

การพัฒนาระบบตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อน

นายชนเส วิลาสมงคลชัย วศ.บ. (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2553

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... (ผศ.ดร.ภาณุทัต บุญประมุข)	ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... (รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน)	กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
..... (รศ.ดร.ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์)	กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
..... (ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)	กรรมการ
..... (ดร.ศรวัน วงษา)	กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อร้อน
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายธนศ วิชาสมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อาษา ประทีปเสนา รศ.ดร.ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

#### บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อร้อนในปัจจุบันจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือก่อนส่งถึงมือลูกค้า ซึ่งการทดสอบด้วยบุคลากรมักเกิดความล่าช้าขึ้น และอาจทำให้ส่งสินค้าไม่ตรงเวลานอกจากนี้ยังมีต้นทุนในการตรวจสอบที่สูง และยากต่อการเพิ่มกำลังการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาหัตถสอบต้นทุนต่ำที่มีย่านความถี่เหมาะสมกับการตรวจสอบแผ่นเหล็กหล่อร้อนขึ้นรวมทั้งพัฒนาชุดจับยึดหัตถสอบในระบบการทดสอบโดยบุคลากรให้สามารถทดสอบได้ครั้งละสองหัตถสอบ และสร้างเครื่องต้นแบบระบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อให้ทำการตรวจสอบได้อย่างสม่ำเสมอและผลการตรวจสอบแม่นยำมากขึ้น ผลการวิจัยพบว่าหัตถสอบที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการทดสอบสูงกว่าหัตถสอบเชิงพาณิชย์ที่ย่านความถี่เดียวกันและมีต้นทุนที่ต่ำกว่าประมาณสิบเท่า ชุดยึดจับหัตถสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาในการทดสอบโดยบุคลากรลงได้ครั้งหนึ่ง และต้นแบบระบบกึ่งอัตโนมัตินี้สามารถใช้งานได้จริงและพร้อมจะขยายอัตราส่วนเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบโดยติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของสายการผลิตได้

คำสำคัญ: การทดสอบโดยไม่ทำลาย/ เหล็กหล่อร้อน/ คลื่นเสียงความถี่สูง/ ระบบกึ่งอัตโนมัติ

Thesis Title	Development of Non-Destructive Examination System for Hot Roll Steel Product
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Thanet Vilasmongkolchai
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Asa Prateepasen Assoc. Prof. Dr. Pakorn Kaewtrakulpong
Program	Master of Engineering
Field of Study	Electrical Engineering
Department	Control System and Instrumentation Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

#### Abstract

In steel plate manufacturing, all products must be inspected before delivered due to market competition. The manual inspection by human operators is a time consuming process and cannot handle high-rate production. Moreover, the inspection device has such a high cost that make it difficult for investment decision making. This research focuses on the development of the inspection system using ultrasonic for steel plate manufacturing, which consists of a low cost ultrasonic probe with a natural frequency suitable for steel plate examination, the dual-probe jig for manual operation, and the prototype of semi-automatic inspection system for steady and more accurate result. Our higher sensitivity probe (when compared with commercial ones) is 10 times cheaper. The jig with a dual-probe support can reduce the inspection time by a half. The prototype can be realized and implemented for online inspection in the manufacturing process.

Keywords: Non-Destructive Testing/ Hot Roll Steel/ Ultrasonic/ Semi-Automatic System

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี โดยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม ประจำปี 2552 ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน และ รศ.ดร.ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนแนะนำแนวทางแก้ปัญหาในสิ่งต่างๆตลอดเวลาที่ทำการวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภาณุทัต บุญประมุข ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา และดร.ศราวัฒน์ วงษา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยชี้แนะถึงจุดบอดต่างๆในการวิจัย ขอขอบคุณบริษัทแอล พี เอ็น เพลทมิล และ คุณอดิศักดิ์ อ่วมเปี่ยม วิศวกรที่ได้เอื้อเฟื้อในการเก็บข้อมูล และประสานงานต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณ นายใหม่ น้อยพิทักษ์ นายวาทีต แก้วแว่น้อย นายเชิดพงษ์ จอมเดช และนายเฉลิม เกียรติ จิระรุ่งเสถียร ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และให้คำแนะนำในการวิจัย ตลอดจนขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัดทุกท่าน นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ สำหรับกำลังใจ การสนับสนุนทางการศึกษา และการเรียนรู้ต่างๆ

ประโยชน์อันใดที่ได้เกิดขึ้นกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอให้กุศลแผ่ให้ถ้วนทั่วแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องและช่วยเหลือทุกท่าน ตลอดทั้งที่เอ่ยนามและมีได้เอ่ยนาม จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
รายการสัญลักษณ์	ญ
ประมวลคำศัพท์และคำย่อ	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	3
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 การทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง	5
2.2 ระบบควบคุมในระบบขับเคลื่อนแนวระนาบ	9
2.3 หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.5 สรุป	19
<b>3. ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>20</b>
3.1 ภาพรวมการดำเนินการวิจัย	20
3.2 การพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง	21
3.3 ระบบการทดสอบโดยบุคลากร	25

3.4 ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกึ่งอัตโนมัติ	30
3.5 หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า	33
3.6 สรุป	34
<b>4. ผลการวิจัย</b>	<b>36</b>
4.1 ผลการพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง	36
4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเวลาของระบบทดสอบโดยบุคลากร	42
4.3 ผลการทดสอบระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกึ่งอัตโนมัติ	43
4.4 ผลการประเมินความเป็นไปได้ต่อของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า	44
4.5 สรุป	45
<b>5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>46</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>49</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>51</b>
ก ตารางผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	51
ข แบบชิ้นงานทดสอบตัวอย่างสำหรับเครื่องต้นแบบ	55
ค การเสนอผลงานวิจัยการประชุมทางวิชาการ	57
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>63</b>

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	จุดเด่นและจุดด้อยของการประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบเพื่อทดสอบครั้งละ 2 หัวทดสอบ	30
4.1	ผลการขึ้นรูปวัสดุรองหลัง โดยใช้ผงบรอนซ์ผสมอีพอกซี	37
4.2	ผลการขึ้นรูปวัสดุรองหลัง โดยใช้ผงทังสเตนผสมอีพอกซี	37
4.3	สรุปผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะของหัวทดสอบ	39
4.4	สรุปความสามารถในการวัดความหนาชิ้นงานจากการตอบสนองทางเวลา	42
ก.1	ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตวงสอบแนวยาว	52
ก.2	ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตวงสอบแนวขวาง	53
ก.3	ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตวงสอบแนวตาราง	54

## รายการรูปภาพ

รูป	หน้า	
2.1	สัญญาณจากการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูงที่รอยบกพร่องในชิ้นงาน	5
2.2	Ultrasonic Flaw Detector	6
2.3	หัวทดสอบ (Probe)	6
2.4	(ก) สัญญาณสะท้อนจากรูพรุน และ (ข) สัญญาณสะท้อนจากสแลกฝังใน	8
2.5	ลักษณะโครงสร้างมหภาคของเหล็กเกรด 15KhSND (การแยกชั้น)	8
2.6	ระบบควบคุมตำแหน่งประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งป้อนกลับ และอุปกรณ์ควบคุมความเร็วป้อนกลับ	10
2.7	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่ง P-PI	10
2.8	แผนผังการควบคุมที่เขียนขึ้นใหม่	11
2.9	ลักษณะโดยรวมของหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงชนิดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	13
2.10	ระยะต่างๆ ของลำคลื่น	13
2.11	ช่วงเขตอับ	14
2.12	การเปรียบเทียบระหว่างหัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริก และหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า	15
2.13	ลักษณะและการทำงานของหัวทดสอบแบบหลักการแรงลอเรนซ์	16
2.14	ลักษณะและการทำงานของหัวทดสอบแบบหลักการความเค้นทางแม่เหล็ก	17
3.1	ภาพรวมของการดำเนินการวิจัย	20
3.2	วิธีการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	22
3.3	วิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวในวัสดุรองหลัง	23
3.4	วิธีการทดสอบการตอบสนองเชิงความถี่ของหัวทดสอบ	24
3.5	ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบวัดความหนา	24
3.6	วิธีการทดสอบวัดความหนาชิ้นงาน	24
3.7	ภาพโดยรวมของระบบที่ออกแบบใหม่	25
3.8	การทดสอบโดยบุคลากร (ซ้าย) และระบบจับยึดหัวทดสอบแบบเดิม (ขวา)	25
3.9	การหักเหตามกฎของสเนลล์	26
3.10	การหักเหที่เกิดขึ้น และระยะที่จำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์จับยึด	26
3.11	ลักษณะและระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปของชิ้นส่วนจับยึด	27
3.12	ความเสียหายจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นส่วนจับยึด	28
3.13	ลักษณะและระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปของชิ้นส่วนจับยึดด้วยยึดหัวทดสอบ	28

3.14	ความเสียหายจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นส่วนจับยึดด้วยยึดหัวทดสอบ	28
3.15	ระบบจับยึดที่ออกแบบใหม่สำหรับการทดสอบแบบสองหัวทดสอบ	29
3.16	ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	30
3.17	ระบบควบคุมของชุดขับเคลื่อน	31
3.18	การตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณสแต็ป	32
3.19	ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างที่กัดผิวลงไปที่มีความลึกต่าง ๆ กัน	32
3.20	ลักษณะทางกายภาพของหัวทดสอบแบบหลักการแรงลอเรนซ์	33
3.21	รูปร่างของขดลวด และทิศทางการป้อนกระแส	33
3.22	ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กบนชิ้นงานทดสอบ	34
3.23	แรงที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและแม่เหล็กถาวร	34
4.1	การตอบสนองด้านความถี่และแอมพลิจูดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	36
4.2	การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบที่ 1	38
4.3	การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบที่ 2	39
4.4	การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ย่านความถี่ 2 MHz	39
4.5	ผลการตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบที่ 1 ในการวัดความหนาชิ้นงาน	40
4.6	การตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบที่ 2 ในการวัดความหนาชิ้นงาน	41
4.7	การตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ในการวัดความหนาชิ้นงาน	41
4.8	การเปรียบเทียบช่วงความถี่ เขตอับ และความไวของหัวทดสอบ	42
4.9	การเปรียบเทียบเวลาทดสอบระหว่างระบบทดสอบเดิม และระบบที่ปรับปรุงขึ้นใหม่	43
4.10	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจพบรอยตำหนิของแนวการตรวจสอบต่างๆ	43
4.11	ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง	44
4.12	แผนผังการจำลองระบบของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า	44
4.13	สัญญาณที่ได้จากการจำลองระบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า	45

## รายการสัญลักษณ์

$B$	=	ขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็ก
$b_a$	=	ค่าตัวคูณเทียบเคียงแบบโพโรโพซันนอลในรูปของความเร็ว
$D$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
$E$	=	ค่าโมดูลัสของวัสดุ
$F$	=	แรงลอเรนซ์
$f$	=	ความถี่ของคลื่นเสียง
$J$	=	ค่าความเฉื่อยเชิงมุมของโหลดของมอเตอร์
$K_a$	=	ค่าตัวคูณเทียบเคียงแบบโพโรโพซันนอลในรูปของตำแหน่ง
$K_{ia}$	=	ค่าตัวคูณเทียบเคียงแบบโพโรโพซันนอลในรูปของความเร็ว
$K_{iv}$	=	ค่าตัวคูณแบบอินทิกรัลในรูปของความเร็ว
$K_{pp}$	=	ค่าตัวคูณแบบโพโรโพซันนอลในรูปของตำแหน่ง
$K_{pv}$	=	ค่าตัวคูณแบบโพโรโพซันนอลในรูปของความเร็ว
$t$	=	ความหนาของผลึกเพียโซอิเล็กทริก
$v$	=	ความเร็วของคลื่นเสียง
$v_2$	=	ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่สอง
$v_1$	=	ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่หนึ่ง
$x$	=	ระยะเพื่อตามแนวรัศมีของอุปกรณ์จับยึดหัวทดสอบ
$Z$	=	ค่าความต้านทานทางเสียง
$\alpha_1$	=	มุมตกกระทบจากตัวกลางที่หนึ่ง
$\alpha_2$	=	มุมหักเหจากตัวกลางที่สอง
$\theta$	=	ค่าตำแหน่งเชิงมุมจริง
$\theta^*$	=	ค่าตำแหน่งเชิงมุมที่ต้องการ
$\mu$	=	อัตราส่วนปัวซอง
$\rho$	=	ค่าความหนาแน่น
$\tau_p$	=	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ในระบบควบคุมป้อนกลับ ที่เทียบเคียงขึ้น
$\tau_s$	=	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ในระบบควบคุมป้อนกลับ
$\omega$	=	ค่าความเร็วเชิงมุมจริง
$\omega^*$	=	ค่าความเร็วเชิงมุมที่ต้องการ

### ประมวลศัพท์และคำย่อ

EMAT =	วิธีการทดสอบโดยไม่ทำลายแบบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า
MFL =	การทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยการวัดสนามแม่เหล็กรั่วไหล
PZT =	วัสดุเพียโซอิเล็กทริก
P-PI =	ระบบควบคุมตำแหน่งแบบใช้ระบบควบคุมแบบโพรโพชันนอลและอินทิกรัลในรูปของความเร็ว และใช้ระบบควบคุมแบบโพรโพชันนอลในรูปของตำแหน่ง
UT =	การทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
VT =	การทดสอบด้วยตาเปล่า

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มนุษย์ได้นำเหล็กมาใช้ประโยชน์มากมาย เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆอันเหมาะสมต่อการใช้งานที่หลากหลาย และเป็นปัจจัยหลักในการผลักดันโลกอุตสาหกรรมให้ดำเนินต่อไป จากข้อมูลทางสถิติของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย[1] เมื่อเดือนธันวาคม 2552 ประเทศไทยมีการผลิตเหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆเป็นปริมาณ 299,000 ตัน ถึงแม้จะเป็นลดลงจากเดือนเดียวกันในปี 2551 เนื่องจากผลการชะลอตัวของเศรษฐกิจโลก แต่มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลของการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจ ซึ่งหากมองในเชิงของมูลค่า เหล็กที่ประเทศไทยส่งออกในเดือนธันวาคม 2552 สามารถคิดเป็นมูลค่าการส่งออกถึง 2,825 ล้านบาท โดยเหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญรูปแบบหนึ่งก็คือ เหล็กแผ่นรีดร้อน ซึ่งเป็นปริมาณบริโภคสูงสุด เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มผลผลิตและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกได้

