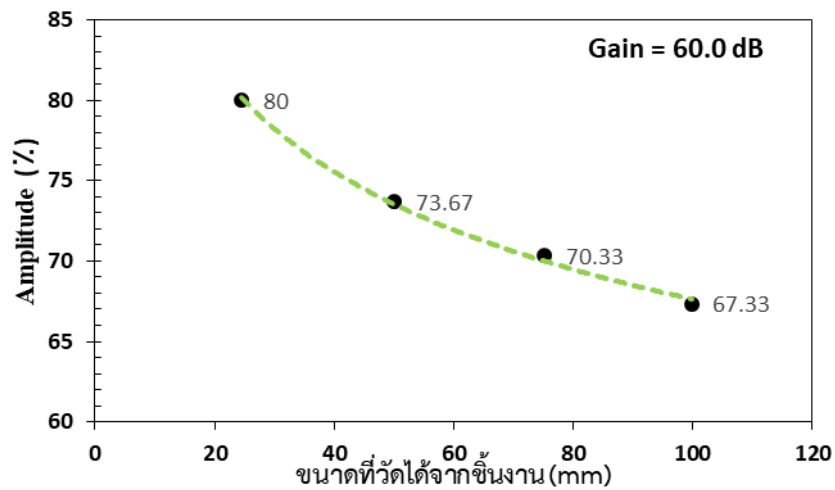
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งตามความถี่ต่างๆ



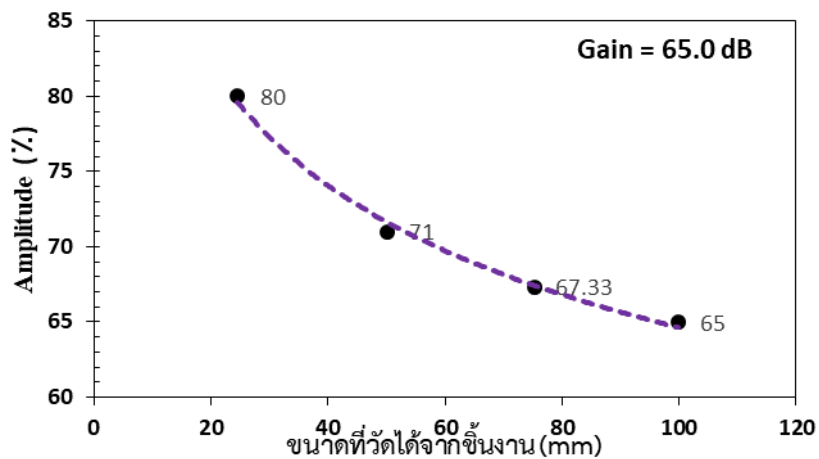
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 2 MHz

จากรูปที่ 4.31 แสดงการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ความถี่ 2 MHz ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของชิ้นงาน (แกน X) และแอมพลิจูดของคลื่นเสียง (แกน Y) โดยจุดแรกของเส้นการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของชิ้นงานจะเริ่มต้นแอมพลิจูดที่ 80 และจะลดลงจนถึงแอมพลิจูดสุดท้ายที่ค่า 69.33 และในรูปที่ 4.32 ที่ความถี่ 5 MHz แอมพลิจูดสุดท้ายจะลดลงอยู่ที่ค่า 67.33 ซึ่งมีค่าการลดลงของแอมพลิจูดน้อยกว่าที่ใช้หัวตรวจสอบที่ความถี่ 2 MHz ในขณะที่การตรวจสอบการลดทอนคลื่นเสียงที่ใช้หัวตรวจสอบที่ความถี่ 10 MHz ดังแสดงในรูปที่

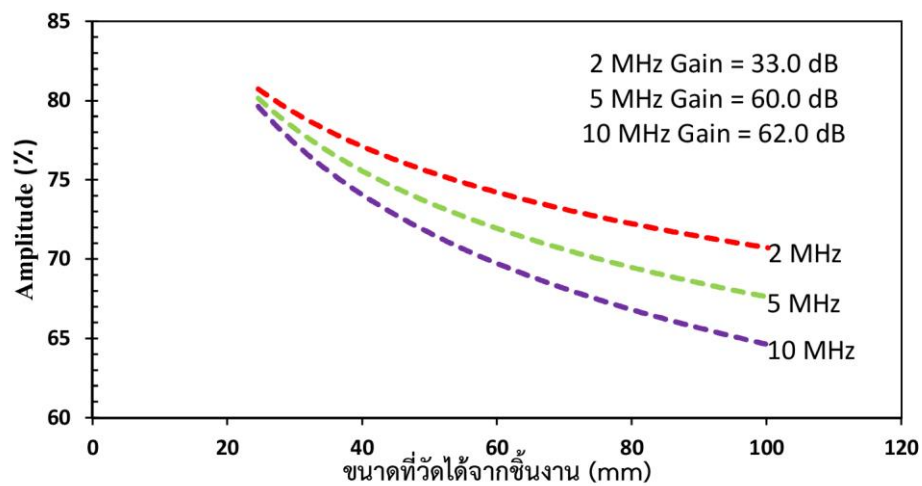
4.33 พบว่าค่าการลดลงของแอมพิทูดจุดสุดท้ายอยู่ที่ 65 อย่างไรก็ตามได้้นำการลดทอนคลื่นเสียงที่มีความถี่ 2, 5 และ 5 MHz มาทำการเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.34 ต่อไป



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 5 MHz



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของสัญญาณการลดทอนของคลื่นความถี่สูงกับขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ที่ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวตามความถี่ต่างๆ

จากการเปรียบเทียบการลดทอนคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวตามความถี่ 2 MHz, 5 MHz และ 10 MHz แสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าจากกราฟมีการลดทอนคลื่นเสียงมีการลดลงตามลำดับความถี่ โดยถ้าคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่น้อย การลดทอนคลื่นเสียงก็จะน้อยตาม ถ้าหากมีคลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีความถี่มากจะส่งผลต่อการลดทอนคลื่นเสียงก็จะมากด้วยเช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นในแท่งมาตรฐานสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงบนชิ้นส่วนอากาศยาน ได้มีการศึกษาวัสดุทดสอบเพื่อสร้างแท่งสอบเทียบมาตรฐานต้นแบบตามมาตรฐาน ASTM E164 โดยที่มีการกำหนดวัสดุสำหรับการทดสอบสมบัติการลดทอนคลื่นเสียงได้แก่ S45C, SS400, และ SUS304 ซึ่งใช้วิธีการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกและใช้หัวส่งสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 2MHz, 5MHz, และ 10 MHz หลังจากนั้นได้นำวัสดุทดสอบมาผ่านกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ การอบชุบแข็ง การอบคืนตัว และการอบปกติ ซึ่งทำให้วัสดุทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางโลหะวิทยาภายใน และทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้ง จากนั้นศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาต่อการลดทอนคลื่นเสียง และทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น การทดสอบความแข็งก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุทดสอบต้นแบบกับแท่งสอบเทียบมาตรฐาน IIW TYPE V1 จากต่างประเทศ

จากวิเคราะห์ผลการทดสอบในการเปรียบเทียบสมบัติการลดทอนคลื่นเสียงระหว่างวัสดุทดสอบกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานต่างประเทศ สามารถสรุปได้ว่าวัสดุทดสอบ SS400 มีการลดทอนคลื่นเสียงที่ใกล้เคียงกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานจากต่างประเทศมากที่สุดในแต่ละความถี่ของหัวส่งสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปผลิตในการสร้างแท่งสอบเทียบมาตรฐานต้นแบบ ขณะที่ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุทดสอบต้นแบบพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ให้ค่าความแข็งต่ำกว่าวัสดุอื่นทั้งก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคทั้งก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อนเมื่อเทียบกับวัสดุทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเห็นอย่างได้ชัดเจนซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและสมบัติการลดทอนคลื่นเสียง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยครั้งต่อไปควรเพิ่มการทดสอบโดยใช้หัวส่งสัญญาณแบบ หัวมุม (Angle probe) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการศึกษาการทดสอบสมบัติการลดทอนคลื่นเสียงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานต้นแบบและแท่งสอบเทียบมาตรฐานต่างประเทศ