ในการแข่งขันกับตลาดภายนอก จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานก่อนการส่งมอบเสมอ เพื่อที่จะสร้างความน่าเชื่อถือในผลิตภัณฑ์แก่ลูกค้า โดยกระบวนการทดสอบโดยไม่ทำลายที่นิยมใช้ในเหล็กแผ่นรีดร้อน ได้แก่ การทดสอบด้วยตาเปล่า และการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic) แต่การทดสอบด้วยตาเปล่าจะไม่สามารถทดสอบรอยตำหนิภายในเนื้อวัสดุได้ การทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจึงมีความได้เปรียบในการทดสอบที่สูงกว่า โดยมาตรฐานที่ทั่วโลกหรือกลุ่มอุตสาหกรรมในนานาประเทศยอมรับ ในกระบวนการรับรองคุณภาพเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงก็มีด้วยกันหลากหลายมาตรฐาน โดยที่นิยมจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A435 [2] ซึ่งหากพบขนาดของตำหนิที่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นเหล็ก ก็จะไม่ผ่านมาตรฐาน แต่ในการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยทั่วไปแล้ว จะใช้อุปกรณ์ทดสอบมีลักษณะเป็นรถเข็น ที่ติดตั้งชุดหัวทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไว้ด้านล่าง[3] และให้ผู้ทดสอบทำการเข็นอุปกรณ์ไปบนแผ่นเหล็ก ซึ่งการแสดงผลของการทดสอบจะอยู่ในรูปของ A-scan ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้ทักษะในการแยกแยะสัญญาณของผู้ทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบและแปลผลจึงต้องเป็นภาระรับผิดชอบของบุคลากรผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น เมื่อมีคำสั่งซื้อเข้ามาปริมาณมาก การทดสอบด้วยวิธีการปัจจุบันด้วยบุคลากรไม่สามารถทดสอบได้ทันกำหนด ทำให้เสียโอกาสทางด้านการค้า หรืออาจทำให้บุคลากรที่มีหน้าที่ทดสอบต้องทำงานหลายกะ ซึ่งความอ่อนล้าทำให้เสี่ยงต่อความสม่ำเสมอในคุณภาพการทดสอบหากมีบุคลากรไม่เพียงพอ

ในการพัฒนาระบบการทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในอุตสาหกรรมจะมุ่งเน้นในเรื่องของระยะเวลาในการทดสอบ และประสิทธิภาพในการทดสอบ ซึ่งก็จะมีทั้งการพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์ วิธีการทดสอบ และซอฟต์แวร์ในการประมวลผลการทดสอบ ในระยะแรกจะเน้นการพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์คือการปรับเปลี่ยนรูปแบบหัวทดสอบให้มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้น เช่น ใช้หัวเซนเซอร์แบบมีเลนส์ (ultrasonic lens), ใช้เซนเซอร์แบบหลายหัว (multi sensor), หัวเซนเซอร์แบบเฟสอะเรย์ (phase array) เป็นต้น รวมถึงระบบอัตโนมัติที่นำมาใช้ในการสแกนหารอยตำหนิในแนวระนาบ [4, 5]

ในการมุ่งเน้นพัฒนาด้านประสิทธิภาพแล้ว จำเป็นที่จะต้องใช้การประมวลผลสัญญาณร่วมด้วย ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยระบบอัตโนมัติเพื่อให้มีความเร็วในการสแกนที่คงที่และเก็บค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งการประมวลผลสัญญาณก็สามารถทำได้หลากหลาย เช่น นอกเหนือจากการตรวจวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณแล้ว ยังอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเฟสเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เปลี่ยนไปเข้ามารวมประมวลผลด้วย [6] หรือการประมวลผลสัญญาณเพื่อสร้างภาพจำลองการวางตัวของตำหนิให้มีขนาดและตำแหน่งแม่นยำขึ้น [7]

ในการทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบ straight beam pulse-echo นั้นมักจะพบปัญหาในการตรวจรอยตำหนิขนาดเล็กที่อยู่ใกล้กับผิวล่างของชิ้นงาน การแปลผลว่ามีตำหนิหรือไม่ นั้นทำได้ลำบากเนื่องจากไม่สามารถแยกแยะสัญญาณสะท้อนจากผิวล่างมีขนาดที่สูงกว่าตำหนิมากได้ และไม่สามารถแยกแยะสัญญาณทั้งสองที่อยู่ใกล้ชิดกันได้ ซึ่งการประมวลผลสัญญาณสามารถใช้วิธีต่างๆ เพื่อช่วยให้การแยกแยะสัญญาณง่ายขึ้น เช่น การประมวลผลแบบ 1 บิต เพื่อให้ขนาดของสัญญาณสะท้อนจากผิวล่างมีขนาดเดียวกันกับขนาดของตำหนิ [8] เพื่อให้มีการแยกแยะได้สะดวกขึ้น แต่วิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อสัญญาณสะท้อนจากรอยตำหนิมีขนาดที่สูงกว่าระดับสัญญาณรบกวน ดังนั้นในการแสดงผลจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถปรับเปลี่ยนระดับของ threshold ได้เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ปนเข้ามา

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีปัจจุบัน ได้เปลี่ยนแปลงการทดสอบแบบเดิมที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (PZT) ไปเป็น หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า (ElectroMagnetic Acoustical Transducers) หรือ EMAT [9] วิธีนี้จะมีข้อได้เปรียบวิธีการทดสอบโดยทั่วไปด้วยการสร้างคลื่นความถี่สูงด้วยผลึกเพียโซอิเล็กทริก คือสามารถทำการทดสอบได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบ หรือไม่ต้องอาศัยสารช่วยสัมผัส (couplant) และสามารถทำงานในที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ได้ อีกทั้งหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถสร้างคลื่นในรูปแบบการส่งผ่านต่างๆได้ตามต้องการ รวมถึงทำการทดสอบได้บนพื้นผิวที่ขรุขระ แต่การทดสอบด้วย หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า มีข้อจำกัดอยู่ในกลุ่ม

ชิ้นงานทดสอบประเภทเฟอร์โรแมกเนติกเท่านั้น และให้สัญญาณที่อ่อนต้องทำการสแกนอย่างละเอียดเพื่อให้สามารถตรวจพบรอยตำหนิได้ทั้งหมด อีกทั้งยังมีต้นทุนที่สูง จึงเป็นปัจจัยหลักที่ต้องอาศัยระยะเวลาในการตัดสินใจของบริษัท

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงให้มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ รวมทั้งต้นแบบระบบกึ่งอัตโนมัติซึ่งมีซอฟต์แวร์ช่วยในการแสดงผล เพื่อให้งานทดสอบเป็นไปได้อย่างขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะสูงในการทดสอบ และสามารถช่วยลดภาระของบุคลากรผู้ทำการทดสอบและแปลผลได้ อีกทั้งจะทำให้การทดสอบมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การทดสอบมีความคุ้มค่าทางการลงทุน และคุณภาพในการทดสอบจะมีความสม่ำเสมอเนื่องจากลดความเมื่อยล้าของผู้ทดสอบ ทำให้การทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กกรีดมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และยังเพิ่มความน่าเชื่อถือในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า และประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนา เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้อุตสาหกรรมต่อไปโดยติดตั้งในสายการผลิตได้โดยไม่ต้องมีส่วนเคลื่อนที่อื่นอีก

## 1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาระบบการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ที่สะดวกต่อการใช้งานและง่ายต่อการแปลผล ตามมาตรฐาน ASTM A435 ทั้งนี้จะลดระยะเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบคุณภาพเหล็กแผ่นรีดร้อน ตลอดจนสร้างต้นแบบระบบทดสอบโดยไม่ทำลายแบบกึ่งอัตโนมัติ และศึกษาความเป็นไปได้ของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า (ElectroMagnetic Acoustical Transducers) เพื่อจะนำไปใช้แทนการทดสอบแบบเดิม

## 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ออกแบบและสร้างหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงที่เหมาะสมกับการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กกรีดร้อนในต้นทุนต่ำ, พัฒนาระบบทดสอบโดยบุคลากรให้สามารถทำการทดสอบได้พร้อมกันสองหัวทดสอบ, สร้างต้นแบบระบบการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยมีการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ในรูปแบบที่ง่ายต่อการแปลผล และเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A435 ทั้งนี้ทดสอบกับชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร ขนาด 300x200 มิลลิเมตร และศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า

## 1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อกำหนดเบื้องต้น เช่น ข้อกำหนดของมาตรฐาน (ASTM A435), ขนาดของผลิตภัณฑ์ และรูปแบบการทดสอบในการปฏิบัติงาน
2. ออกแบบและสร้างหัวทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงให้เหมาะกับลักษณะงานทดสอบ
3. ปรับปรุงระบบการทดสอบแบบเดิม โดยการออกแบบส่วนทดสอบใหม่ให้สามารถทดสอบโดยบุคลากรได้เร็วขึ้น
4. ทำการทดสอบระบบที่ออกแบบใหม่โดยบุคลากร กับชิ้นงานจริง และบันทึกผล
5. ออกแบบและสร้างระบบการทดสอบแบบกึ่งอัตโนมัติ ในระบบทางกล และส่วนควบคุม
6. ทำการทดสอบกับชิ้นงานทดสอบ ที่มีระดับของความไม่ต่อเนื่องต่างกัน ไป
7. ทำศึกษาและออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดร้อน
8. สรุปผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบเดิมให้ลดเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ได้หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงในย่านความถี่ที่เหมาะสมกับการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนในต้นทุนที่ต่ำ
2. ได้เครื่องมือในการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่สามารถทดสอบได้เร็วขึ้นเมื่อทำการทดสอบด้วยบุคลากร
3. ได้ต้นแบบระบบการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อนโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่สะดวกต่อการใช้งานและง่ายต่อการแปลผล ตามมาตรฐาน ASTM A435
4. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า (ElectroMagnetic Acoustical Transducers) เพื่อจะนำไปใช้แทนการทดสอบแบบเดิม

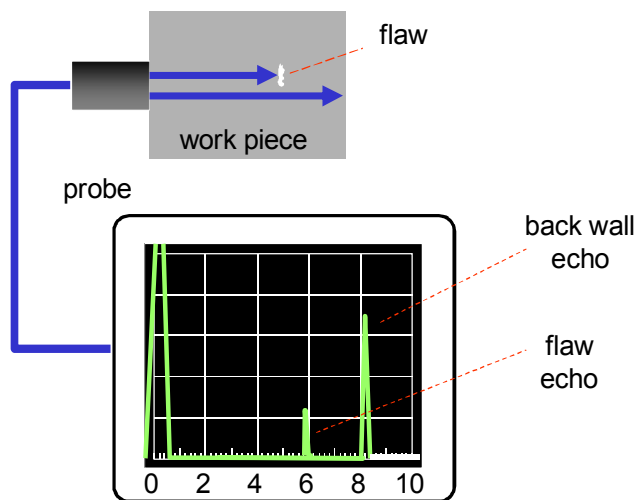
## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทางผู้จัดทำได้แบ่งทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องในการทำการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ทำการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย

1. การทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กที่ร้อนด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง
2. ระบบควบคุมในระบบขับเคลื่อนแนวระนาบ
3. หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

### 2.1 การทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กที่ร้อนด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง[10]

คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic) ในความหมายโดยทั่วไปจะหมายถึง “คลื่นเสียงความถี่สูงที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน” ซึ่งคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินหรือรับรู้ได้นั้นจะมีความถี่อยู่ระหว่าง 20 – 20,000 เฮิรตซ์ การตรวจสอบวิธีนี้ใช้หลักการนำคลื่นเสียงความถี่สูงไปสะท้อนกับรอยตำหนิ (Flaw) ในวัสดุ วิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจะประกอบไปด้วย หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งเป็นหัวทดสอบทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นทางกล หรือเปลี่ยนสัญญาณทางกลไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยจะทำหน้าที่ทั้งส่งคลื่นเสียงลงไปในวัสดุ และรับคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับเมื่อกระทบกับรอยบกพร่องที่มีอยู่ในวัสดุ โดยจะส่งผ่านสัญญาณคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับไปยังเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการวิเคราะห์เสียงที่ตรวจจับได้เพื่อแสดงตำแหน่งของรอยบกพร่องได้ โดยอาศัยหลักการของเวลาที่คลื่นเสียงใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด เพื่อคำนวณหาตำแหน่งรอยบกพร่องดังกล่าว ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญญาณจากการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูงที่รอยบกพร่องในชิ้นงาน

### 2.1.1 วิธีการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กที่ร้อนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

ในวิธีการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กที่ร้อนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งเป็นวิธีการในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อให้มั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์นั้นๆจะต้องปราศจากความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ เช่น การแยกชั้น (Lamination) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะกำหนดดังต่อไปนี้

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องรับสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Flaw Detector) ทำหน้าที่เป็นเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการวิเคราะห์เสียงที่ตรวจจับได้เพื่อแสดงตำแหน่งของรอยบกพร่อง



รูปที่ 2.2 Ultrasonic Flaw Detector

2. หัวทดสอบ (Probe) เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นเสียง และส่งคลื่นเสียงเข้าไปในวัตถุที่จะทดสอบ เมื่อเสียงสะท้อนกลับเข้ามาหัวทดสอบ หัวทดสอบจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณเสียงกลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อแสดงผลต่อไป



รูปที่ 2.3 หัวทดสอบ (Probe)

3. สารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียง (Couplant) ทำหน้าที่ช่วยส่งผ่านคลื่นเสียงลงไปวัสดุที่จะทำการทดสอบ

### 2.1.2 วิธีการตีเส้นตรวจสอบ (Grid Line)

การตีเส้นตรวจสอบตาม ASTM A435 นี้เป็นการตีเพื่อเป็นเส้นอ้างอิงตาม ASTM (American Society for Testing and Materials) ในการตรวจสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

1. การตรวจสอบตามแนวยาวหรือแนวนานกับทิศทางการรีด (Longitudinal)
2. การตรวจสอบตามแนวขวางหรือแนวตั้งฉากกับทิศทางการรีด (Transverse)
3. การตรวจสอบแบบตาราง (Square)

โดยทั้ง 3 วิธีก็จะมีรูปแบบลักษณะการตีเส้นตรวจสอบต่างกันดังต่อไปนี้

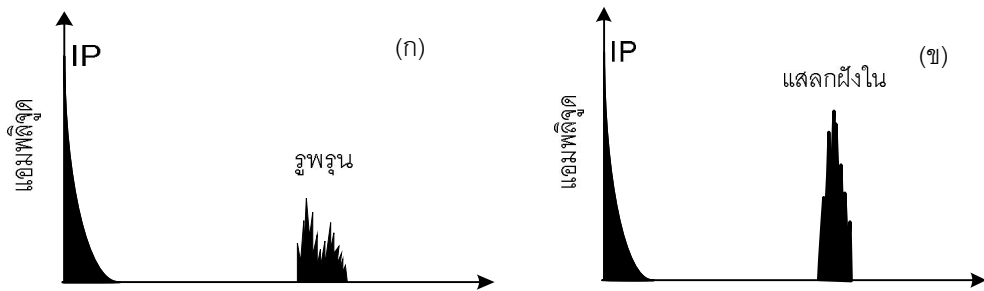
- ในการตี grid line นั้นเส้นแรกทั้ง 3 วิธีจะต้องทำการวัดให้ห่างจากขอบของผลิตภัณฑ์ 2 นิ้ว (50 มม.)
- การตรวจสอบตามยาว (Longitudinal) ตีเส้นเป็นช่องห่างกัน ช่องละ 3 นิ้ว (75 มม.)
- การตรวจสอบตามแนวขวาง (Transverse) ตีเส้นเป็นช่องห่างกัน ช่องละ 4 นิ้ว (100 มม.)
- การตรวจสอบแบบตาราง (Square) ตีเส้นเป็นแบบตารางซึ่งแต่ละตารางจะมีขนาด 9x9 นิ้ว (225 x 225 มม.)