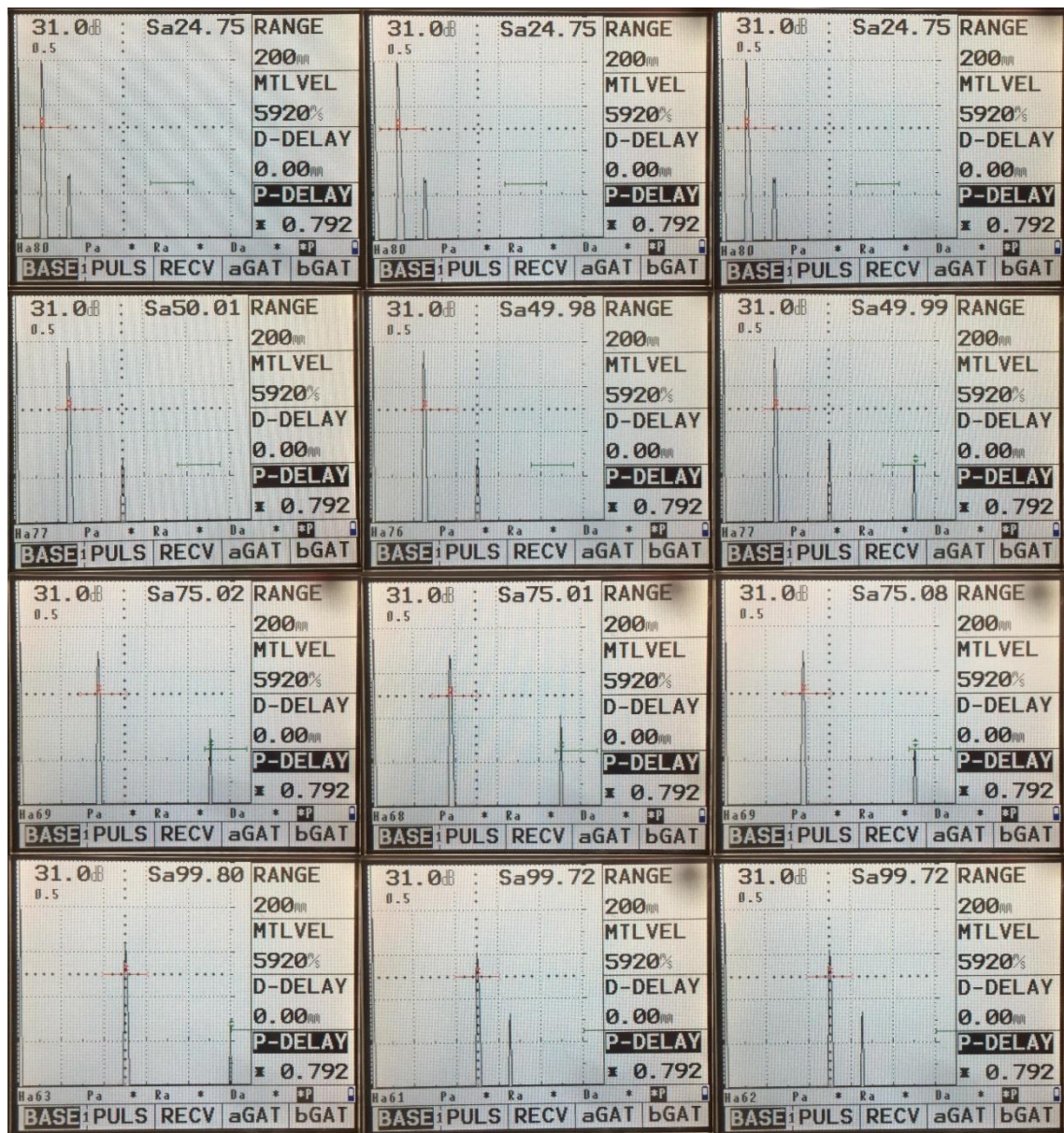
บรรณานุกรม

- [1] การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน [Online]. Available:
http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab_3_Microstructural_Exami
- [2] ธารทิพย์ ฉายศิริวัฒนา บวรโชค ผู้พัฒนา, "การพัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับวัสดุเติมป้องกันการกัดกร่อนบริเวณหน้าแปลนข้อต่อ," วิศวกรรมศาสตร์, วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กทม, 2558.
- [3] บุญเหลือ ขวัญศรี อาษา ประทีปเสน, "ผลกระทบของขนาดเกรนและแนวรืดต่อความเร็วและการลดทอนของคลื่นเสียงความถี่สูง," วิศวกรรมศาสตร์, วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กทม, 2555.
- [4] ใหม่ น้อยพิทักษ์ สิทธิศักดิ์ จารุเนตรรัศมี, "ความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงในการตรวจสอบรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม," วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กทม, 2558.
- [5] นครินทร์ โพธิ์ดอกไม้ อาษา ประทีปเสน, "การสร้างขึ้นทดสอบฝึกหัดการหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ในงานเชื่อมสำหรับการทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง," วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กทม, 2553.
- [6] ชีรพงศ์ นิรัตติวงศกรณ น.ท. สิทธา สายดาราสมุทร ร.น. ชีรทัศน์ พรยังยืน, "การตรวจสอบแนวเชื่อมท่อบรรจุดินขับโดยคลื่นเสียงความถี่สูง," ส. (องค์การมหาชน)กระทรวงกลาโหม, Ed., ed. นนทบุรี, 2555.
- [7] ดิเรก หาญณรงค์ อาษา ประทีปเสน, "ผลกระทบของการพันพอกอลูมิเนียมด้วยความร้อนต่อการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง," วศ.ม., ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กทม, 2555.
- [8] D. Dobrotă, "Vulcanization of Rubber Conveyor Belts with Metallic Insertion Using Ultrasounds," *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1160-1166, 2015/01/01/ 2015.
- [9] E. Pan, J. Rogers, S. K. Datta, and A. H. Shah, "Mode selection of guided waves for ultrasonic inspection of gas pipelines with thick coating," *Mechanics of Materials*, vol. 31, pp. 165-174, 1999/03/01/ 1999.
- [10] Junho Song and D. E. Chiment, "Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacitive Air-Coupled Ultrasonic Transducer," *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 4, pp. 1-19, 2006.

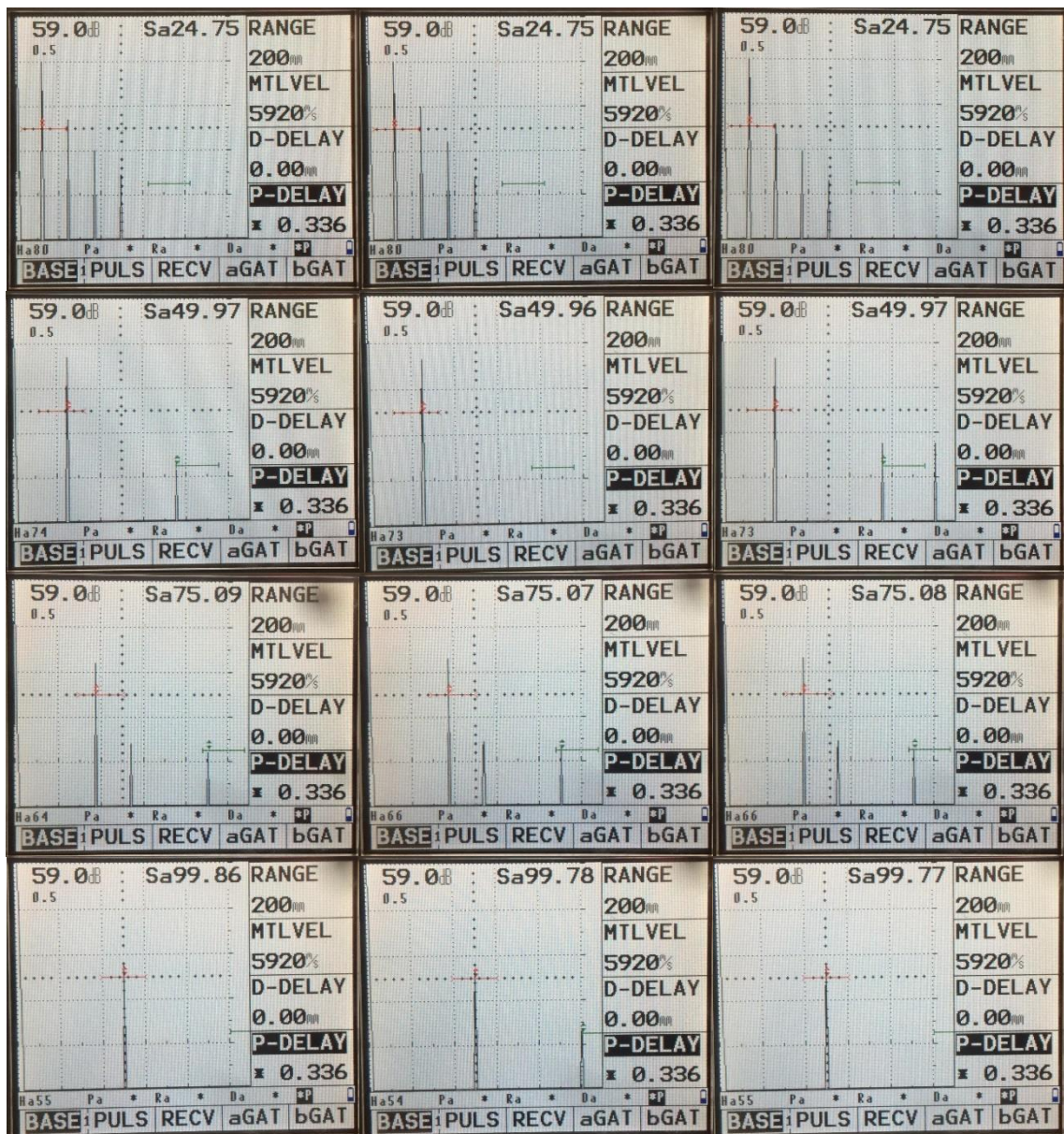
- [11] M. Arone, D. Cerniglia, and V. Nigrelli, "Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 176, pp. 95-101, 2006/06/06/ 2006.

ภาคผนวก ก.
ผลการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงวัสดุทดสอบ

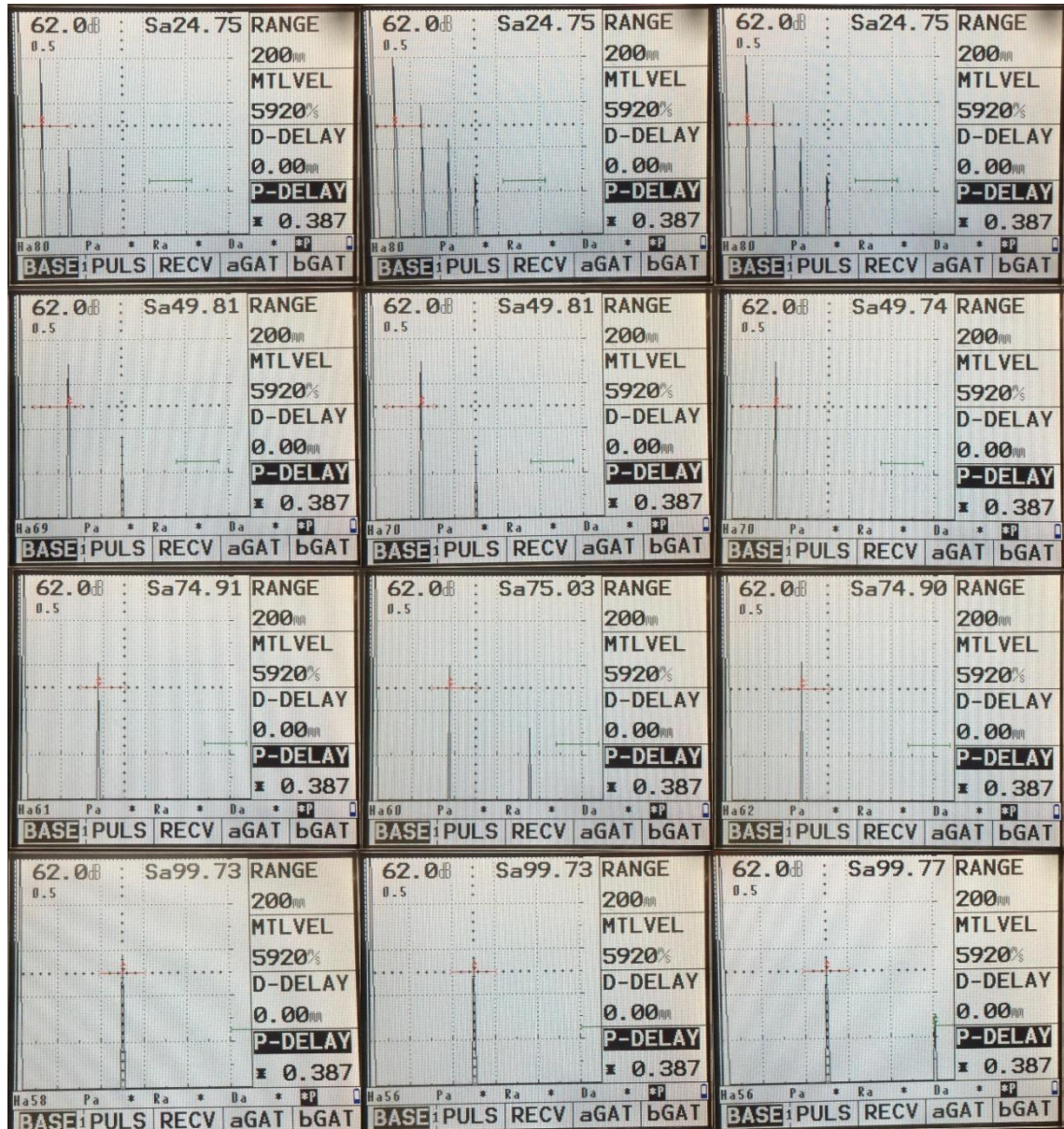
ก.1 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ความถี่ 2 MHz