### 2.1.3 การแยกแยะชนิดของรอยความไม่ต่อเนื่อง

การแยกแยะชนิดของรอยความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity classification) ต้องใช้ผู้ทดสอบที่มีประสบการณ์ หลักการที่ควรคำนึงในการแยกแยะมีดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งที่พบ เช่น ที่ขอบของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น
2. ลักษณะของสัญญาณสะท้อนที่เปลี่ยนไปเมื่อเคลื่อนที่และสแกนหัวทดสอบ
3. รูปร่างของสัญญาณสะท้อน ว่ามีขนาดของแอมพลิจูดมีลักษณะอย่างไร

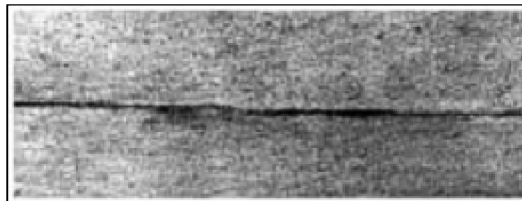
รูพรุน (Porosity) รูพรุนจะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนขนาดเล็กจำนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนและการกระจายของรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยปกติแล้วสัญญาณสะท้อนที่ได้จากรูพรุนสามารถแยกแยะออกจากชนิดสแลกฝังในได้ (Slag inclusion) ทั้งนี้เพราะว่าสัญญาณจากรูพรุนจะมีความสูงที่น้อยกว่ามาก ซึ่งสแลกฝังในจะมีสัญญาณสะท้อนที่ค่อนข้างสูงและมีลักษณะคล้ายต้นสน (Pine – shape)



รูปที่ 2.4 (ก) สัญญาณสะท้อนจากรูพรุน และ (ข) สัญญาณสะท้อนจากสแลกฝังใน

สแลกฝังใน (Slag inclusion) สัญญาณสะท้อนที่ได้จากรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดนี้ อาจจะมีขนาดสูงใกล้เคียงกับรอยร้าว แต่รูปร่างของสัญญาณค่อนข้างจะแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะผิวที่ขรุขระของมัน จึงทำให้เกิดจุดสะท้อนกลับเล็กๆ ที่ระยะห่างต่างๆ กัน ดังนั้นจึงให้สัญญาณมีลักษณะเหมือนต้นสน (Pine tree) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) คือมีเส้นรอบรูปของสัญญาณที่หยักจากฐานถึงยอดของสัญญาณสะท้อน ในขณะที่รอยร้าวจะมีเส้นรอบรูปที่เรียบ และมียอดที่แหลมกว่า

การแยกชั้น (Lamination) สัญญาณสะท้อนที่ได้จากรอยความไม่ต่อเนื่องชนิดนี้ คลื่นเสียงที่ส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุชิ้นงาน เมื่อพบการแยกชั้นของตัววัสดุเองสัญญาณจะสะท้อนรอยความไม่ต่อเนื่องให้ปรากฏเห็นเป็นความหนาที่น้อยกว่าความหนาจริง กล่าวคือ เกิดสัญญาณที่สะท้อนกลับหมดจากรอยแยกชั้นซึ่งเปรียบเสมือนสัญญาณสะท้อนจากผิวหลัง (back wall echo) ใหม่ที่ความหนาน้อยกว่าความหนาจริง ในรูปที่ 2.5 ได้แสดงถึงการแยกชั้นของเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนขึ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของเหล็กเกรด 15KhSND (การแยกชั้น) [11]

### 2.1.4 การหาขนาดรอยบกพร่อง

โดยปกติหลังจากทดสอบพบรอยบ่งชี้ (Indication) ผู้ทดสอบจะต้องหาขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่อง นั้น เพื่อนำไปประเมินผลต่อไป 6 dB drop เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันบ่อยมากที่สุด อาศัยหลักการ ครึ่งหนึ่งของลำคลื่นอยู่บนรอยความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) และอีกครึ่งหนึ่งอยู่นอก หรือ เป็นไปตามสมการ

$$dB = 20 \log \frac{V}{V_{ref}} \quad (2.1)$$

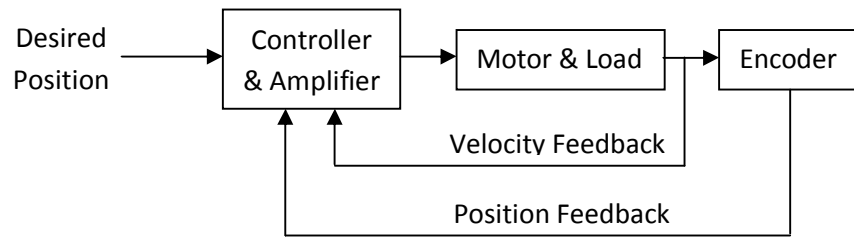
โดย 6 dB drop นี้จะถือว่า หากสัญญาณสะท้อนสูงสุดที่ได้จากตำหนิตกลงไปครึ่งหนึ่งเมื่อไรจะถือจุด นั้นเป็นขอบของรอยความไม่ต่อเนื่องนั้น

### 2.1.5 มาตรฐานที่ใช้และเกณฑ์การยอมรับ

การตรวจสอบผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กที่ร้อนก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะส่งไปผู้ยังลูกค้า จะมีข้อกำหนดให้มีการ ทดสอบด้วยตาเปล่า (VT) เพื่อหารอยแตก (crack) ทั้งสองหน้า และยังต้องทำการตรวจสอบงานด้วย คลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีรอยความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยการตรวจสอบ ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงนี้จะอิงตามมาตรฐาน ASTM A435 ซึ่งเป็นมาตรฐานหนึ่งที่ยอมรับในสากล จะแบ่งเกณฑ์การยอมรับหลังจากการสแกนตามแนว grid line ตามที่มาตรฐานกำหนดแล้ว หากตรวจ พบรอยความไม่ต่อเนื่องต้องทำการสแกนอย่างละเอียดเพื่อหาขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่อง และถ้า รอยความไม่ต่อเนื่องนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว (75 มม.) หรือครึ่งหนึ่งของ ความหนาผลิตภัณฑ์ก็จะไม่ยอมรับ

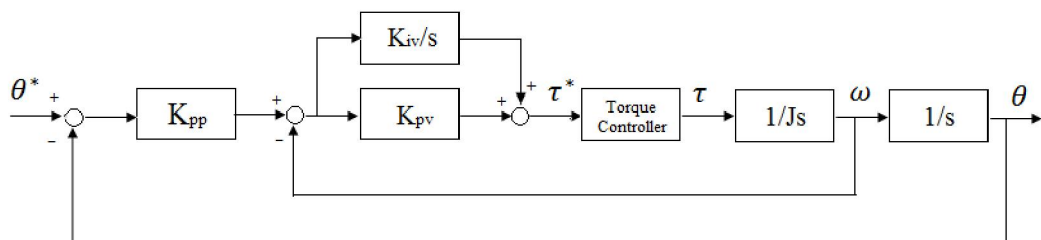
## 2.2 ระบบควบคุมในระบบขับเคลื่อนแนวระนาบ

ระบบขับเคลื่อนที่เลือกนำมาใช้นี้มีลักษณะเป็น 2 แกนเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และขนานกับผิว โลก (X-Y table) ระบบดังกล่าวจะมีการทำงานที่เป็นอิสระต่อกันในทั้ง 2 แกน แต่ละแกนจะมีระบบ ควบคุมที่เขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมทั้งความเร็วและตำแหน่ง เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องและแม่นยำ เพื่อจะนำข้อมูลทางตำแหน่งไปใช้ระบุตำแหน่งของตำหนิต ที่ตรวจพบในชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมตำแหน่ง ประกอบด้วยลูการควบคุมตำแหน่งป้อนกลับ และ ลูการควบคุมความเร็วป้อนกลับ

การควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ และมีความนิ่งในการเข้าสู่ตำแหน่ง ซึ่งการควบคุมการเข้าสู่ตำแหน่งนั้นทำได้โดยการทำการป้อนกลับค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่มาเทียบกับค่า input ซึ่งทางอุดมคติ เมื่อค่าป้อนกลับมีค่าเท่ากับค่า input แล้ว การหมุนของมอเตอร์จะหยุด และค่า error ในการหมุนจะมีค่าเท่ากับ 0 แต่ในการควบคุมจริงนั้นไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากในการหมุน และการหยุดของมอเตอร์นั้นจะมีค่าความเฉื่อยในการหมุนอยู่ด้วยการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งในความเป็นจริงนั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นในการควบคุมเพื่อให้มีการเข้าสู่ตำแหน่งที่แม่นยำในการดำเนินการจริงจะต้องทำการป้อนกลับความเร็วด้วยเพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของแต่ละช่วงของระยะทาง ซึ่งจะมีการพิจารณาตามระยะทางโดยหากระยะทางในการเข้าถึงมีค่ามากก็จะใช้ความเร็วสูง และลดลงเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น ซึ่งระบบควบคุมแบบ P-PI สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.7

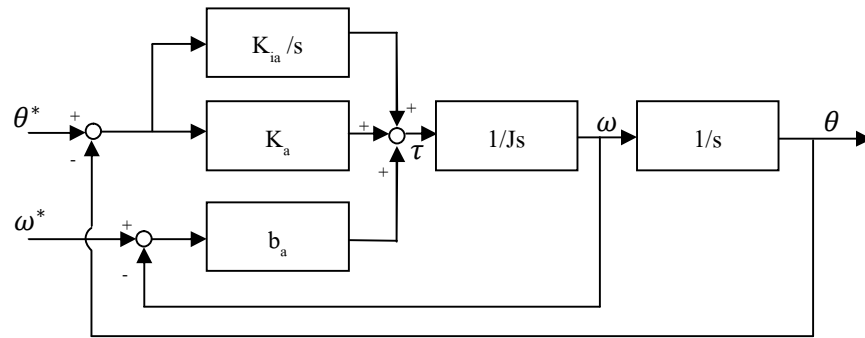


รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่ง P-PI

ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \tau_s &= \left( K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \left( (\omega^* - \omega) + K_{pp}(\theta^* - \theta) \right) \\ &= K_{pv}(\omega^* - \omega) + [K_{iv} + K_{pv}K_{pp}](\theta^* - \theta) + \frac{K_{iv}K_{pp}}{s}(\theta^* - \theta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

เพื่อให้แยกการปรับพารามิเตอร์ได้ง่ายขึ้น สามารถเขียนแผนผังระบบควบคุมแบบเดิมได้ใหม่เป็นรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังการควบคุมที่เขียนขึ้นใหม่

ซึ่งมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) เป็น

$$\frac{\theta}{\theta^*} = \frac{b_a s^2 + K_a s + K_{ia}}{J s^3 + b_a s^2 + K_a s + K_{ia}} \quad (2.3)$$

ทำการเทียบเคียงค่าพารามิเตอร์จากแผนผังใหม่จะได้

$$\begin{aligned} \tau_p &= \left( K_a + \frac{K_{ia}}{s} + b_a s \right) (\theta^* - \theta) \\ &= b_a (\omega^* - \omega) + K_a (\theta^* - \theta) + \frac{K_{ia}}{s} (\theta^* - \theta) \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์แล้วจะได้

$$b_a = K_{pv} \quad (2.5)$$

$$K_a = K_{iv} + K_{pv} K_{pp} \quad (2.6)$$

$$K_{ia} = K_{iv} K_{pp} \quad (2.7)$$

### 2.3 หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงในปัจจุบัน มีการพัฒนาไปอย่างมากเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น รวมทั้งมีการพัฒนารูปแบบของหัวทดสอบโดยการประยุกต์ใช้หลักการทางฟิสิกส์อย่างแรงทางแม่เหล็ก (Lorentz Force) มาใช้สร้างคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อใช้ในการทดสอบ หรือที่เรียกว่าหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า (EMAT) โดยสามารถแยกแยะจุดเด่นและจุดด้อยของหัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริก (PZT) กับหัวทดสอบแบบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

1. หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถตรวจสอบชิ้นงาน โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารช่วยสัมผัสแต่หัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริกจำเป็นต้องใช้สารช่วยสัมผัสในการตรวจสอบ ในหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องใช้สารช่วยสัมผัสทำให้สามารถตรวจสอบชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงหรือใช้การตรวจสอบแบบอัตโนมัติได้
2. หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถตรวจสอบในสถานะที่ไม่สามารถสัมผัสกับพื้นผิว หรือพื้นผิวมีสภาพขรุขระได้ แต่ในหัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริกจะไม่สามารถทำการตรวจสอบได้ เมื่อไม่สามารถสัมผัสกับพื้นผิว หรือพื้นผิวที่สภาพขรุขระ
3. หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าหัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริก เพราะมีการสูญเสียกระแสนะในขดลวด
4. ตัวกำเนิดของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดใหญ่
5. หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถตรวจสอบได้กับวัสดุที่เป็นสื่อทางไฟฟ้าเท่านั้นแต่หัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริกสามารถตรวจสอบวัสดุได้เกือบทุกประเภท

จากคุณสมบัติเด่นที่กล่าวมาของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณลักษณะที่เหมาะสมอย่างมากที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดร้อน เนื่องจากสามารถทำการทดสอบได้ในที่อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานการทดสอบด้วยหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้ายังไม่ได้ยอมรับแพร่หลายในผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน และมีต้นทุนดำเนินการที่สูงกว่ามาก ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการตัดสินใจนาน

### 2.3.1 หัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริก (PZT)

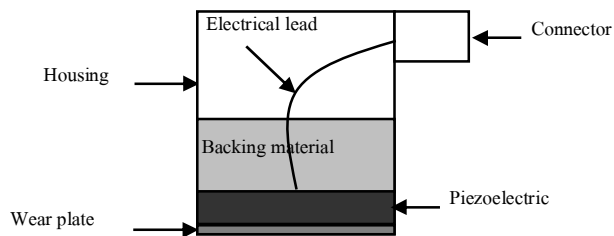
หัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ตัวเรือนภายนอก (Case) เพื่อให้หัวทดสอบรักษารูปร่างอยู่ได้ และคงทนต่อการใช้งาน
2. แผ่นกันสึก (Wear plate) เป็นแผ่นที่ใช้ป้องกันมิให้ผลึกที่มักทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขัดสีกับผิวชิ้นงานโดยตรง
3. ผลึกเพียโซอิเล็กทริก (PZT) เป็นส่วนสำคัญที่สุดของหัวทดสอบ เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล และเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงาน ไฟฟ้า ขนาดของควมถี่ธรรมชาติของผลึกเป็นตัวกำหนดความไวในการทดสอบ
4. วัสดุรองหลัง (Backing material) เป็นตัวที่ทำหน้าที่ป้องกันเสียงสะท้อนภายในผลึก และเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการสั่นสะท้อนของผลึก ถ้าใช้วัสดุรองหลังที่มีการหน่วงสูง (Damp) จะทำให้ระยะเวลาในการสั่นสะท้อนของผลึกสั้นลง ทำให้หัวทดสอบมีความสามารถในการ

แยกแยะที่สูงขึ้น แต่ความสามารถในการทดสอบต่ำลง และจะให้ผลในทางที่กลับกันถ้าเลือกวัสดุที่มีความหน่วงต่ำ

5. อีพอกซี (Epoxy) ใช้เติมลงไปในช่วงว่างของหัวทดสอบ เพื่อให้ชิ้นส่วนต่างๆ อยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดระยะเวลาการใช้งาน

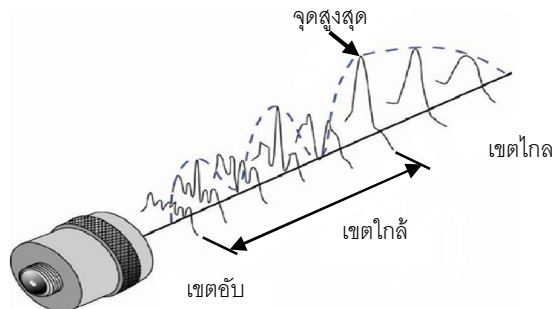
ทั้งนี้หัวทดสอบจะมีลักษณะโดยรวมดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะต่อขั้วไฟฟ้าออกจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับขั้วต่อชนิด BNC เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.9 ลักษณะโดยรวมของหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงชนิดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

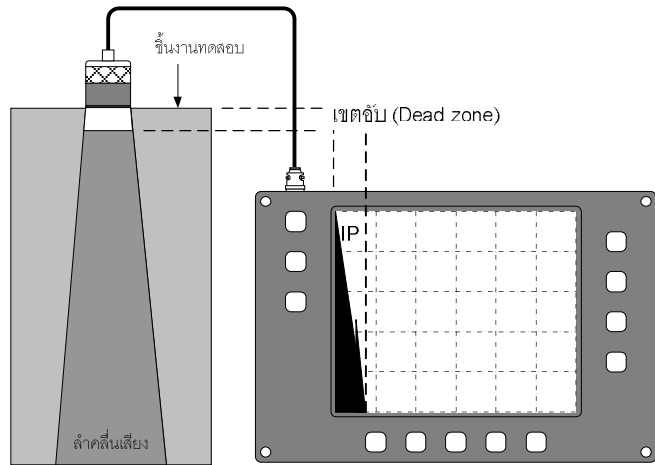
### 2.3.1.1 ลักษณะทางกายภาพของลำคลื่น (Beam Physics)

การใช้เทคนิคพัลส์-เอคโค (Pulse-echo) ในการทดสอบจะให้ลำคลื่นต่อเนื่องประกอบด้วยเขตอับ (Dead zone) เขตใกล้ (Near zone) และเขตไกล (Far zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระยะเวลาต่างๆ ของลำคลื่น

เขตอับ (Dead zone) คือระยะระหว่างผิวหน้าของหัวทดสอบไปยังได้ผิวชิ้นงาน ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความยาวของสัญญาณพัลส์ (Pulse length) ที่ปล่อยโดยหัวทดสอบ รอยความไม่ต่อเนื่องที่มีตำแหน่งอยู่ภายในเขตอับ จะไม่สามารถทดสอบพบได้ เนื่องจากจะถูกซ่อนอยู่ภายใน สัญญาณสะท้อนแรก (Main bang) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ช่วงเขตอับ

เขตใกล้ (Near zone) คือ โซนที่ความดันของเสียงไม่สม่ำเสมอ ถ้ารอยความไม่ต่อเนื่องอยู่ในเขตใกล้ ผู้ทดสอบจะต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากรอยความไม่ต่อเนื่องเพียงจุดเดียวอาจแสดงผลเป็นรอยบ่งชี้หลายจุด (Multiple indication) หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อมีการขยับหัวทดสอบเพียงเล็กน้อย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$nearzone = \frac{D^2 f}{4v} \tag{2.8}$$

- โดยที่  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)
- $f$  คือ ความถี่ (รอบต่อวินาที)
- $v$  คือ ความเร็วของคลื่นเสียง (มิลลิเมตรต่อวินาที)

เขตไกล (Far zone) เป็นโซนซึ่งมีความดันของเสียงสม่ำเสมอ จุดเริ่มต้นของโซนจะเริ่มต้นที่จุดสิ้นสุดของเขตใกล้ ตรงบริเวณที่มีความดันของเสียงสูงสุด เขตไกลจะเป็น โซนที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการทดสอบ

**2.3.1.2 มุมบาน (Beam divergent)**

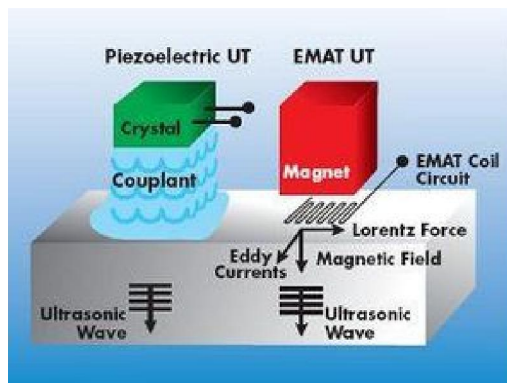
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวทดสอบ เป็นปัจจัยสำคัญของความโตของมุมบาน ซึ่งจะส่งผลต่อการลดทอนและสัญญาณตำหนิหลอกที่อาจเกิดขึ้นได้เมื่อทำการทดสอบบริเวณขอบของชิ้นงาน ซึ่งสามารถหาขนาดของมุมบาน เมื่อคิดที่ขอบลำคลื่นได้จากสมการ

$$\text{มุมบาน} = \sin^{-1} \frac{1.22v}{D \times f} \tag{2.9}$$

- โดยที่  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)
- $f$  คือ ความถี่ (รอบต่อวินาที)
- $v$  คือ ความเร็วของคลื่นเสียง (มิลลิเมตรต่อวินาที)

### 2.3.2 หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า (EMAT)

หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) เป็นหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงที่เปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ซึ่งระบบโดยภาพรวมมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกับระบบทดสอบที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ได้แก่ อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า, หัวทดสอบ และ อุปกรณ์ภาครับสัญญาณและประมวลผล โดยหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินการด้วยกระบวนการของการเหนี่ยวนำด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้สารช่วยสัมผัสในการส่งผ่านคลื่นเสียง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบลักษณะและการทำงานระหว่างหัวทดสอบแบบเพียโซอิเล็กทริก และหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า [12]

ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของหัวทดสอบ คลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า ตามลักษณะการทำงานออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ หลักการของแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) และหลักการของความเค้นทางแม่เหล็ก (Magnetostriction)

#### 2.3.2.1 หัวทดสอบที่ใช้หลักการของแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

พื้นฐานทางฟิสิกส์ของแรงลอเรนซ์ คือเมื่อขดลวดซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่มากกว่า 20,000 Hz วางใกล้พื้นผิวของวัตถุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้เกิดกระแสไหลวนในวัสดุที่นำมาตรวจสอบ หากสนามแม่เหล็กคงที่

ปฏิกิริยาของกระแสไหลวนกับสนามแม่เหล็กที่คงที่จะส่งผลให้เกิดแรงลอเรนซ์ ซึ่งมีทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็กตามสมการเวกเตอร์

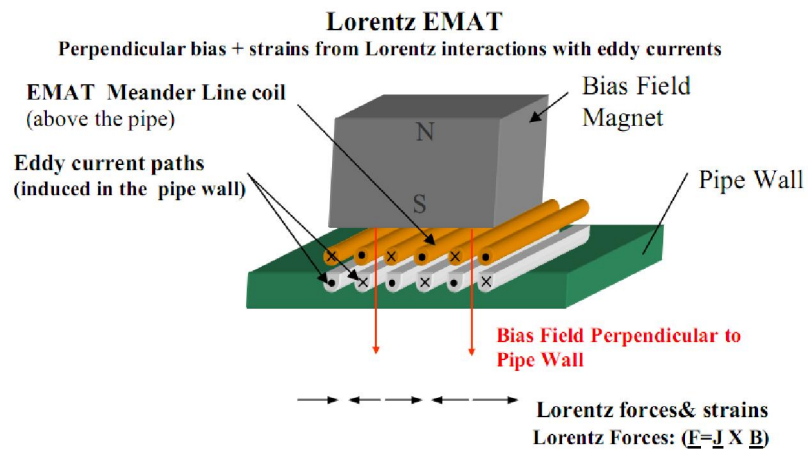
$$F = J \times B \tag{2.10}$$

โดยที่  $F$  = ขนาดและทิศทางของ Lorentz Force (มีหน่วยเป็น N)

$J$  = กระแสไหลวนเหนี่ยวนำ

$B$  = ขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็ก

แรงลอเรนซ์ส่งผลให้มีการกำเนิดคลื่นที่แพร่ในวัสดุที่นำมาตรวจสอบดังรูปที่ 2.13 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านบริเวณหัวรับของ หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไหลวนบริเวณนั้นจะถูกเหนี่ยวนำภายในวัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า ดังนั้นจะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดขึ้น ซึ่งจากทฤษฎีดังกล่าวทำให้ทราบข้อจำกัดของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้หลักการของแรงลอเรนซ์ คือเมื่อระยะห่างระหว่างหัวทดสอบกับผิวของชิ้นงานทดสอบมีระยะห่างมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลการเหนี่ยวนำกระแสไหลวน



รูปที่ 2.13 ลักษณะและการทำงานของหัวทดสอบแบบหลักการแรงลอเรนซ์ [13]

### 2.3.2.1 หัวทดสอบที่ใช้หลักการของความเค้นทางแม่เหล็ก (Magnetostriction)

ความเค้นทางแม่เหล็กคือความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเรียงตัวของอนุภาคเนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยการเรียงตัวที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลอันเนื่องมาจากการจัดเรียงทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในวัสดุใหม่ โดยจะมีขนาดและทิศทางตามเวกเตอร์ลัพธ์ของสนามแม่เหล็กที่ใช้กระตุ้นให้เกิดการจัดเรียงตัว

ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสามารถหาแรงทางแม่เหล็กได้จากสมการอนุพันธ์โมเมนต์ทางแม่เหล็กดังสมการ [แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า] = [งานที่กระทำ] + [ความหนาแน่นของพลังงาน] หรือ

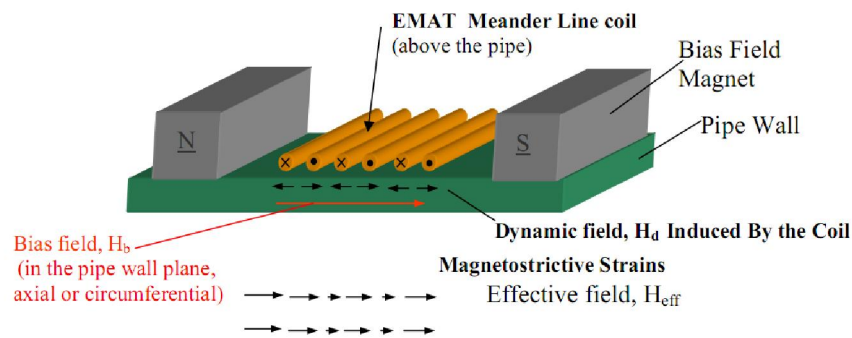
$$\int (T \cdot da) da = \int f dv + \frac{\delta}{\delta t} \int \frac{S}{c^2} dv \quad (2.11)$$

โดยที่  $T$  = ค่าความเค้นดึงของแมกซ์เวลล์ (Maxwell stress tensor)

$f$  = ความหนาแน่นของแรง

$S$  = พอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting vector)

$C$  = ความหนาแน่นของโมเมนต์



รูปที่ 2.14 ลักษณะและการทำงานของหัวทดสอบแบบหลักการความเค้นทางแม่เหล็ก [13]

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

INSIGHT NDT [3] ได้ออกแบบรถเข็นที่ใช้ในการทดสอบเหล็กแผ่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงขึ้นเพื่อจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท ซึ่งติดตั้งหัวทดสอบไว้ด้านล่างส่วนหน้าของคันรถ โดยรองรับหัวทดสอบ 1, 4, 8 และ 16 หัวทดสอบตามแต่ละรุ่น มีการแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์แบบ C-Scan

Sutekiyo Uozumi [4] ได้จดสิทธิบัตรวิธีการทดสอบแผ่นเหล็กร้อนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำไปติดตั้งในสายการผลิตได้ ทั้งนี้จะต้องมีการฉีดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กลงระดับหนึ่งก่อน เพื่อให้สามารถทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นสารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียงได้ แต่ทั้งนี้ยังไม่เพียงพอจึงต้องใช้น้ำที่แรงดันสูงเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ซึ่งวิธีการนี้สามารถรองรับการทดสอบได้ทั้งแบบส่งผ่านคลื่นและแบบพัลส์-เอคโค