ก.2 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ความถี่ 5 MHz



ก.3 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ความถี่ 10 MHz



ก.4 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ SS400

ความถี่ 2 MHz

Gain = 31.0 Probe Delay = 0.792 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.75	80	50.01	77	75.02	69	99.8	63
ครั้งที่ 2	24.75	80	49.98	76	75.01	68	99.72	61
ครั้งที่ 3	24.75	80	49.99	77	75.08	69	99.72	62
ค่าเฉลี่ย	24.75	80	49.99	76.67	75.04	68.67	99.75	62

ความถี่ 5 MHz

Gain = 59.0 Probe Delay = 0.336 μ s

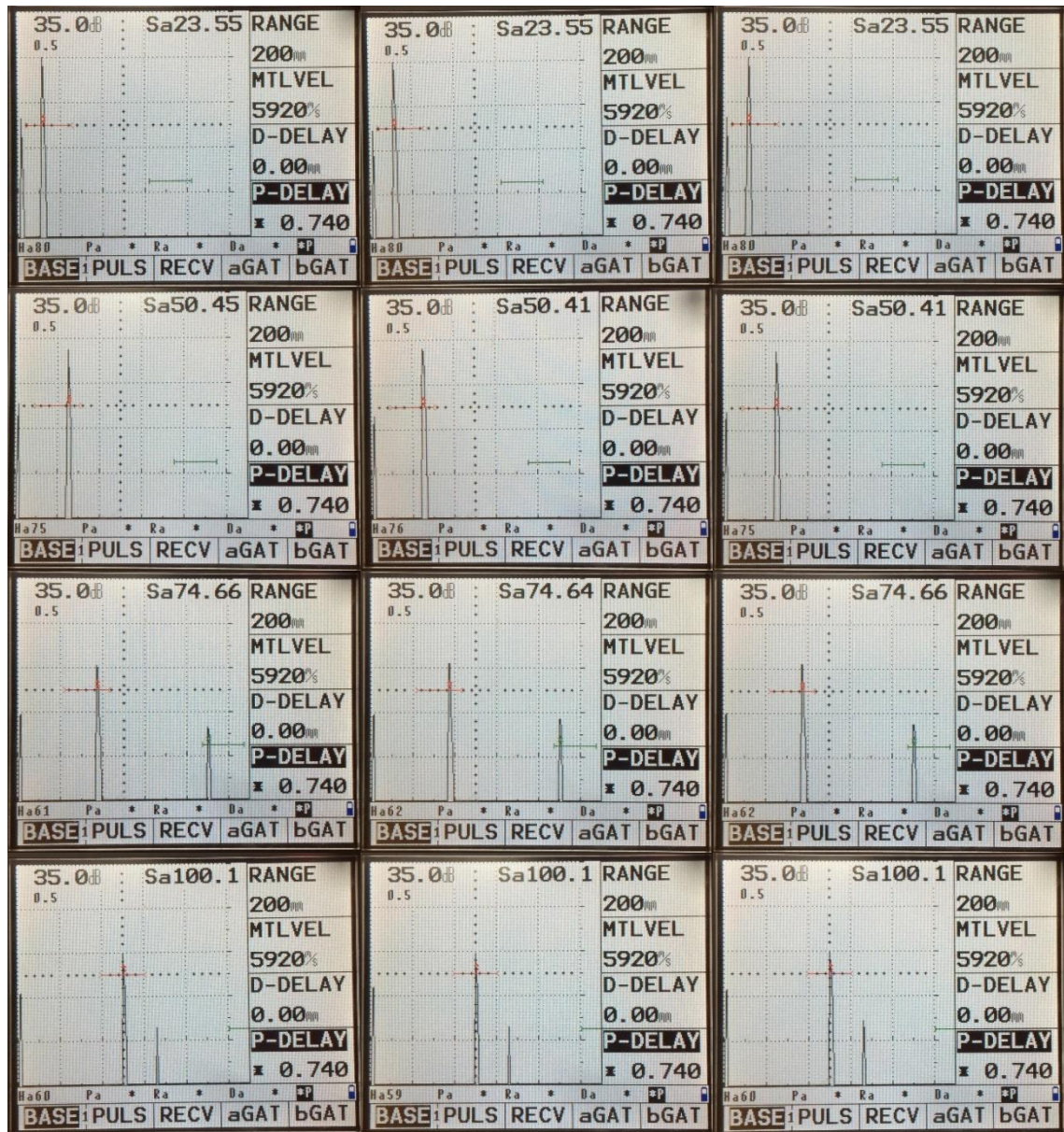
ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.75	80	49.97	74	75.09	64	99.86	55
ครั้งที่ 2	24.75	80	49.96	73	75.07	66	99.78	54
ครั้งที่ 3	24.75	80	49.97	73	75.08	66	99.77	55
ค่าเฉลี่ย	24.75	80	49.97	73.33	75.08	65.33	99.8	54.67

ความถี่ 10 MHz

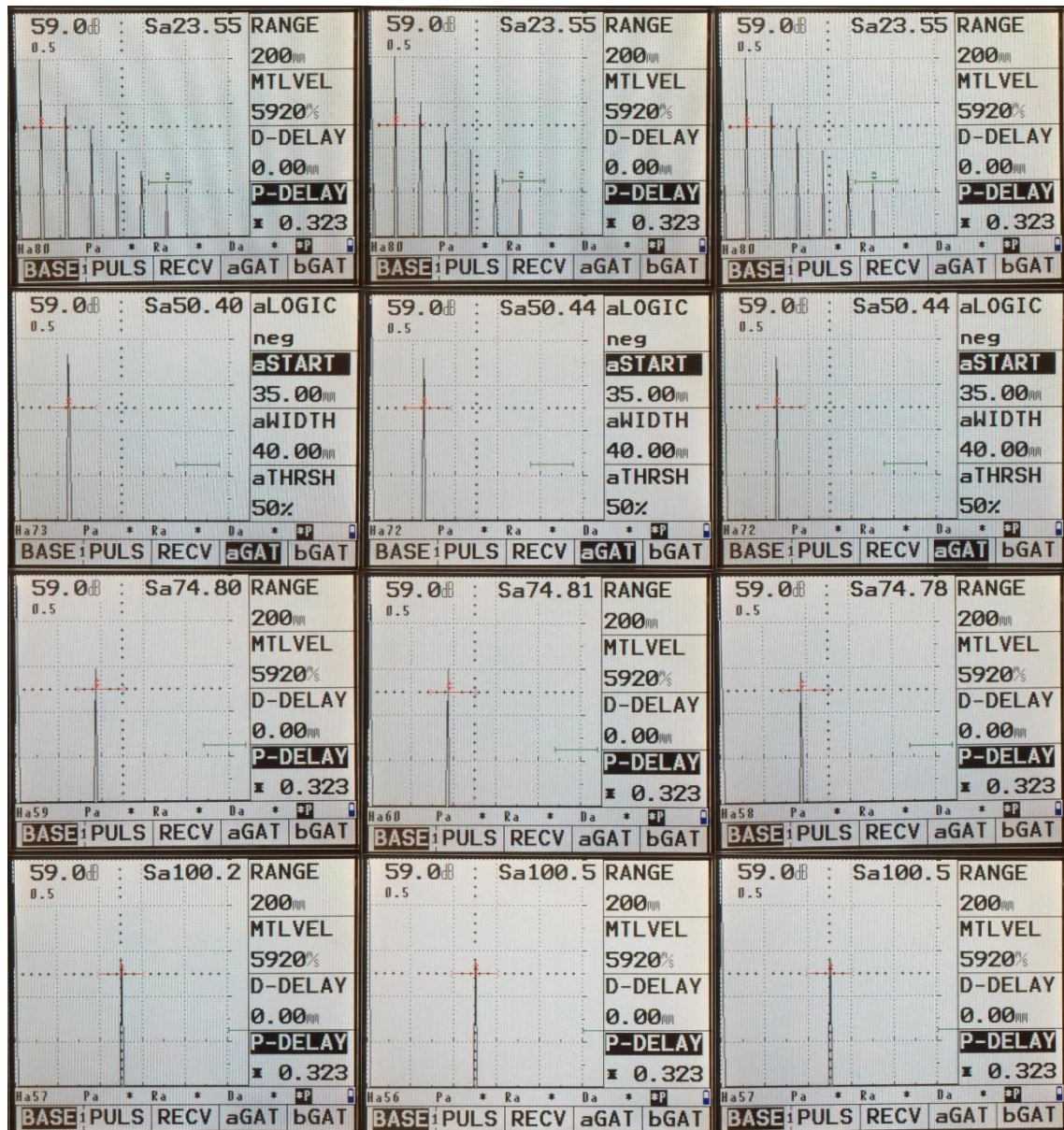
Gain = 62.0 Probe Delay = 0.387 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.75	80	49.81	69	74.91	61	99.73	58
ครั้งที่ 2	24.75	80	49.81	70	75.03	60	99.73	56
ครั้งที่ 3	24.75	80	49.74	70	74.9	62	99.77	56
ค่าเฉลี่ย	24.75	80	49.79	69.67	74.95	61	99.74	56.67