Voestalpine [5] ได้ออกแบบเครื่องทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงขึ้นเพื่อออกเป็นผลิตภัณฑ์ที่พร้อมติดตั้งบนสายการผลิต ใช้น้ำเป็นสารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียง โดยส่วนของหัวทดสอบจะติดตั้งบริเวณด้านล่างของสายการลำเลียง สามารถยกระดับ ขึ้น-ลง ได้เพื่อให้เนบกับชิ้นงานทดสอบ มีการ

แสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ในรูปแบบ C-Scan เนื่องจากการทดสอบแบบเข้าถึงทางด้านล่างของผลิตภัณฑ์ เมื่อสายงานเกิดปัญหาขัดข้อง สามารถเอาแผ่นเหล็ก (ผลิตภัณฑ์) ออกได้โดยสะดวก แต่ทั้งนี้หากผิวแผ่นเหล็กไม่สะอาดเพียงพอ จะทำให้สิ่งสกปรกปิดบังหัวทดสอบและทำให้การทดสอบผิดพลาดได้

Krause และคณะ [6] ได้ทดลองสร้างเครื่องทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงระบบอัตโนมัติแบบระนาบ x-y เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์แผ่นคอนกรีตขนาดใหญ่ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงทั้งแบบคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง แสดงผลในรูปแบบ C-Scan ซึ่งนอกจากจะใช้การดูความเข้มของสัญญาณสะท้อนแล้ว ยังอาศัยข้อมูลเฟสที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวกลาง (จากคอนกรีตไปเหล็กโครงสร้าง) ร่วมด้วย และใช้เทคนิคประมวลผลภาพ Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ในการแก้ไขภาพให้ดูสมจริง

Elbern และ Guimares [7] ได้ทำการวิจัยเรื่องการแก้ไขรูปภาพ B-Scan ที่ได้จากการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงซึ่งมักผิดเพี้ยนไปจากมุมบานของลำคลื่น ในการทดลองพบว่าคลื่นที่สะท้อนจากตำแหน่งฐานกลมจะให้ผลที่แสดงออกมาเป็นรูปร่ม ซึ่งต้องทำการประมวลผลภาพปลายทางด้วยหลักการทางเรขาคณิตเพื่อให้ได้ลักษณะภาพตรงตามความเป็นจริง

Robert และ Prada [8] ได้นำเสนอการแก้ปัญหาที่พบโดยทั่วไปของการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแบบ straight-beam pulse-echo ที่เกิดการกลบสัญญาณสะท้อนจากรอยตำหนิที่อยู่ใกล้ผิวล่างของชิ้นงานด้วยสัญญาณที่สะท้อนจากผิวล่าง เนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่กว่า ในการวิจัยนี้ได้ใช้หัวทดสอบแบบเฟสอะเรย์ (Phase-array) และนำสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละตำแหน่งของอะเรย์มาผ่านการประมวลผลแบบ 1-bit เพื่อให้ความสำคัญของขนาดจากรอยตำหนิและสัญญาณจะผิวล่างมีขนาดที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูงก็ต่อเมื่อสัญญาณจากรอยตำหนิมีขนาดที่สูงกว่าระดับของสัญญาณรบกวน (background noise)

Michael EGE และ Jürgen SCHRÖDER [9] ได้ปรับเปลี่ยนวิธีการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในรูปแบบเดิมให้มีขีดความสามารถในการทดสอบมากขึ้น และลดปัญหาจากการต้องใช้สารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียง โดยใช้คลื่นความถี่สูงที่สร้างขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทน ทำให้สามารถทำการทดสอบโดยไม่ต้องสัมผัส จึงสามารถทำการทดสอบได้ในขณะที่อุณหภูมิสูง เช่น หลังจากที่ทำกริดได้ทันที โดยสามารถติดตั้งกับสายการผลิตหลังจากกระบวนการรีด และแสดงผลแบบ C-Scan โดยสามารถแยกแยะคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบได้จากอัตราส่วนของความเร็วคลื่นตามขวางในแนวตั้งฉากและขนานกับทิศทางการรีด

Werner Günther และ Ulrich Sauer [14] ได้ออกแบบและจดสิทธิบัตรหัวทดสอบที่สามารถให้น้ำวิ่งผ่านเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียง มีการออกแบบเป็นทรงสูงและเรียวเหมือนหัวฉีด เพื่อให้ให้น้ำมีการไหลที่สม่ำเสมอและต่อเนื่อง ซึ่งส่วนนี้จะใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานเสียงใกล้เคียงกับค่าความต้านทานเสียงของน้ำมากที่สุดเพื่อไม่ให้คลื่นสะท้อนในส่วนลำของหัวทดสอบ

ใหม่ น้อยพิทักษ์ [15] ได้ออกแบบและสร้างหัวทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงให้มีความไว (sensitivity) สูง จากการทดลองเปลี่ยนแปลงวัสดุรองหลัง (backing material) และทำการเปรียบเทียบกับหัวทดสอบที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถสร้างหัวทดสอบที่มีความไวที่สูงกว่าในค่าเดียวกันและนำไปใช้งานทดสอบจริงได้

## 2.5 สรุป

จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนนั้น ได้ให้ความสำคัญกับการทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลิตภัณฑ์และบริษัท เพื่อให้ผลการทดสอบมีความเข้าใจได้ง่ายขึ้นการแสดงผลจึงเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งได้มีการแสดงผลในรูปแบบภาพตัดขวางแบบต่างๆ เช่น B-Scan และ C-Scan แต่อย่างไรก็ตามการจะได้สัญญาณมานั้นเป็นส่วนสำคัญที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาในส่วนของหัวทดสอบร่วมด้วยไปกับการพัฒนาระบบการทดสอบให้ใช้เวลาในการทดสอบที่สั้นลง

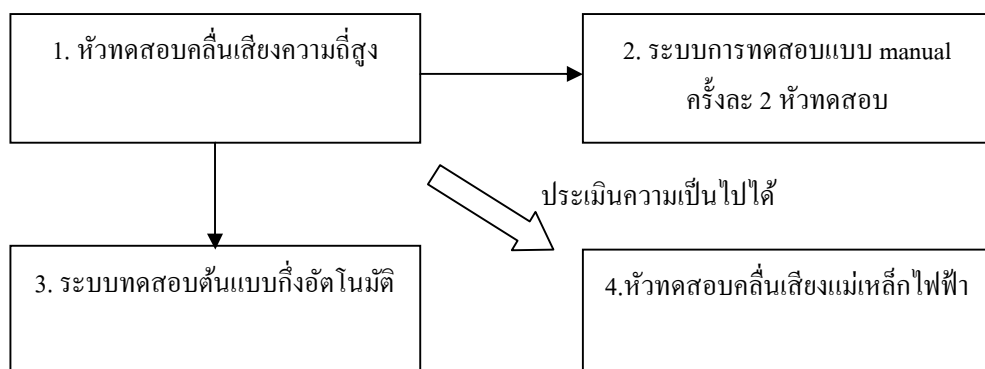
## บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

จากการที่ได้ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา โดยศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง, ระบบควบคุมในระบบขับเคลื่อนแนวระนาบ และ หัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง รวมไปถึงหัวทดสอบแบบใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลที่ได้ศึกษามา จะนำไปสู่การดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บริการตามวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

### 3.1 ภาพรวมการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดกับทางภาคอุตสาหกรรม การพัฒนาระบบจะเป็นต้องรวดเร็วเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้ทันที และให้ความสำคัญกับส่วนที่ต้องใช้ระยะเวลาในการตัดสินใจในรองลงมา ดังนั้นจึงสามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ 4 ส่วนดังนี้

1. พัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงในต้นทุนที่ต่ำและมีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน
2. ศึกษารายละเอียดและพัฒนาระบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยบุคลากร (manual) ให้สามารถทำการทดสอบได้เร็วขึ้น ซึ่งมักจะเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาสูงสุดและส่งผลกระทบต่อสินค้าไม่ทันกำหนด
3. ออกแบบและสร้างระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในระบบกึ่งอัตโนมัติในระนาบ x-y เพื่อความพร้อมที่จะขยายอัตราส่วนและนำไปใช้ในการทดสอบกับชิ้นงานจริง
4. ออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า และรูปแบบการทดสอบเพื่อนำไปใช้เพื่อทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อน รวมถึงการประเมินความเป็นไปได้เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนการทดสอบแบบเดิม



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการดำเนินการวิจัย

### 3.2 การพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

หัวทดสอบจะมีคุณสมบัติทางความสามารถอยู่ 2 ประการ ได้แก่ คุณสมบัติทางด้านความไว (sensitivity) หรือความสามารถในการทดสอบรอยตำหนิขนาดเล็ก และความสามารถในการแยกแยะ (resolution) หรือความสามารถในการแยกแยะรอยตำหนิที่อยู่ใกล้กัน ทั้งสองคุณสมบัตินี้ไม่สามารถทำการปรับปรุงได้ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือหากหัวทดสอบมีความไวสูง ความสามารถในการแยกแยะก็จะต่ำ [16] ซึ่งลักษณะของตำหนิภายในเนื้อเหล็กแผ่นรีดร้อนมักจะเป็นรูปแบบการแยกชั้น สัญญาณสะท้อนที่หัวทดสอบได้รับจะเป็นสัญญาณที่แสดงความหนาของวัสดุที่ลดลงไปจากความเป็นจริง ทำให้หัวทดสอบที่จะพัฒนาขึ้นนี้ให้ความสำคัญกับความไวต่อรอยตำหนิขนาดเล็กมากกว่าการแยกแยะรอยตำหนิที่อยู่ใกล้กัน การพัฒนาหัวทดสอบในส่วนนี้สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนวัสดุรองหลัง (backing material)

#### 3.2.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก

จากความถี่ที่ต้องการใช้งาน 2.25 MHz (มาตรฐาน ASTM A435) สามารถคำนวณหาความหนาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ได้จากสมการ

$$f = \frac{v}{2t} \quad (3.1)$$

โดยที่  $f$  = ความถี่ที่ต้องการใช้งาน (2.25 MHz)

$v$  = ความเร็วคลื่นเสียงในเพียโซอิเล็กทริก (3,960 m/s : Lead zirconate titanate)

$t$  = ความหนาของผลึกเพียโซอิเล็กทริก

ทำให้ได้ค่าความหนาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เป็น 0.88 มิลลิเมตร

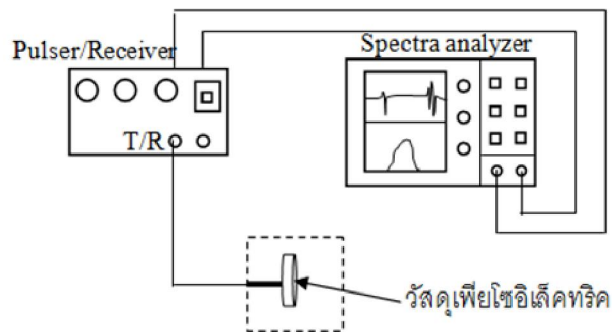
ในส่วนองขนาดหัวทดสอบที่กำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 25-30 มิลลิเมตร ได้กำหนดให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ที่สร้างขึ้นมีขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ซึ่งมากที่สุดตามที่สามารถใช้ได้ เนื่องจากค่าเขตใกล้ (Near zone) แปรผันตรงกับ  $D^2 f$  และมุมบานแปรผันกับ  $Df$  ดังนั้น ถ้าให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความถี่มีค่ามากพร้อมๆกัน จะทำให้ค่าเขตใกล้มีค่ามาก ในขณะที่มุมบานจะมีค่าน้อย จากสมการมุมบาน

$$\text{มุมบาน} = \sin^{-1} \frac{1.22v}{D \times f} \quad (3.2)$$

ซึ่งจะได้ขนาดของมุมบานเท่ากับ  $4.1^\circ$  โดยจะนำไปใช้ในการออกแบบระบบการทดสอบต่อไป

ในส่วนของการทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของผลึกเพียโซอิเล็กทริก จะทำการทดสอบในการตอบสนองเชิงของความถี่ โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้ประกอบด้วยเครื่อง Pulser/Receiver (Panametrics-NDT Model 5077PR Square wave) และเครื่อง Spectra analyzer (Agilent 89410A Vector Signal Analyzer DC-10 MHz) โดยมีรายละเอียดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.2 และกำหนดค่าคงที่ต่างๆเพื่อใช้ในการทดลองดังนี้

1. PRF (Hz) = 100 (จำนวนครั้งของการปล่อยสัญญาณพัลส์ต่อวินาที)
2. Pulsar Voltage (Volts) = 100 (ระดับของพลังงาน)
3. Transducer Freq.(MHz) = 2-2.25 (ช่วงความถี่ที่ขับให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำงาน)
4. Gain (DB) = + 20 (การขยายสัญญาณแอมพลิจูด)



รูปที่ 3.2 วิธีการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

### 3.2.2 วัสดุรองหลัง

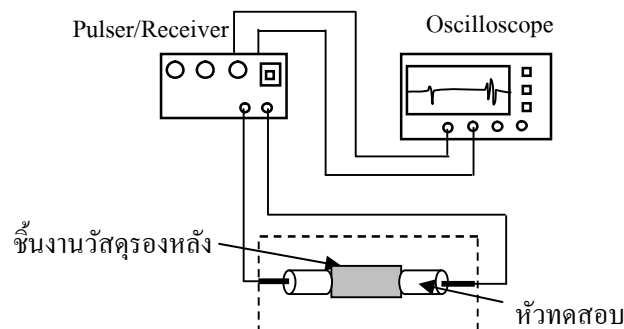
วัสดุรองหลังในหัวทดสอบ มีหน้าที่ช่วยลดทอนและดูดซับพลังงานคลื่นเสียง ไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงไปยังวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวน โดยทั่วไปนิยมใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงผสมกับอีพอกซี (Epoxy) ความหนืดต่ำ โดยวัสดุที่มีความหนาแน่น ( $\rho$ ) สูง จะให้ผลการหน่วง (Damped) ที่สูง ส่งผลให้ความสามารถในการแยกแยะสูง (ช่วงกว้างความถี่กว้าง) แต่แอมพลิจูด (Amplitude) ต่ำ ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำจะให้ผลที่ตรงข้าม การเข้าชุดระหว่างเพียโซอิเล็กทริกกับวัสดุรองหลัง ต้องพิจารณาถึงค่าความต้านทานทางเสียงดังสมควร

$$Z = \rho \times v = \rho \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.3)$$

โดยที่  $Z$  = ค่าความต้านทานทางเสียง  
 $\rho$  = ความหนาแน่น  
 $v$  = ค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาว  
 $E$  = โมดูลัสของวัสดุ (Modulus of elasticity)  
 $\mu$  = อัตราส่วนปัวซอง