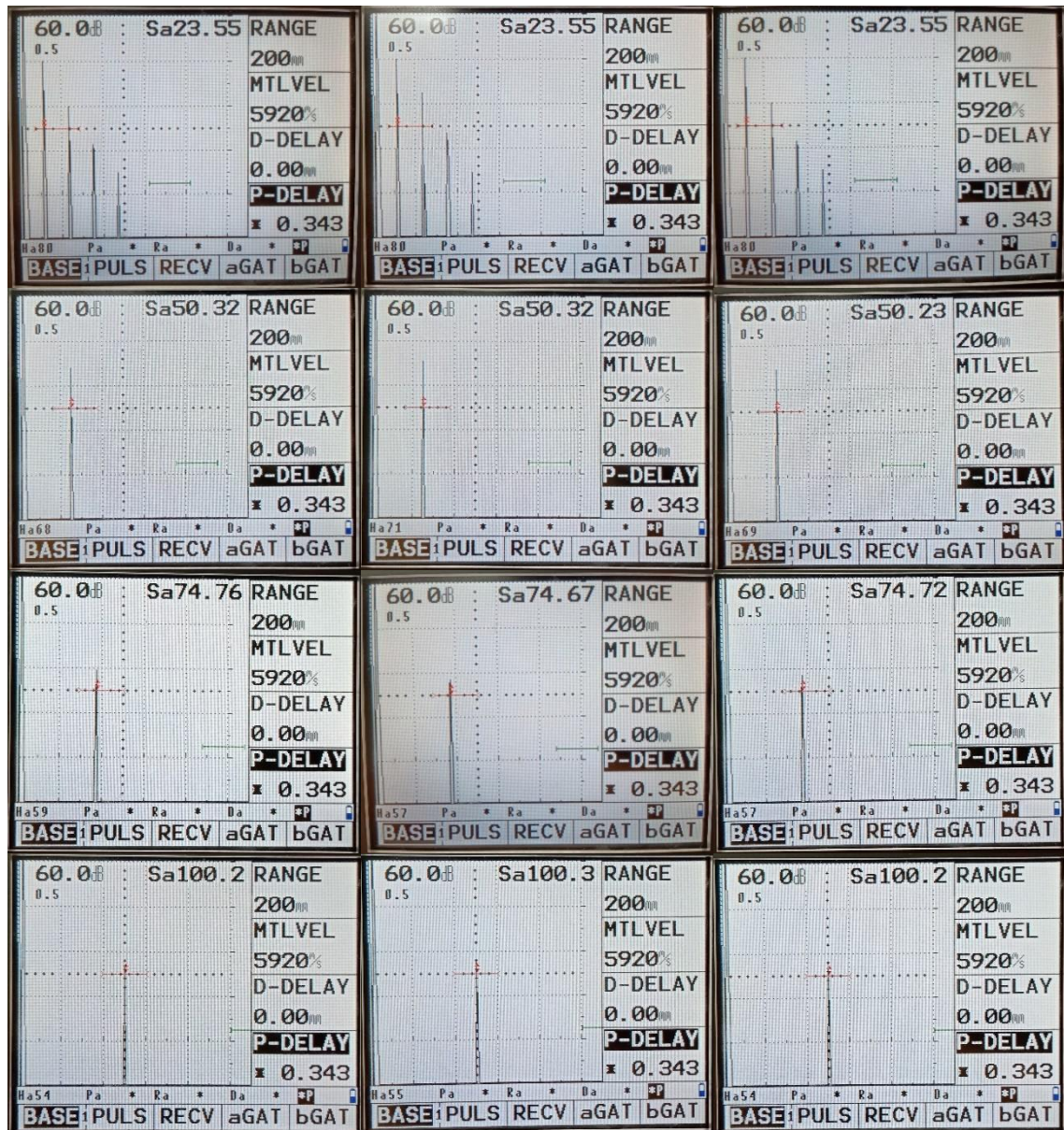
ก.5 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ ความถี่ 2 MHz



ก.6 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ ความถี่ 5 MHz



ก.7 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SS400 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ ความถี่ 10 MHz



ก.8 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ SS400 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ

ความถี่ 2 MHz

Gain = 35.0 dB Probe Delay = 0.740 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	23.55	80	50.45	75	74.66	61	100.1	60
ครั้งที่ 2	23.55	80	50.41	76	74.64	62	100.1	59
ครั้งที่ 3	23.55	80	50.41	75	74.66	62	100.1	60
ค่าเฉลี่ย	23.55	80	50.42	75.33	74.65	61.67	100.1	59.67

ความถี่ 5 MHz

Gain = 59.0 dB Probe Delay = 0.323 μ s

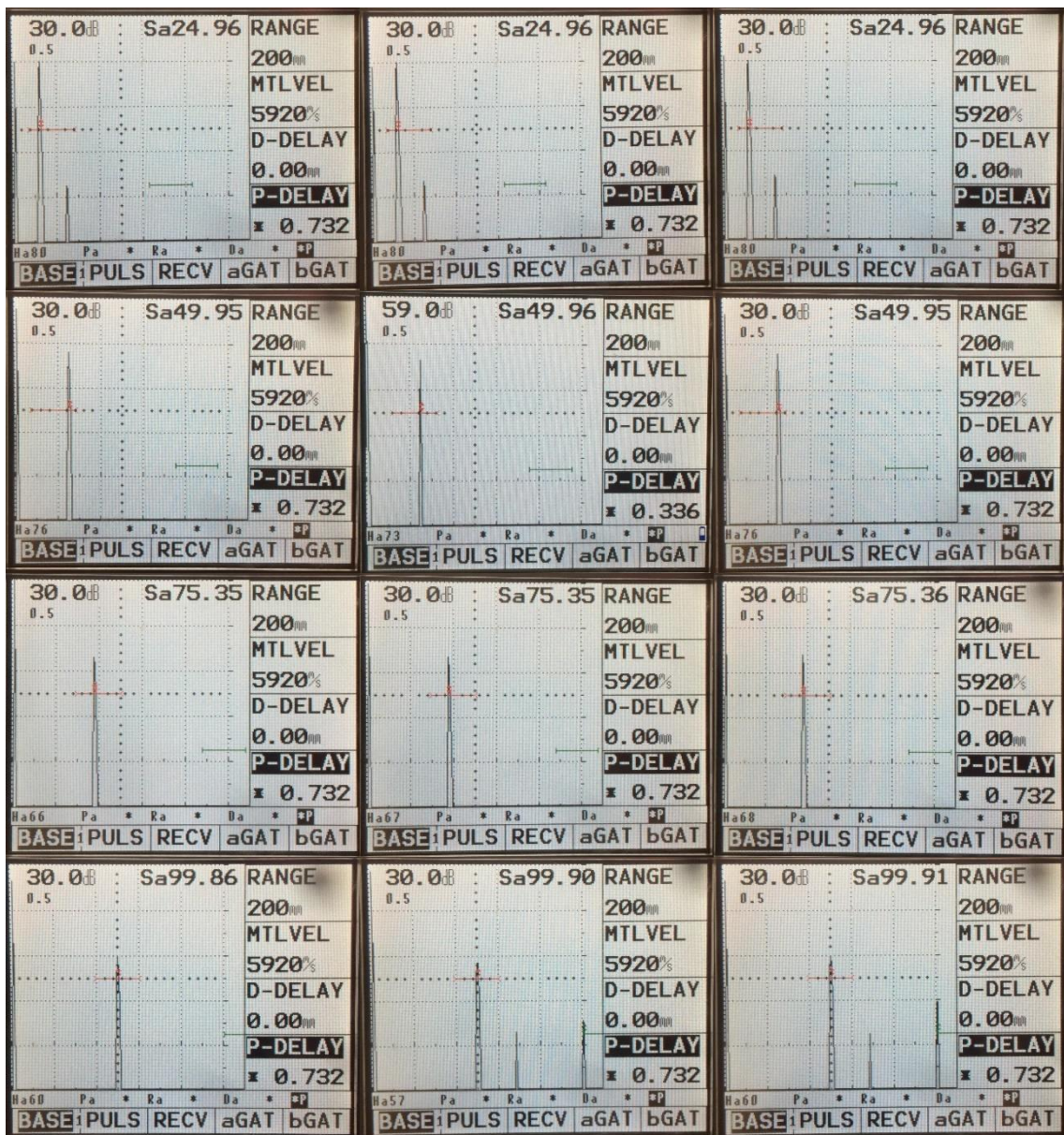
ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	23.55	80	50.4	73	74.8	59	100.2	57
ครั้งที่ 2	23.55	80	50.44	72	74.81	60	100.5	56
ครั้งที่ 3	23.55	80	50.44	72	74.78	58	100.5	57
ค่าเฉลี่ย	23.55	80	50.43	72.33	74.8	59	100.4	56.67

ความถี่ 10 MHz

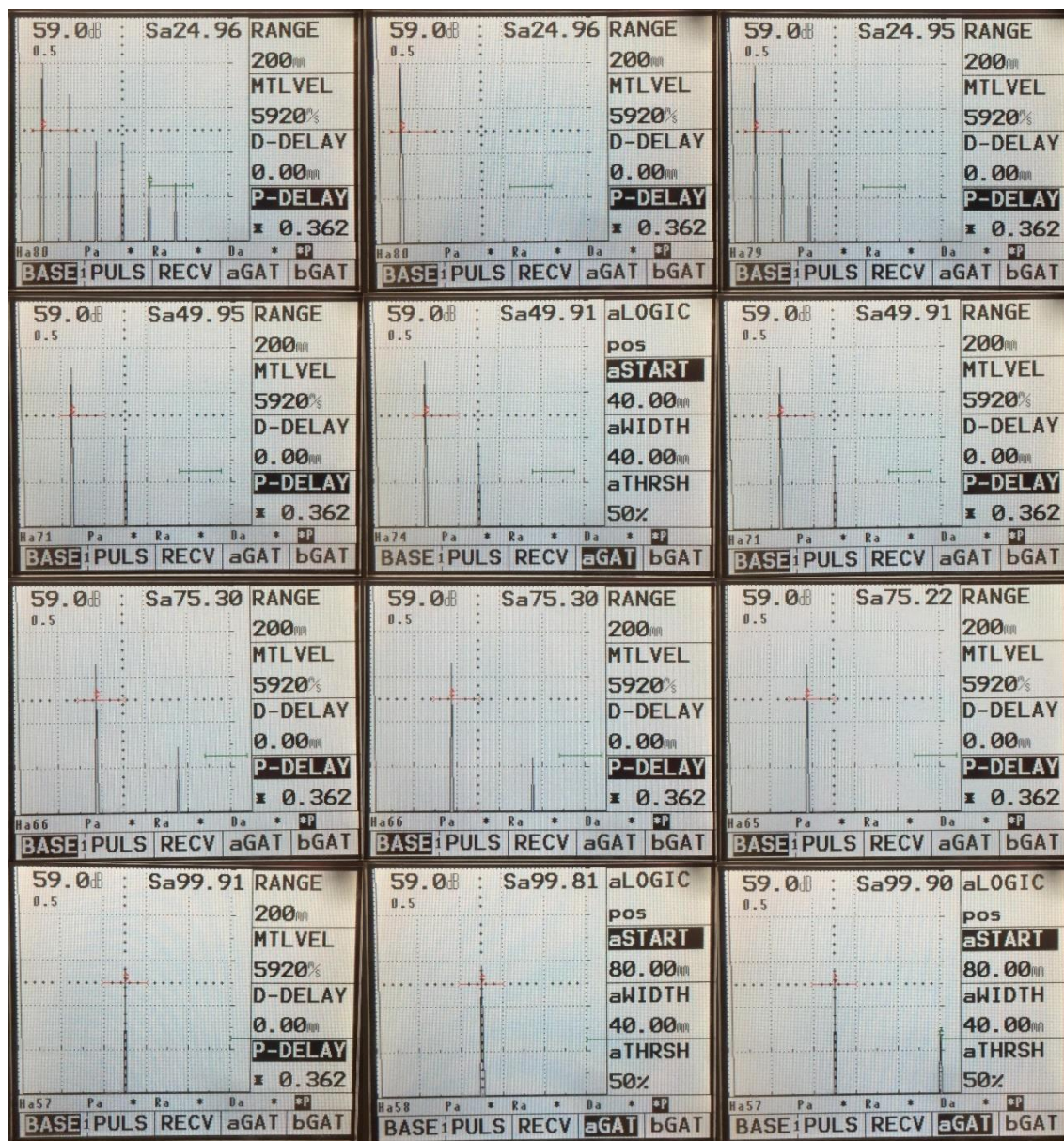
Gain = 60 dB Probe Delay = 0.343 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	23.55	80	50.32	68	74.76	59	100.2	54
ครั้งที่ 2	23.55	80	50.32	71	74.67	57	100.3	55
ครั้งที่ 3	23.55	80	50.23	69	74.72	57	100.2	54
ค่าเฉลี่ย	23.55	80	50.29	69.33	74.72	57.67	100.23	54.33

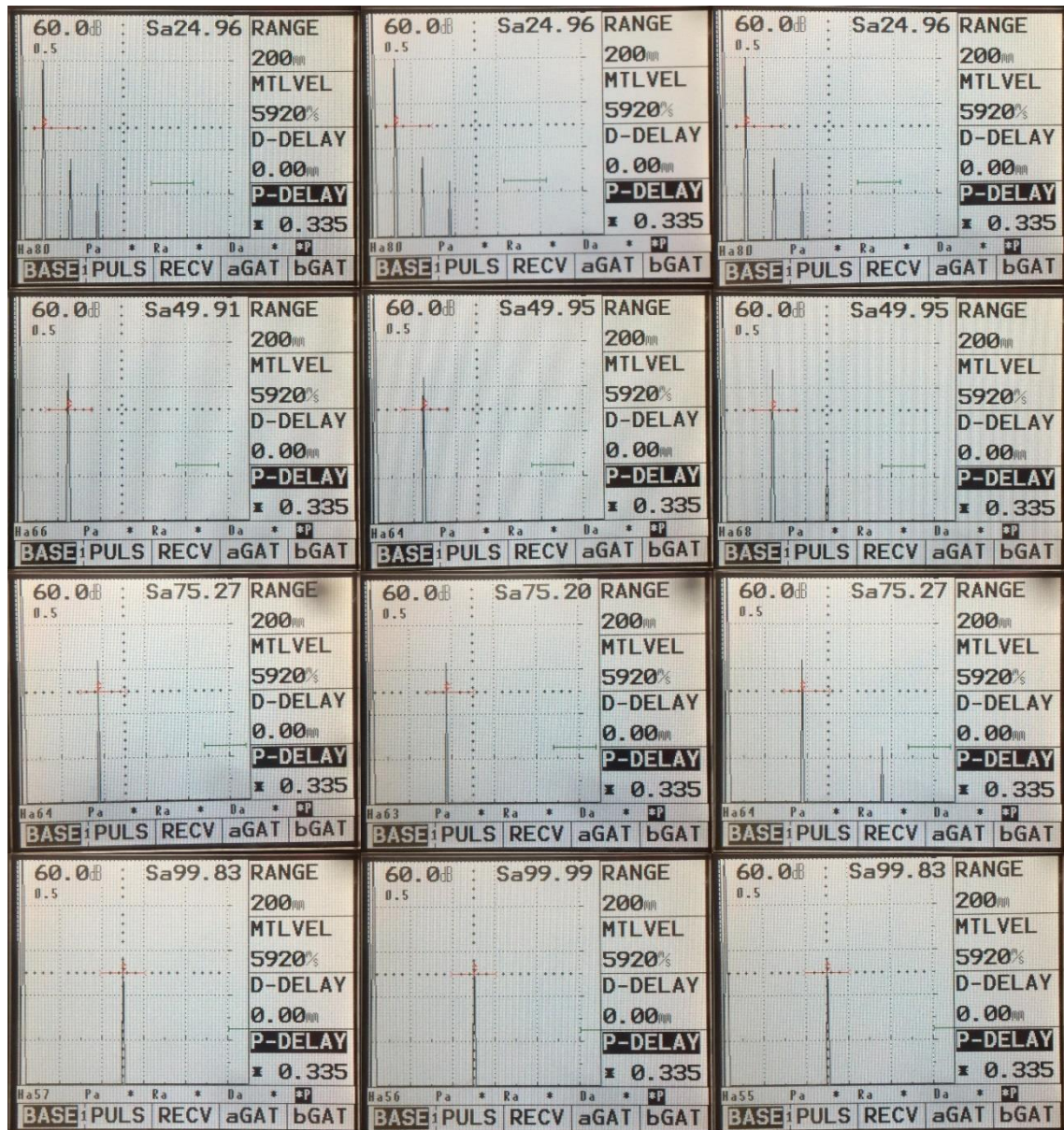
ก.9 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ความถี่ 2 MHz



ก.10 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ความถี่ 5 MHz



ก.11 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ความถี่ 10 MHz



ก.12 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ S45C

ความถี่ 2 MHz

Gain = 30.0 dB Probe Delay = 0.732 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.96	80	49.95	76	75.35	66	99.86	60
ครั้งที่ 2	24.96	80	49.96	73	75.35	67	99.9	57
ครั้งที่ 3	24.96	80	49.95	76	75.36	68	99.91	60
ค่าเฉลี่ย	24.96	80	49.95	75	75.35	67	99.89	59

ความถี่ 5 MHz

Gain = 59.0 Probe Delay = 0.362 μ s

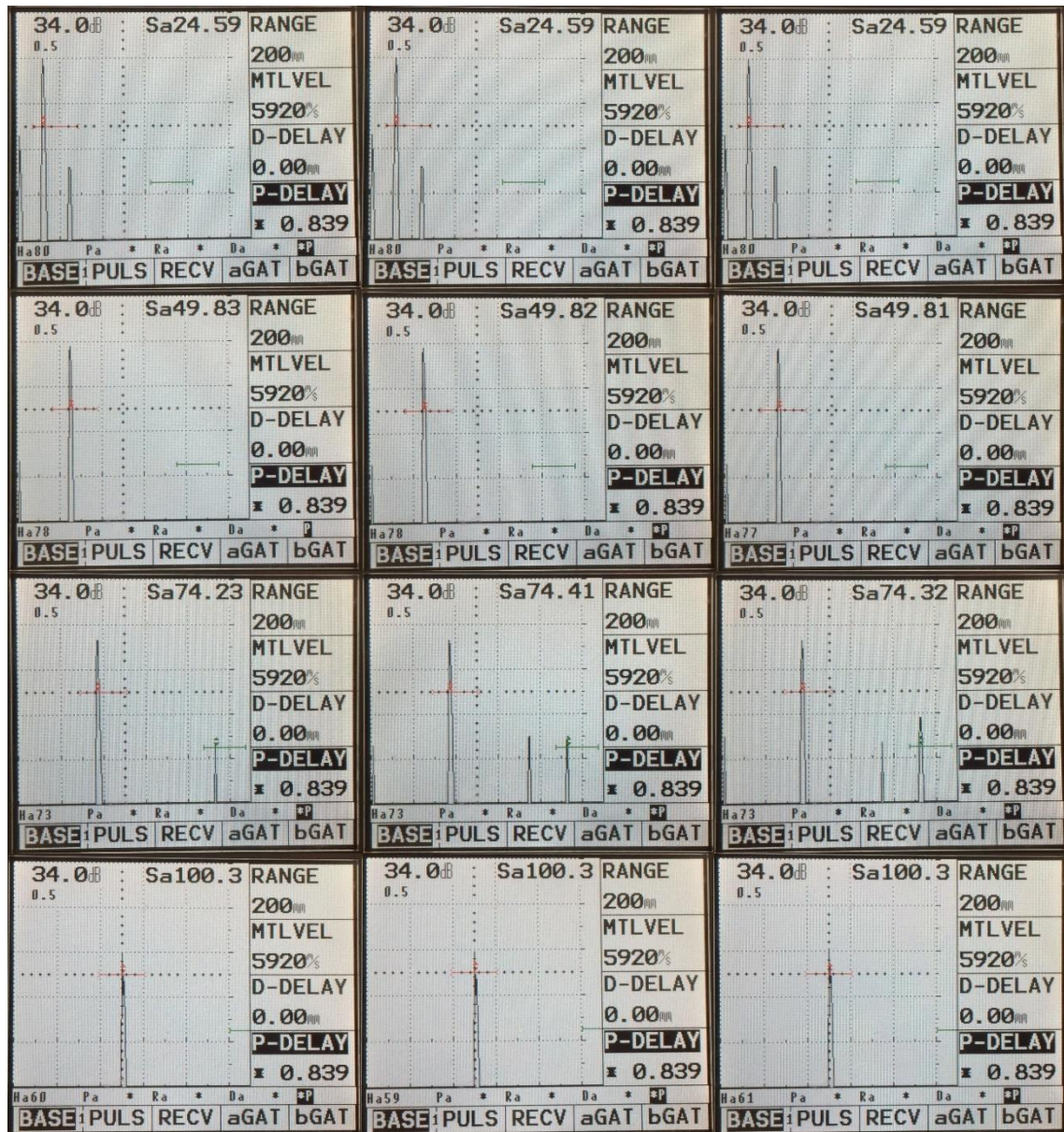
ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.96	80	49.95	71	75.3	66	99.91	57
ครั้งที่ 2	24.96	80	49.91	74	75.3	66	99.81	58
ครั้งที่ 3	24.96	80	49.91	71	75.22	65	99.9	57
ค่าเฉลี่ย	24.96	80	49.92	72	75.27	65.67	99.87	57.33