จากสมการด้านบนทำให้ทราบว่าค่าความต้านทานทางเสียง (Acoustic impedance) ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุรองหลัง โดยที่ค่าความต้านทานทางเสียงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นการกำหนดปริมาณผงโลหะสูงสุดจะกำหนดจากปริมาณที่ผงโลหะสามารถผสมเข้ากับอีพอกซีและสามารถอัดขึ้นรูปได้ โดยไม่เกิดการแยกตัวออกจากกัน ซึ่งสามารถกำหนดการทดลองได้ดังนี้

1. ทำการเปรียบเทียบผลของผงโลหะที่ใช้ผสมกับอีพอกซีระหว่างผงบรอนซ์ และ ผงทังสเตน ในอัตราส่วนที่ไม่ก่อให้เกิดการแยกตัวจากกัน
2. ทำการวัดค่าความต้านทานเสียงโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านคลื่นเสียง (through-transmission) (เพื่อนำไปคำนวณเป็นค่าความเร็วคลื่นเสียง ซึ่งทราบความหนาของแท่งวัสดุรองหลัง) โดยใช้ Pulsar/Receiver (Panametrics-NDT Model 5077PR Square wave) ร่วมกับ Oscilloscope (Agilent 54624A) และ หัวทดสอบที่มีย่านความถี่ 4 MHz รายละเอียดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.3

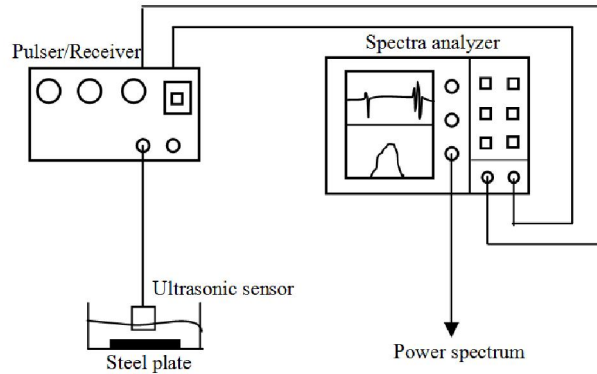


รูปที่ 3.3 วิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวในวัสดุรองหลัง

### 3.2.3 คุณลักษณะของหัวทดสอบ

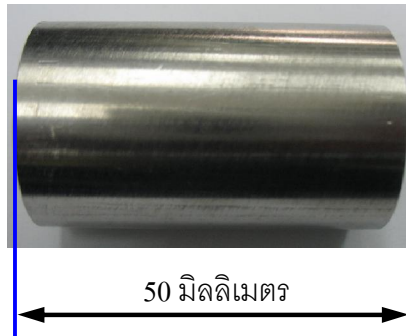
จากการที่ได้ทดสอบผลึกเพียโซอิเล็กทริก และวัสดุรองหลังแล้ว จะนำมาประกอบลงตัวเรือนของหัวทดสอบซึ่งทำจากเรซิน จากนั้นจะทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติดังนี้

1. ทดสอบการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองคล้ายหัวข้อ 3.2.2 โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.4

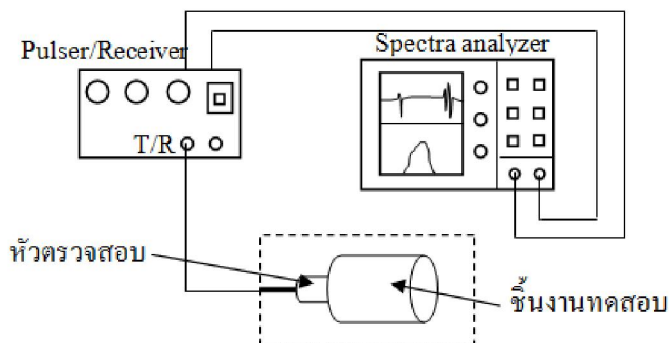


รูปที่ 3.4 วิธีการทดสอบการตอบสนองเชิงความถี่ของหัวทดสอบ

2. ทดสอบการตอบสนองทางเวลา ในที่นี้จะทำการทดสอบโดยการวัดความหนาของวัสดุตัวอย่างในรูปที่ 3.5 และมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.6 โดยการทดลองทั้งหมด จะทำการเปรียบเทียบผลกับหัวทดสอบที่ผลิตขึ้นเพื่อการพาณิชย์อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบวัดความหนา

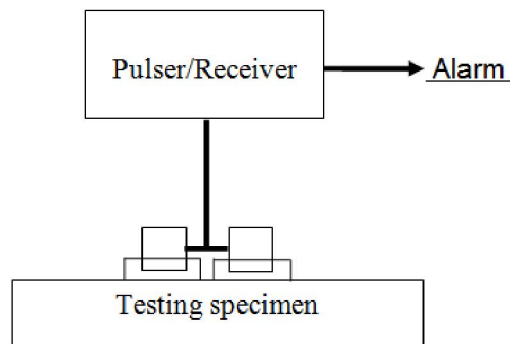


รูปที่ 3.6 วิธีการทดสอบวัดความหนาชิ้นงาน

### 3.3 ระบบการทดสอบโดยบุคลากร

ระบบการทดสอบโดยบุคลากรแบบเดิม เป็นการทดสอบครั้งละ 1 หัวทดสอบซึ่งทำให้มีความล่าช้าและส่งผลให้ส่งผลิตภัณฑ์ออกสู่มือลูกค้าไม่ทันกำหนด ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการออกแบบเพื่อปรับเปลี่ยนเป็นระบบทดสอบครั้งละ 2 หัวทดสอบเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างรวดเร็ว ในส่วนนี้สามารถแสดงภาพโดยรวมได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

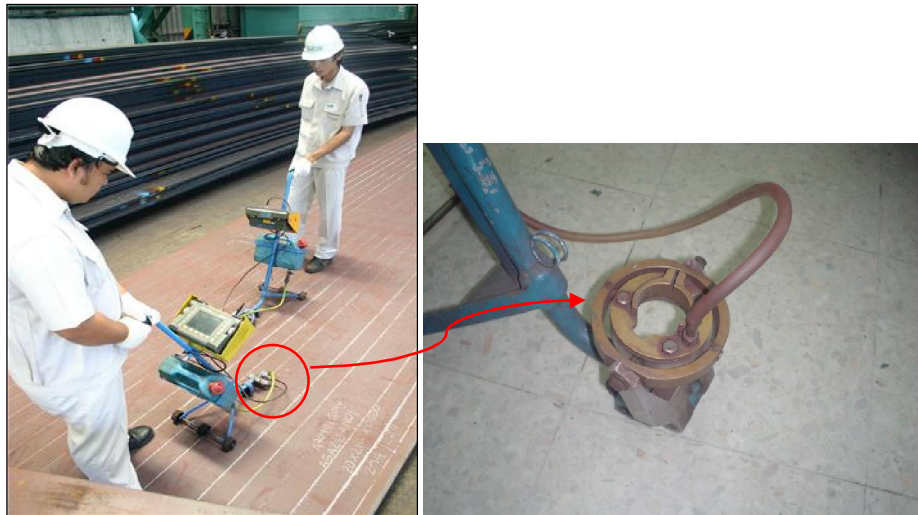
1. หัวทดสอบที่พัฒนาขึ้นใหม่ (ในหัวข้อที่ 3.2)
2. ระบบจับยึดหัวทดสอบแบบคู่
3. ระบบแจ้งเตือนแก่บุคลากรทดสอบ



รูปที่ 3.7 ภาพโดยรวมของระบบที่ออกแบบใหม่

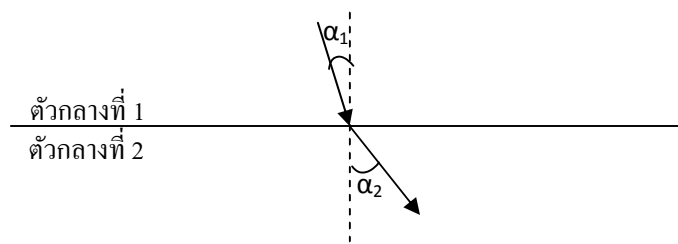
#### 3.3.1 ระบบจับยึดหัวทดสอบแบบคู่

ในการพัฒนาระบบ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าถึงในรายละเอียดย่อยของปัญหาให้ครบถ้วนมากที่สุด ซึ่งในรูปที่ 3.8 แสดงถึงระบบจับยึดหัวทดสอบแบบเดิม



รูปที่ 3.8 การทดสอบโดยบุคลากร (ซ้าย) และระบบจับยึดหัวทดสอบแบบเดิม (ขวา)

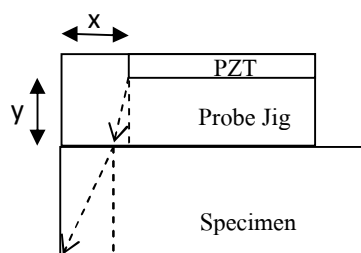
จะเห็นได้ว่าระบบการทดสอบแบบเดิมนั้นใช้น้ำเป็นสารช่วยส่งผ่านคลื่นเสียงโดยป้อนเดิมด้วยพลังงานศักย์โน้มถ่วง มีชุดจับยึดเป็นทองเหลืองจับยึดหัวทดสอบด้วยการสวมเข้าจากด้านล่างอาศัยแรงโน้มถ่วง ให้น้ำหนักจากชุดจับยึดช่วยกดให้หัวทดสอบแนบไปกับชิ้นงานอยู่เสมอ แต่หัวทดสอบสามารถคลอนและขยับไปมาได้ง่าย หัวทดสอบจะสัมผัสกับชิ้นงาน โดยตรงทำให้น้ำสัมผัสเกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นในการทดสอบจะสามารถนำหัวทดสอบออกจากอุปกรณ์จับยึดได้ลำบาก จากปัญหาข้อนี้จึงได้นำไปสู่การออกแบบโดยการสวมหัวทดสอบจากด้านบน แต่หัวทดสอบที่ติดตั้งจากด้านบนนี้จะเกิดการหักเหขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลางได้เนื่องจากมุมบานซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 มีค่าเท่ากับ  $4.1^\circ$  ด้วยกฎของสเนลล์



รูปที่ 3.9 การหักเหตามกฎของสเนลล์

$$\alpha_2 = \sin^{-1} \left( \frac{(\sin \alpha_1) \cdot v_2}{v_1} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ความเร็วของคลื่นเสียงในเหล็ก ( $v_2$ ) ความเร็วของคลื่นเสียงในน้ำ ( $v_1$ ) และมุมบานที่  $4.1^\circ$  ลงในสมการจะได้มุมบานที่ใหญ่ขึ้นเป็น  $16.4^\circ$  จากผลของการหักเห ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ทดสอบเหล็กกริดที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร จะต้องออกแบบอุปกรณ์จับยึดให้มีขนาดเพื่อป้องกันมุมบานกวาดไปในบริเวณสันของชิ้นงาน ซึ่งจะแสดงสัญญาณที่ผิดพลาดขึ้นดังรูปที่ 3.10



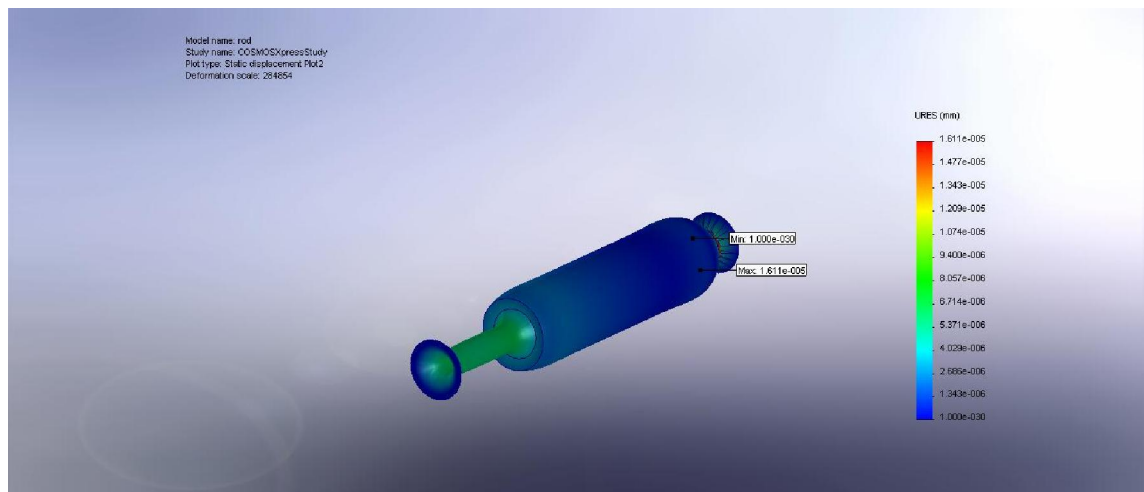
รูปที่ 3.10 การหักเหที่เกิดขึ้น และระยะที่จำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์จับยึด

เมื่อทำการยกกระดับหัวโพรบขึ้นไปเพื่อป้องกันความเสียหาย และป้องกันผลของเขตอับเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร (y) จากการคำนวณทางเรขาคณิตดังสมการ

$$x = (20 \cdot \tan(16.4) + 2 \cdot \tan(4.1)) \quad (3.5)$$

จะได้ระยะที่ต้องเผื่อเป็น 6.03 มิลลิเมตร เป็นอย่างน้อย และเมื่อทำการเผื่อเป็น 22 มิลลิเมตรก็จะสามารถนำไปใช้ทดสอบผลิตภัณฑ์ได้หนาถึง 74.26 มิลลิเมตร