ความถี่ 10 MHz

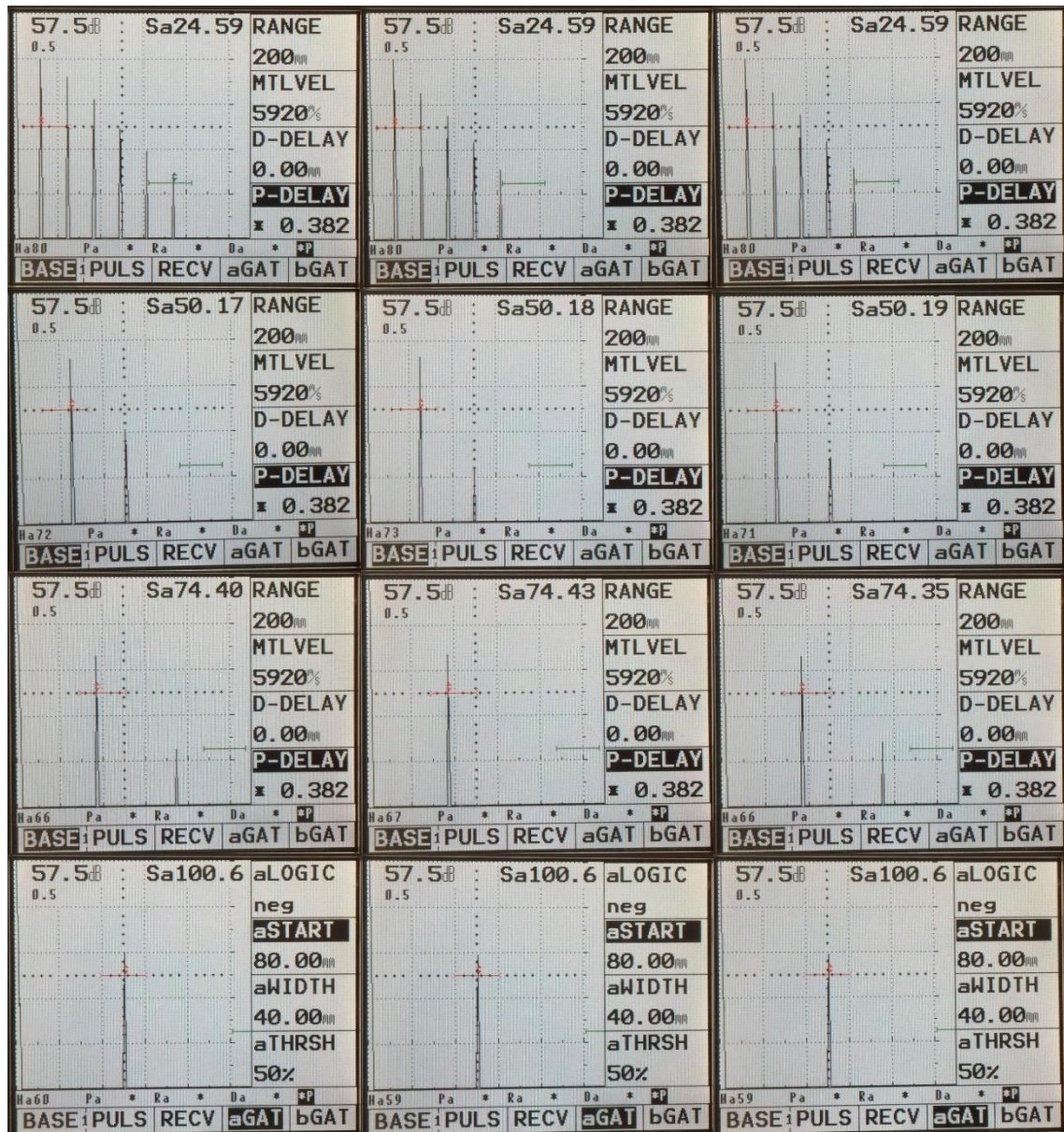
Gain = 60.0 dB Probe Delay = 0.335 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.96	80	49.91	66	75.27	64	99.83	57
ครั้งที่ 2	24.96	80	49.95	64	75.2	63	99.99	56
ครั้งที่ 3	24.96	80	49.95	68	75.27	64	99.83	55
ค่าเฉลี่ย	24.96	80	49.94	66	75.25	63.67	99.88	56

ก.13 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง ความถี่ 2 MHz



ก.14 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่าน
กระบวนการชุบแข็ง ความถี่ 5 MHz



60.0dB : Sa24.59 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha80 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa24.59 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha80 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa24.59 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha80 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT
60.0dB : Sa50.01 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha69 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa49.95 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha70 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa50.12 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha70 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT
60.0dB : Sa74.38 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha63 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa74.37 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha64 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa74.44 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha62 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT
60.0dB : Sa100.1 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha54 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa100.4 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha54 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT	60.0dB : Sa100.4 RANGE 0.5 200nm MTLVEL 5920% D-DELAY 0.00nm P-DELAY x 0.482 Ha55 Pa * Ra * Da * Sp BASE: PULS RECV aGAT bGAT

ก.16 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง

ความถี่ 2 MHz

Gain = 34.0 dB Probe Delay = 0.839 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	49.83	78	74.23	73	100.3	60
ครั้งที่ 2	24.59	80	49.82	78	74.41	73	100.3	59
ครั้งที่ 3	24.59	80	49.81	77	74.32	73	100.3	61
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	49.82	77.67	74.32	73	100.3	60

ความถี่ 5 MHz

Gain = 57.5 dB Probe Delay = 0.382 μ s

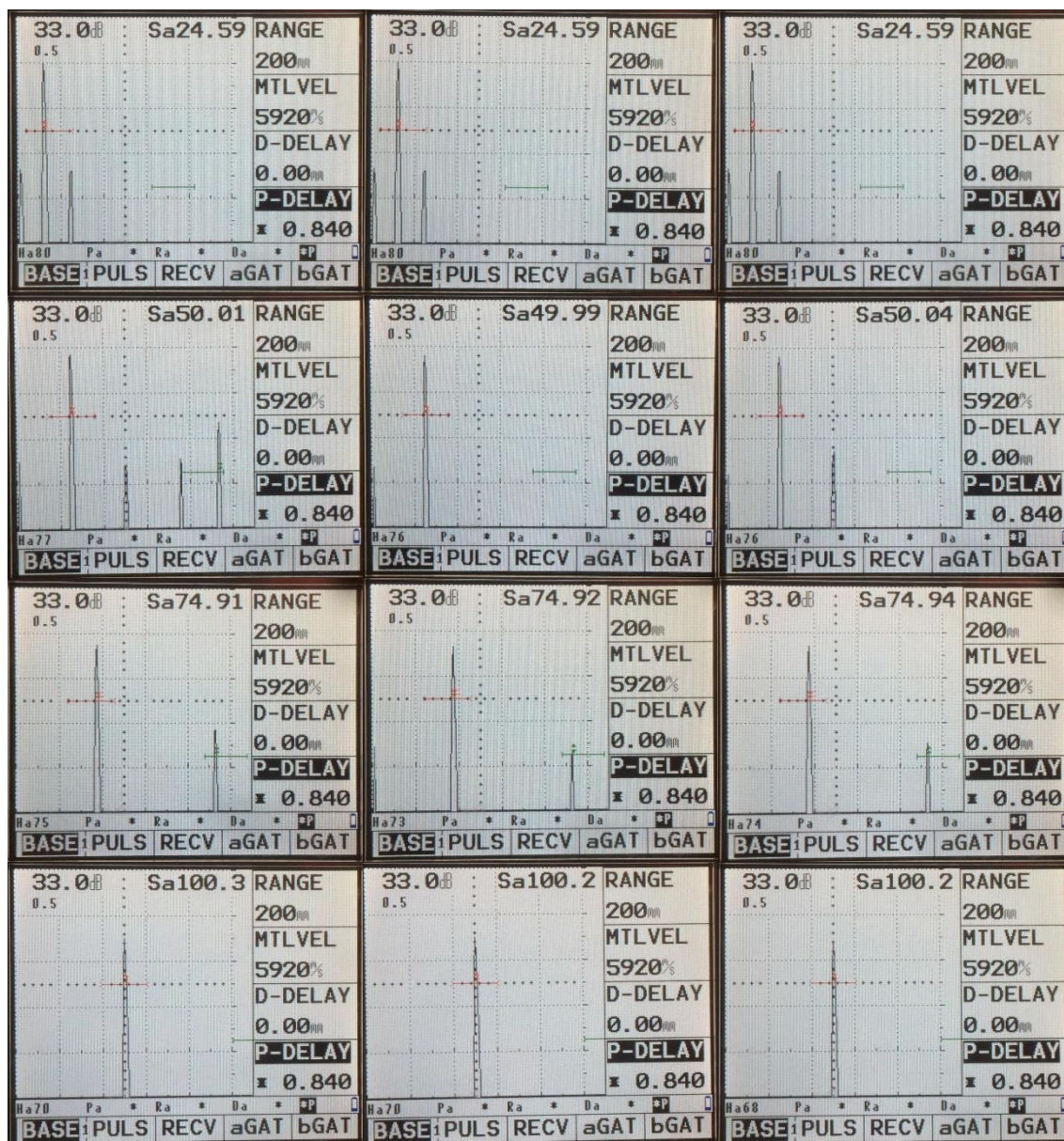
ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	50.17	72	74.4	66	100.6	60
ครั้งที่ 2	24.59	80	50.18	73	74.43	67	100.6	59
ครั้งที่ 3	24.59	80	50.19	71	74.35	66	100.6	59
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	50.18	72	74.39	66.33	100.6	59.33

ความถี่ 10 MHz

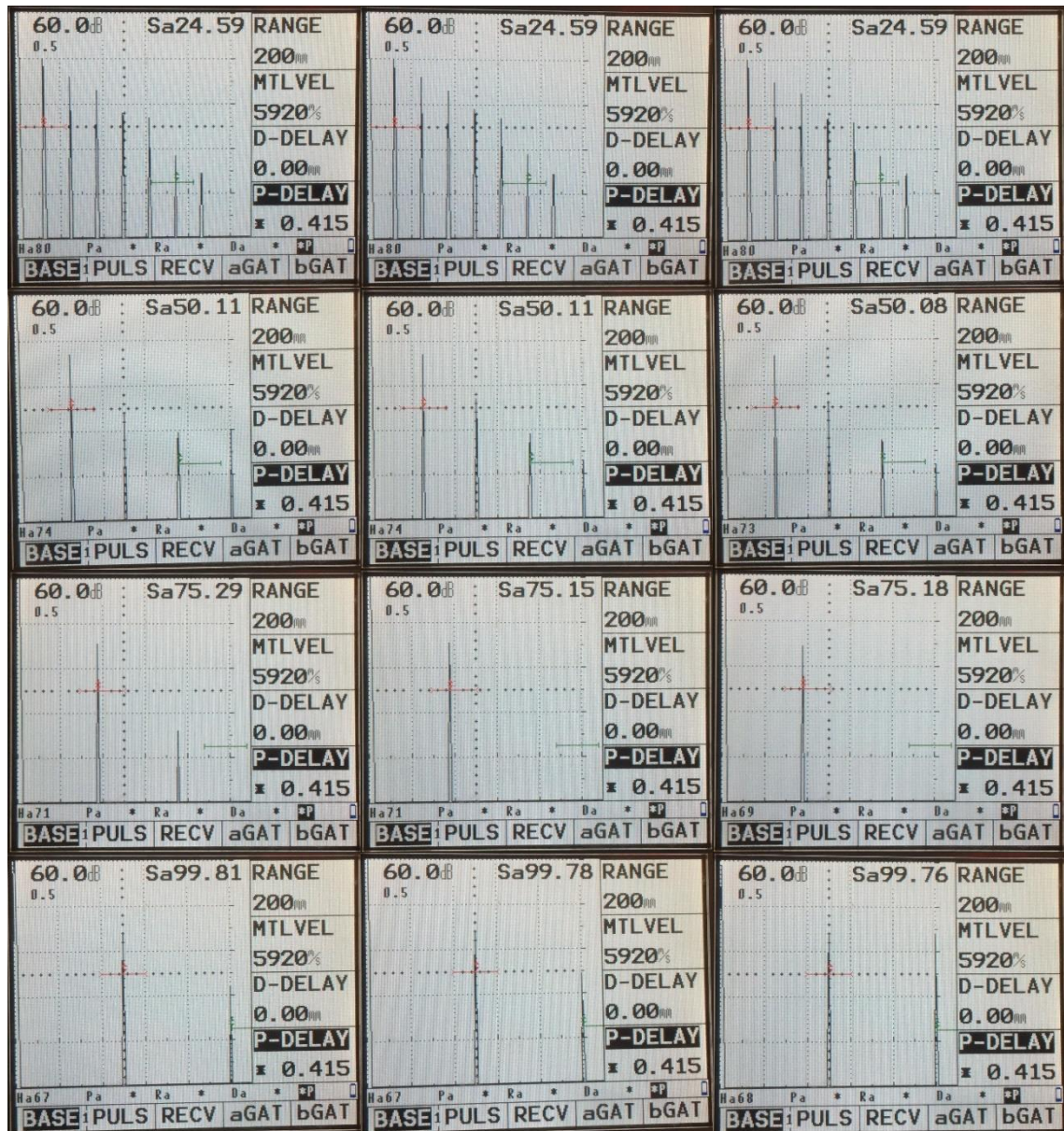
Gain = 60.0 dB Probe Delay = 0.482 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	50.01	69	74.38	63	100.1	54
ครั้งที่ 2	24.59	80	49.95	70	74.37	64	100.4	54
ครั้งที่ 3	24.59	80	50.12	70	74.44	62	100.4	55
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	50.03	69.67	74.4	63	100.3	54.33

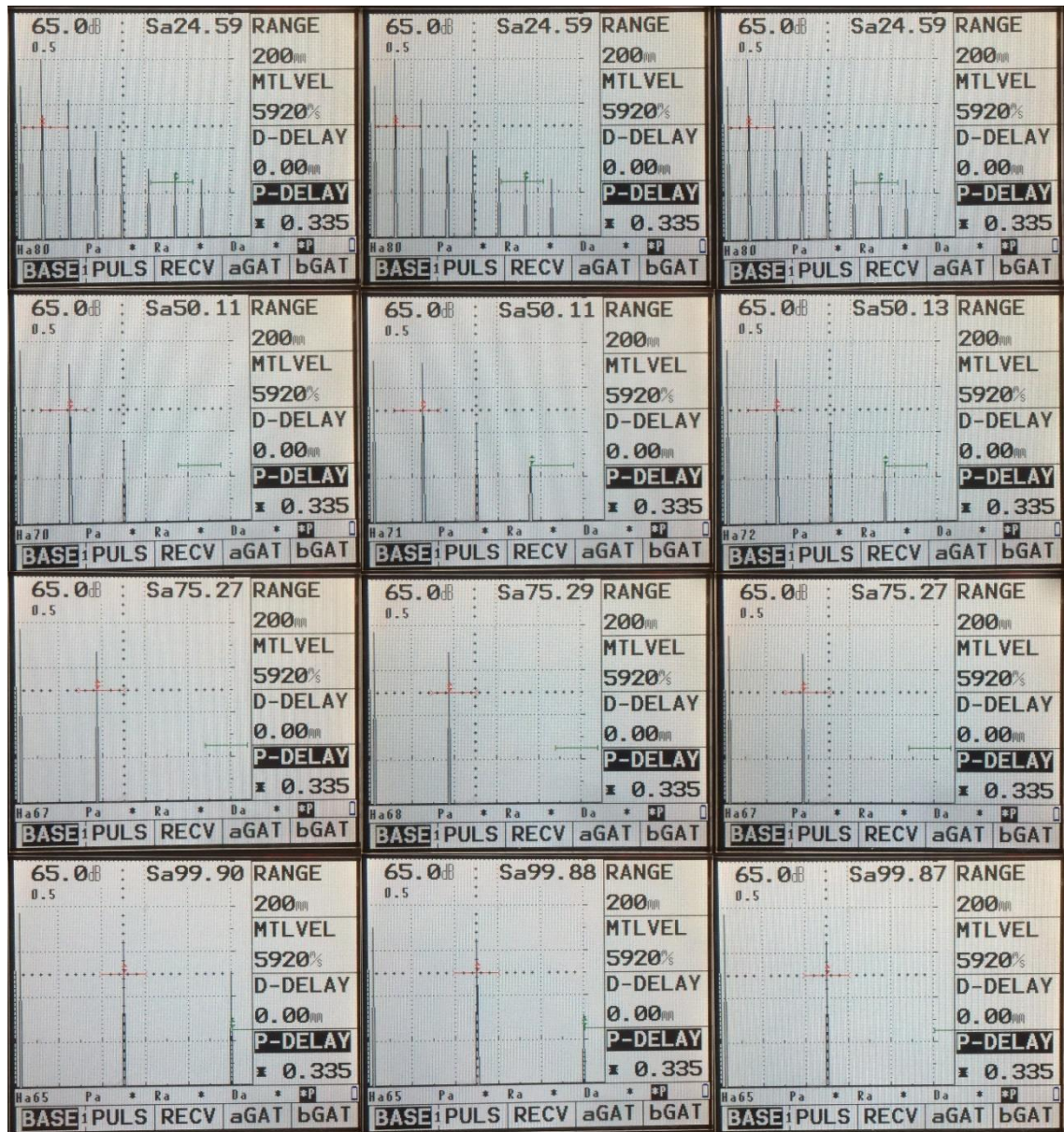
ก.17 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว ความถี่ 2 MHz



ก.18 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่าน
กระบวนการอบคืนตัว ความถี่ 5 MHz



ก.18 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่าน
กระบวนการอบคืนตัว ความถี่ 10 MHz



ก.19 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ S45C ที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว

ความถี่ 2 MHz

Gain = 33.0 dB Probe Delay = 0.840 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	50.01	77	74.91	75	100.3	70
ครั้งที่ 2	24.59	80	49.99	76	74.92	73	100.2	70
ครั้งที่ 3	24.59	80	50.04	76	74..94	74	100.2	68
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	50.01	76.33	74.92	74	100.23	69.33

ความถี่ 5 MHz

Gain = 60.0 dB Probe Delay = 0.415 μ s

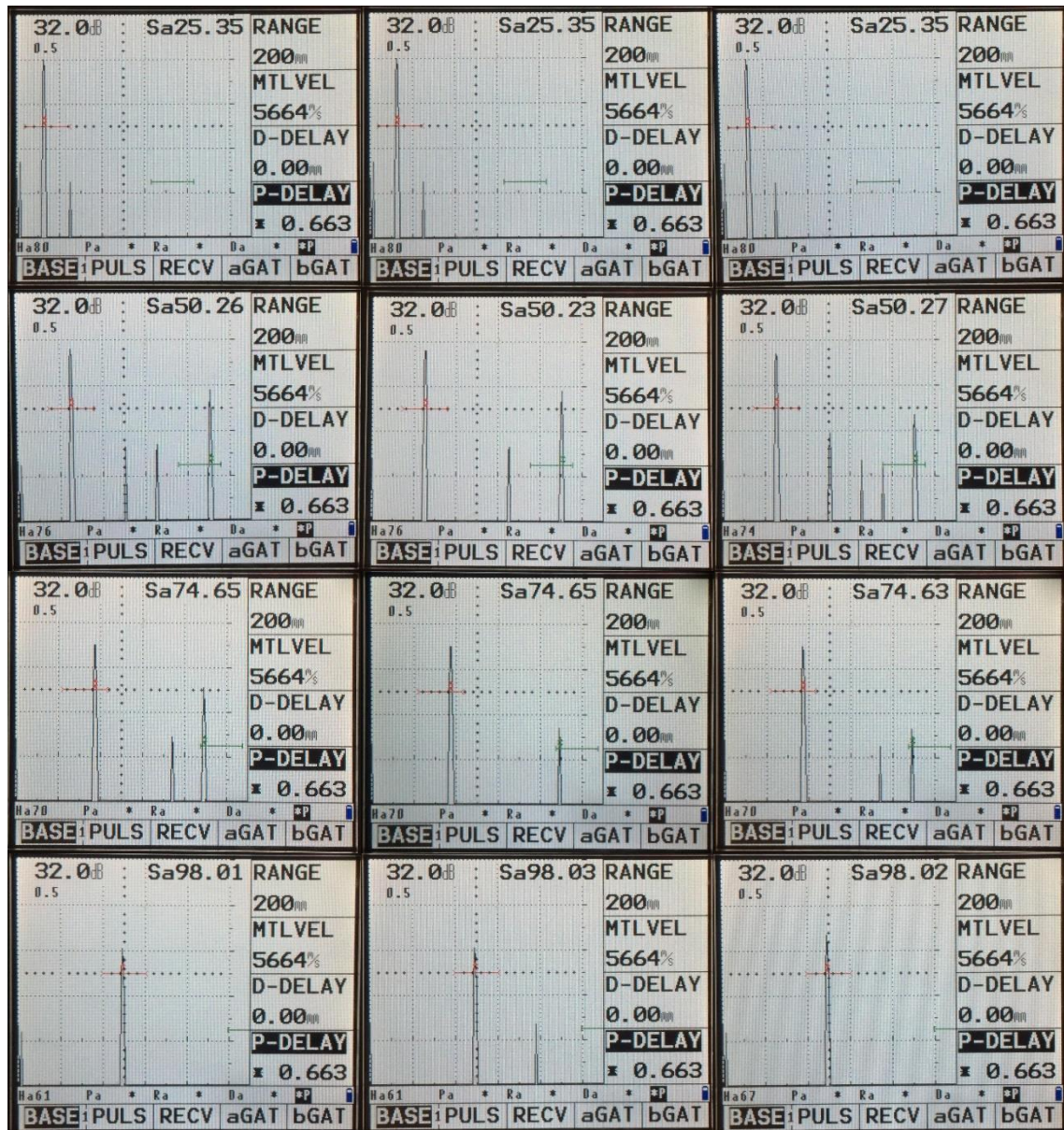
ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	50.11	74	75.29	71	99.81	67
ครั้งที่ 2	24.59	80	50.11	74	75.15	71	99.78	67
ครั้งที่ 3	24.59	80	50.08	73	75.18	69	99.76	68
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	50.1	73.67	75.21	70.33	99.78	67.33