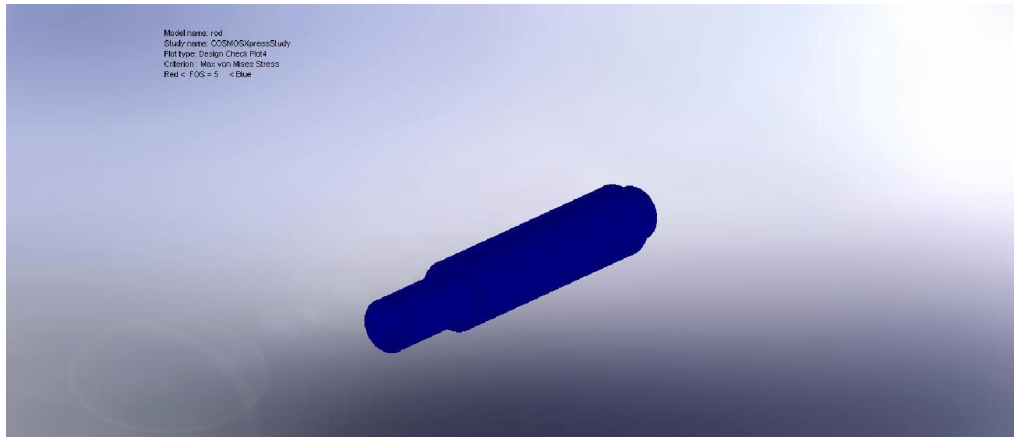
นอกจากการออกแบบเบื้องต้นดังกล่าว จำเป็นต้องออกแบบเพื่อการทดสอบในเหล็กที่เกิดการบิดตัวจากการรีดด้วย และการไหลของน้ำซึ่งใช้เป็นสารช่วยสัมผัสต้องสม่ำเสมอ รวมถึงการปรับเปลี่ยนระยะห่างของหัวทดสอบโดยง่ายเพื่อความเหมาะสมต่อการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A435 ระบบที่ออกแบบขึ้นเน้นการจับยึดให้มีลักษณะเป็นข้อต่อเพื่อให้น้ำหนักเบา และมีความเป็นอิสระมากที่สุด โดยใช้เป็นทางลำเลียงของน้ำที่ใช้ป้อนเติมด้วย จึงมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายได้เพื่อความมั่นใจต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการกระแทก และการยกในระหว่างการดำเนินการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์แรงและโครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกทำเฉพาะในส่วนที่วิกฤติต่อแรงกระทำที่อาจเกิดขึ้น โดยเลือกใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม ในส่วนข้อต่อ ดังรูปที่ 3.11 ถึง 3.14



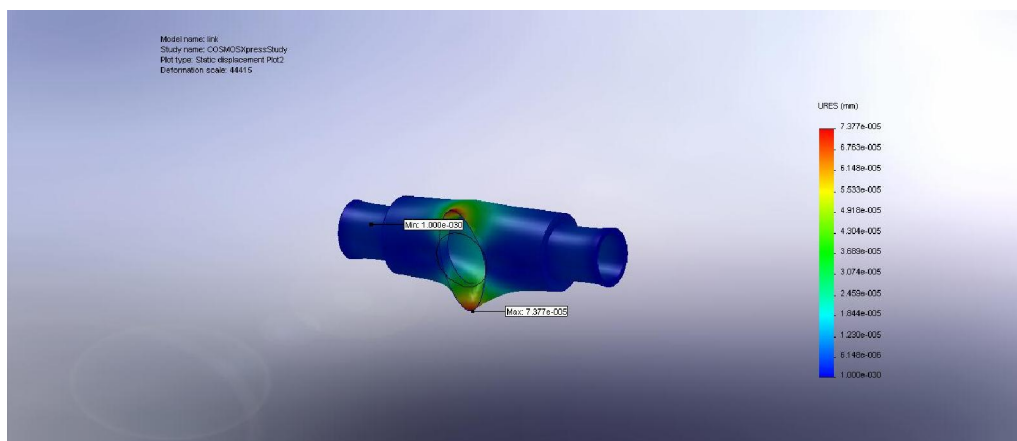
รูปที่ 3.11 ลักษณะและระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปของชิ้นส่วนจับยึด

รูปที่ 3.11 ได้แสดงระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปเมื่อมีการรับแรง ทั้งจากน้ำหนักของชิ้นส่วนที่จับยึด และการกระแทกที่เกิดขึ้น ในที่นี้คิดเป็นแรง 6 นิวตันกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเกลียว จะมีระยะที่เปลี่ยนรูปไปสูงสุด  $1.61 \times 10^{-5}$  มิลลิเมตรซึ่งถือว่ายอมรับได้ และเมื่อทำการตรวจสอบความเค้นด้วยวิธี Max von Mises Stress ที่จะทำให้วัสดุเสียหายจากแรงดังกล่าวด้วยค่าเผื่อความปลอดภัย (factor of

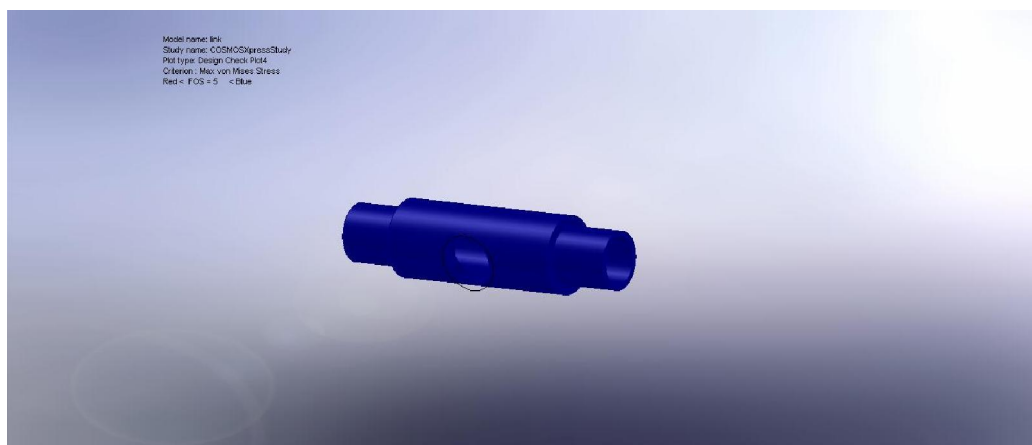
safety) เท่ากับ 5 โดยจะแสดงเป็นสีแดงเมื่อชิ้นส่วนนั้นเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งผลในรูปที่ 3.12 แสดงถึงชิ้นส่วนนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 3.12 ความเสียหายจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นส่วนจับยึด



รูปที่ 3.13 ลักษณะและระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปของชิ้นส่วนจับยึดด้วยยึดหัวทศสอบ



รูปที่ 3.14 ความเสียหายจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นส่วนจับยึดด้วยยึดหัวทศสอบ

รูปที่ 3.13 ได้แสดงระยะที่มีการเปลี่ยนรูปไปเมื่อมีการรับแรง ทั้งจากน้ำหนักของถ้วยยึดหัวทดสอบ และการกระแทกที่เกิดขึ้น ในที่นี้คิดเป็นแรง 6 นิวตันกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเกลียว และแรง 2.5 นิวตัน ในจุดยึดติดกับถ้วยยึดหัวทดสอบทั้ง 2 ข้าง จะมีระยะที่เปลี่ยนรูปไปสูงสุด  $7.377 \times 10^{-5}$  มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ายอมรับได้ และเมื่อทำการตรวจสอบความเค้นด้วยวิธี Max von Mises Stress ที่จะทำให้วัสดุเสียหายจากแรงดังกล่าวด้วยค่าเพื่อความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 5 โดยจะแสดงเป็นสีแดงเมื่อชิ้นส่วนนั้นเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งผลในรูปที่ 3.14 แสดงถึงชิ้นส่วนนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

จึงสรุปได้ว่าลูมิเนียมมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้เป็นชิ้นส่วนจับยึด ทำให้ได้อุปกรณ์จับยึดดังรูปที่ 3.15 ซึ่งใช้วัสดุลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่แข็งแรงและน้ำหนักเบากว่าทองเหลืองในแบบเดิม โดยมีน้ำหนักเพียง 380 กรัมเท่านั้น



รูปที่ 3.15 ระบบจับยึดที่ออกแบบใหม่สำหรับการทดสอบแบบสองหัวทดสอบ

### 3.3.2 ระบบแจ้งเตือนแก่บุคลากรทดสอบ

เครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้ในบริษัท LPN Plate mill จำกัด Model Krautkramer USM 35 Serial No. 2169C มีเพียงช่องต่อเพื่อรับส่งสัญญาณจากหัวทดสอบได้เพียงหัวเดียวเท่านั้น ดังนั้นเพื่อไม่ต้องลงทุนเพิ่มเติมในราคาที่สูงในการทดลองจึงใช้หัวต่อ BNC แบบสามทางเพื่อแยกสัญญาณส่งและรับมายังหัวทดสอบทั้งสอง และส่วนการแจ้งเตือนจะสามารถใช้ฟังก์ชันของเครื่องทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูงโดยแสดงการแจ้งเตือนด้วยบนจอ LCD ได้เมื่อพบสัญญาณจากตำหนิ อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถแสดงจุดเด่นและจุดด้อยได้ดังตารางที่ 3.1

### ตารางที่ 3.1 จุดเด่นและจุดด้อยของการประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบเพื่อทดสอบครึ่งละ 2 หัวทดสอบ

จุดเด่น	จุดด้อย
1. ไม่ต้องลงทุนเพิ่มเติมเพื่อทำการทดลอง 2. บุคลากรสามารถทำงานได้รวดเร็ว เนื่องจากมีความคุ้นเคย ไม่ต้องเรียนรู้เพิ่มเติมในการหัดใช้เครื่องมือชนิดใหม่	1. ไม่ทราบที่มาของสัญญาณจากตำหนิแน่ชัดว่ามาจากหัวทดสอบใด ทำให้ต้องเพิ่มระยะเวลาในการตรวจสอบอย่างละเอียด หากพบตำหนิ

เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพทางเวลา ซึ่งควรต้องลดลงครึ่งหนึ่งตามทฤษฎี แต่อาจเพิ่มระยะเวลาในการแยกแยะรอยตำหนิ จึงได้นำไปใช้ทดสอบแผ่นเหล็กที่ร้อนในชุดเดียวกัน ด้วยระบบทดสอบแบบเดิมและแบบใหม่ โดยใช้บุคลากร 2 คนซึ่งมีความสามารถและความชำนาญที่ใกล้เคียงกันของทางบริษัท และแยกกันบันทึกผลทางเวลาดังนี้

1. ทำการทดสอบโดยใช้เส้นตรวจสอบแนวยาว (Longitudinal)
2. ทำการทดสอบโดยใช้เส้นตรวจสอบแนวขวาง (Transverse)
3. ทำการทดสอบโดยใช้เส้นตรวจสอบแนวตาราง (Square)

และเพื่อทำการเปรียบเทียบผลทางคุณภาพ ก็จะดำเนินการทดสอบโดยใช้เส้นตรวจสอบทั้ง 3 ข้างต้น แต่จะบันทึกผลเป็นจำนวนรอยตำหนิที่พบ โดยให้ตัวแปรควบคุมเป็นชิ้นงานเดียวกันต่อการทดสอบทั้ง 3 เส้นตรวจสอบ

### 3.4 ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกึ่งอัตโนมัติ

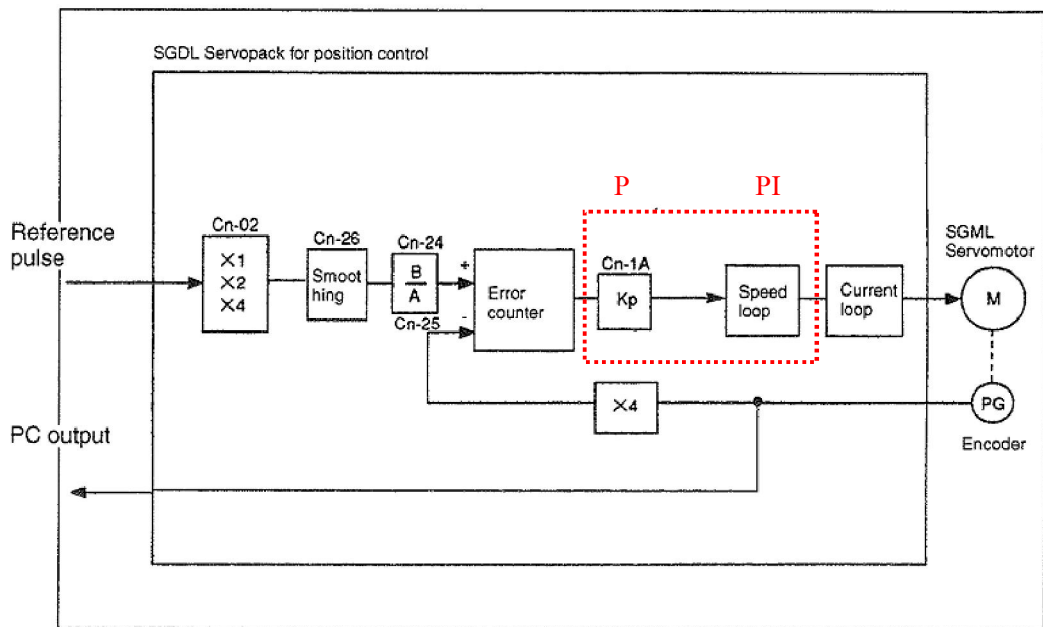
ระบบต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีพื้นที่ทำงาน 340 x 380 มิลลิเมตร ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ 220V ด้วยชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 100W 2 ตัวทำงานอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

### 3.4.1 ระบบควบคุมตำแหน่งแบบ P-PI

ระบบควบคุมของชุดขับเคลื่อนในแนวระนาบของระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ออกแบบขึ้นได้ใช้ SERVOPACK SDGE-01-AP ของบริษัท Yaskawa ซึ่งมีระบบควบคุมตำแหน่งภายในเป็นแบบ P-PI โดยแยกเป็นลูปรควบคุมได้ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งแยกเป็น P สำหรับการควบคุมลูปรตำแหน่ง ร่วมกับ PI สำหรับการควบคุมลูปรความเร็ว และสามารถแสดงเป็นแผนผังของระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 3.18

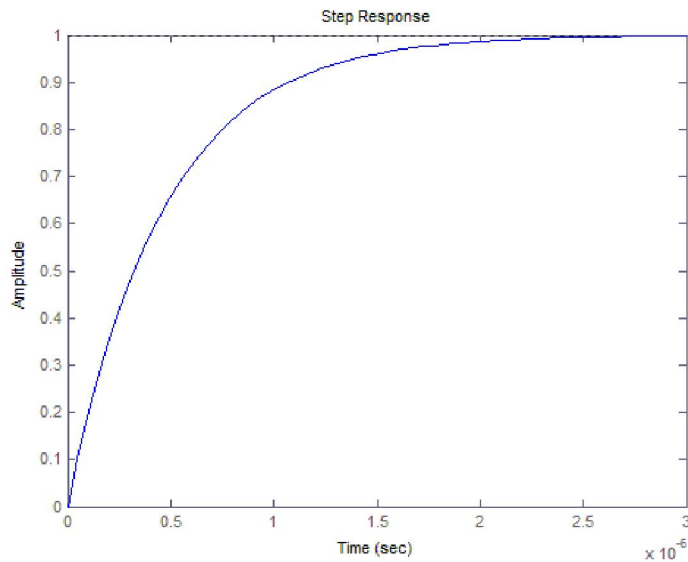


รูปที่ 3.17 ระบบควบคุมของชุดขับเคลื่อน

เพื่อให้ระบบควบคุมมีความเป็นอิสระต่อกันในแต่ละลูปร จึงกำหนดตำแหน่งของโพล (poles) ให้ห่างกัน 10 เท่า ในช่วงความถี่ 400, 40, 4 rad/s ตามลำดับ และ โหลด (J) มีขนาด  $2.0652 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup> จะได้ที่รานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function)

$$\frac{\theta(s)}{\theta^*(s)} = \frac{444s^2 + 17760s + 64000}{2.0652 \times 10^{-4}s^3 + 444s^2 + 17760s + 64000} \quad (3.6)$$