ความถี่ 10 MHz

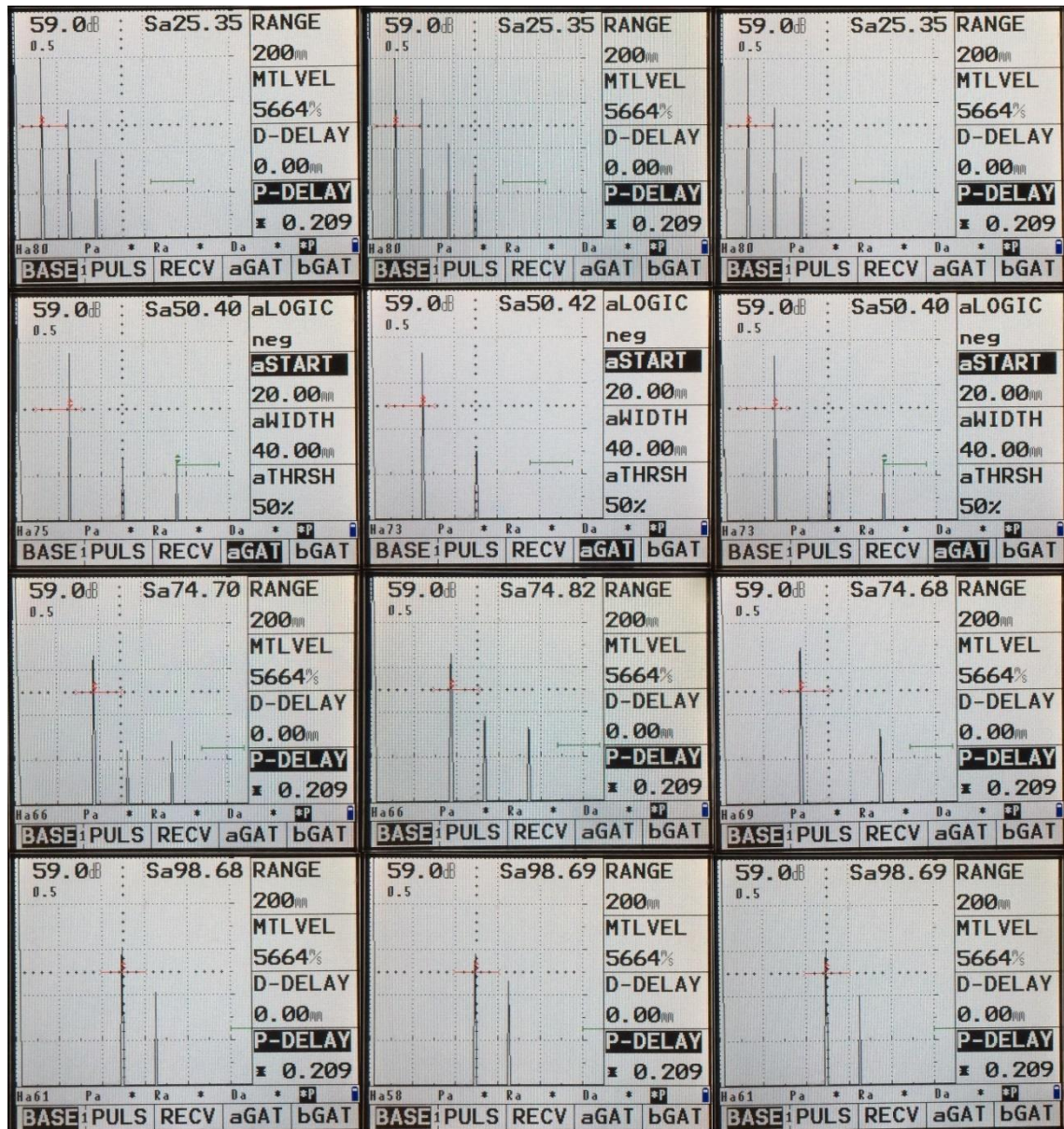
Gain = 65.0 dB Probe Delay = 0.335 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	24.59	80	50.11	70	75.25	67	99.9	65
ครั้งที่ 2	24.59	80	50.11	71	75.29	68	99.88	65
ครั้งที่ 3	24.59	80	50.13	72	75.27	67	99.87	65
ค่าเฉลี่ย	24.59	80	50.12	71	75.27	67.33	99.88	65

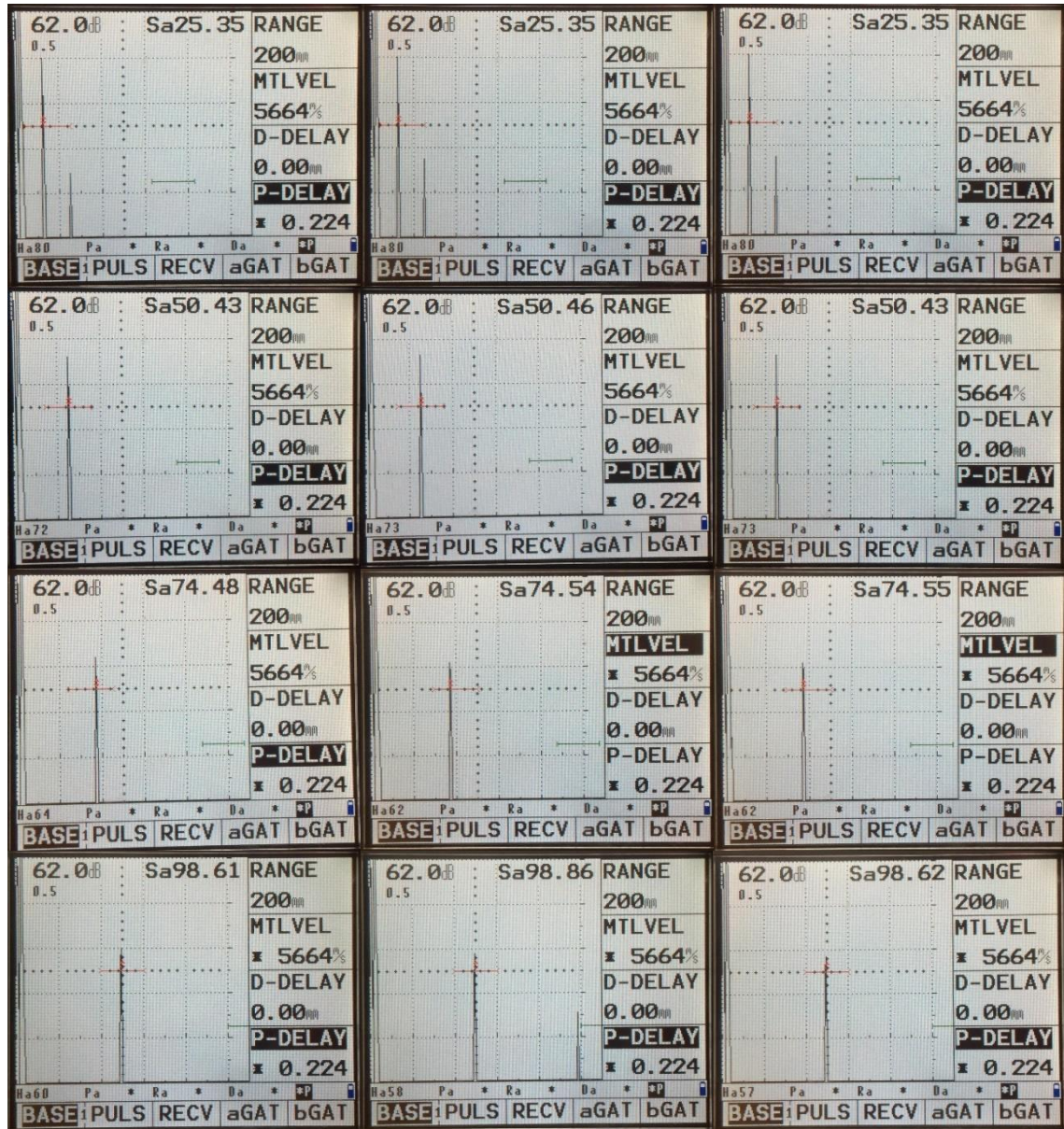
ก.20 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SUS304 ความถี่ 2 MHz



ก.21 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SUS304 ความถี่ 5 MHz



ก.22 กราฟหน้าจอเครื่องตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของวัสดุทดสอบ SUS304 ความถี่ 10 MHz



ก.23 ตารางบันทึกผลความถี่วัสดุทดสอบ SUS304

ความถี่ 2 MHz

Gain = 32.0 dB Probe Delay = 0.663 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	25.35	80	50.26	76	74.65	70	98.01	61
ครั้งที่ 2	25.35	80	50.23	76	74.65	70	98.03	61
ครั้งที่ 3	25.35	80	50.27	74	74.63	70	98.02	67
ค่าเฉลี่ย	25.35	80	50.25	75.33	74.64	70	98.02	63

ความถี่ 5 MHz

Gain = 59.0 dB Probe Delay = 0.209 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	25.35	80	50.4	75	74.7	66	98.68	61
ครั้งที่ 2	25.35	80	50.42	73	74.82	66	98.69	58
ครั้งที่ 3	25.35	80	50.4	73	74.68	69	98.69	61
ค่าเฉลี่ย	25.35	80	50.41	73.67	74.73	67	98.69	60

ความถี่ 10 MHz

Gain = 62.0 dB Probe Delay = 0.224 μ s

ความสูง	25 mm	%A	50 mm	%A	75 mm	%A	100 mm	%A
ครั้งที่ 1	25.35	80	50.43	72	74.48	64	98.61	60
ครั้งที่ 2	25.35	80	50.46	73	74.54	62	98.86	58
ครั้งที่ 3	25.35	80	50.43	73	74.55	62	98.62	57
ค่าเฉลี่ย	25.35	80	50.44	72.67	74.52	62.67	98.7	58.33