หมายถึงจะได้ค่าตัวคูณของลูปรตำแหน่ง (Kp) เป็น 5.7289 Hz, ค่าตัวคูณของลูปรความเร็ว (Kv) เป็น 70.6648 Hz, และค่าคงที่ทางเวลาของการอินทิเกรตของลูปรความเร็ว (Ti) เป็น 39.7 ms ซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองต่อสเต็ปฟังก์ชัน (step response) ได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณสแต็ป

### 3.4.2 การตรวจหารอยตำหนิจากชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบนี้ จะใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างความหนา 20 มิลลิเมตร ซึ่งทำตำหนิเทียมขึ้นจากการกัดผิวเพื่อให้มีระยะความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้สัญญาณสะท้อนมีลักษณะคล้ายคลึงกับตำหนิที่เกิดการแยกชั้น ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างที่กัดผิวลงไปที่มีความลึกต่างกัน

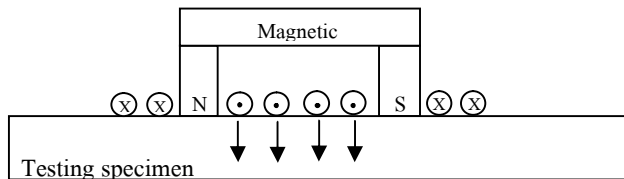
ในขั้นตอนการทดลองจะให้ระบบขับเคลื่อนขับหัวทดสอบให้เคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ 0.1 เมตรต่อวินาที ไปบนชิ้นงานทดสอบตัวอย่างซึ่งคว่ำด้านที่กัดผิวลงด้วยการทดสอบแบบต่อเนื่องตลอดผิวชิ้นงาน โดยตั้งค่า Pulser/Receiver (Panametrics-NDT Model 5077PR Square wave) ดังนี้

1. PRF (Hz) = 100 (จำนวนครั้งของการปล่อยสัญญาณพัลส์ต่อวินาที)
2. Pulser Voltage (Volts) = 100 (ระดับของพลังงาน)
3. Transducer Freq.(MHz) = 2-2.25 (ช่วงความถี่ที่ขับให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำงาน)
4. Gain (DB) = + 20 (การขยายสัญญาณแอมพลิจูด)

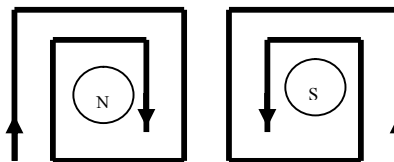
### 3.5 หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า

หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยแม่เหล็ก, ขดลวดตัวส่ง และขดลวดตัวรับ ซึ่งการออกแบบขดลวดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบคลื่นที่ใช้ในวิธีการทดสอบที่ต่างกันไป ในกรณีของการทดสอบเหล็กแผ่นรีดร้อน เพื่อให้สามารถตรวจพบรอยแยกชั้น ได้ดีจำเป็นต้องใช้คลื่นตามยาวทำการทดสอบในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงานทดสอบ การใช้หัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหลักการความเค้นทางแม่เหล็กจึงเป็นไปได้ยากและไม่เหมาะสมกับสภาพการติดตั้งในสายการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหลักการของแรงลอเรนซ์

จากสมการของแรงลอเรนซ์จะได้ทิศทางของคลื่นที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎมือขวา ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจะเห็นขดลวดเพียงภาพตัดขวางเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจรูปที่ 3.21 ได้แสดงรูปร่างของขดลวด และทิศทางการป้อนกระแส เพื่อใช้เหนี่ยวนำให้กำเนิดคลื่น



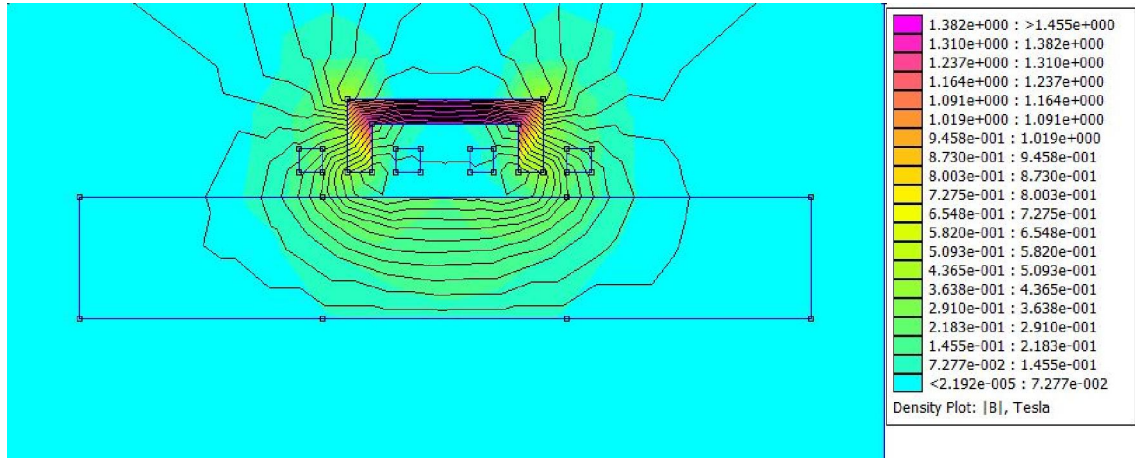
รูปที่ 3.20 ลักษณะทางกายภาพของหัวทดสอบแบบหลักการแรงลอเรนซ์



รูปที่ 3.21 รูปร่างของขดลวด และทิศทางการป้อนกระแส

#### 3.5.1 การออกแบบแม่เหล็ก

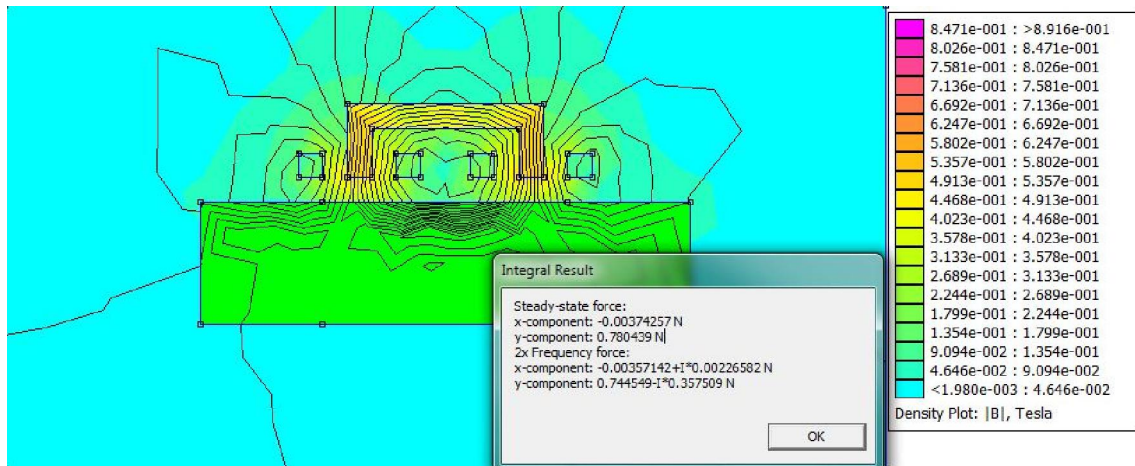
เพื่อให้หน้าหนักเบาและสะดวกต่อการใช้งาน แม่เหล็กที่ใช้จะเป็นแม่เหล็กถาวร 2 ชั้น หันขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้เข้าหากัน โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม FEMM<sup>®</sup> เพื่อวิเคราะห์ไฟไนต์เอเลเมนต์ทางแม่เหล็ก ถึงเส้นทางและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก สามารถแสดงผลดังรูปที่ 3.22 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 Tesla



รูปที่ 3.22 ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กบนชิ้นงานทดสอบ

### 3.5.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

ในส่วนของการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจำเป็นต้องเลือกขดลวดตัวนำอาบน้ำยาที่สามารถทนกระแสได้ 1 แอมป์ เพื่อให้หัวทดสอบมีขนาดเล็ก จะให้มีการพันขดลวดในรูปแบบโซลินอยด์โดยแกนเป็นอากาศหน้าตัดสี่เหลี่ยมจำนวน 1,000 รอบ เพื่อให้มีความตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้โปรแกรม FEMM<sup>®</sup> คำนวณแรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าในแนวตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบมีค่า 0.00167186 N ทำให้เกิดแรงที่เป็นผลจากความเค้นขึ้นขนาด 0.780439 N เมื่อคิดพื้นที่เฉลี่ยตลอดความกว้างของหัวทดสอบและความหนาชิ้นงาน ดังพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แรงที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและแม่เหล็กถาวร

### 3.6 สรุป

จากการออกแบบและวางแผนการทดลองข้างต้น ได้แก่ ศึกษาและพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง, พัฒนาระบบทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยบุคลากร, ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในระบบกึ่งอัตโนมัติ และการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อ

เป็นการพัฒนาระบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในภาคอุตสาหกรรมให้มีศักยภาพในการแข่งขันมากขึ้น โดยในส่วนต่อไปจะแสดงผลการทดลอง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้น

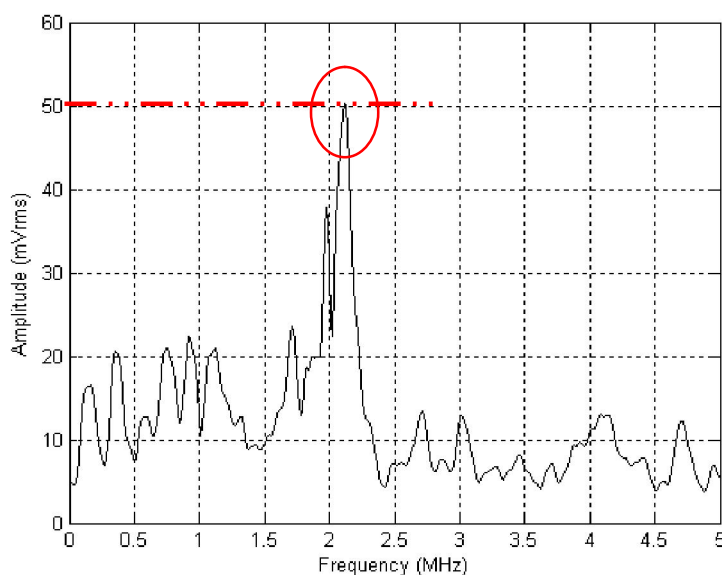
## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย ตามแนวทางการวิจัยจากบทที่ 3 เพื่อทำการศึกษาและพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง, พัฒนาระบบทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยบุคลากร, ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในระบบกึ่งอัตโนมัติ และการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงการประเมินความเป็นไปได้ต่อการพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการพัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง

#### 4.1.1 ผลการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าในเชิงความถี่ของเพียโซอิเล็กทริก

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความพร้อมในการใช้งานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติการตอบสนองของความถี่ธรรมชาติและแอมพลิจูดเริ่มต้น เนื่องจากทิศทางการขับ (Excite) ให้เกิดความถี่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก สามารถขับให้เกิดความถี่ได้ 2 ทิศทางคือ ขับให้เกิดความถี่โดยอาศัยความหนาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และขับให้เกิดความถี่โดยอาศัยความกว้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถทราบได้ว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกขับให้เกิดความถี่จากทิศทางใด จึงจำเป็นต้องวัดคุณสมบัติการตอบสนองของความถี่ธรรมชาติใหม่โดยยึดผลการวัดจากเครื่อง Spectra analyzer เป็นหลัก เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบจากทิศทางการขับให้เกิดความถี่ ที่อาจจะวัดการขับให้เกิดความถี่ ที่ทิศทางต่างกัน โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การตอบสนองด้านความถี่และแอมพลิจูดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

จากการทดลองวัดการตอบสนองด้านความถี่และแอมพลิจูดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงให้ทราบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชิ้นที่ 1 มีการตอบสนองของสัญญาณด้านความถี่ที่ 2,112,500 Hz และมีแอมพลิจูดที่ 50.796 mVrms แต่มีข้อสังเกตคือ ในการทดลองได้ทำการป้อนค่าความถี่ (ขับให้เกิดความถี่) ให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 2-2.25 MHz ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าความถี่ธรรมชาติที่ 2-2.25 MHz จะให้ค่าแอมพลิจูดมีค่าสูงสุด

#### 4.1.2 ผลการสร้างวัสดุรองหลัง

จากการทดลองเพื่อผสมผงโลหะที่ใช้ผสมกับอีพอกซี ระหว่างผงบรอนซ์ และ ผงทังสเตนในอัตราส่วนที่ไม่ก่อให้เกิดการแยกตัวจากกัน สามารถเก็บผลความหนาแน่น ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว และค่าความต้านทานเสียง ได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการขึ้นรูปวัสดุรองหลังโดยใช้ผงบรอนซ์ผสมอีพอกซี

No.	Bronze powder (g)	Epoxy Resin/Hardener (g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Longitudinal velocity (m/sec.)	Acoustic impedance (kg/m <sup>2</sup> s × 10 <sup>6</sup> )
1	12	5/5	2,750	2,225	6.1
2	14	“	2,890	2,222	6.4
3	16	“	2,962	2,255	6.7
4	20	“	3,224	2,238	7.2

ตารางที่ 4.2 ผลการขึ้นรูปวัสดุรองหลังโดยใช้ผงทังสเตนผสมอีพอกซี

No.	Tungsten powder (g)	Epoxy Resin/Hardener (g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Longitudinal velocity (m/sec.)	Acoustic impedance (kg/m <sup>2</sup> s × 10 <sup>6</sup> )
1	30	3/3	6,445	1,748	11.3
2	40	“	7,195	1,734	12.5
3	60	“	8,405	1,754	14.7

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุรองหลังจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน ตามปริมาณของผงบรอนซ์ หรือผงทังสเตนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวในวัสดุรองหลังมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเพิ่มปริมาณของผงโลหะที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานทางเสียงของวัสดุรองหลังขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นเป็นหลัก

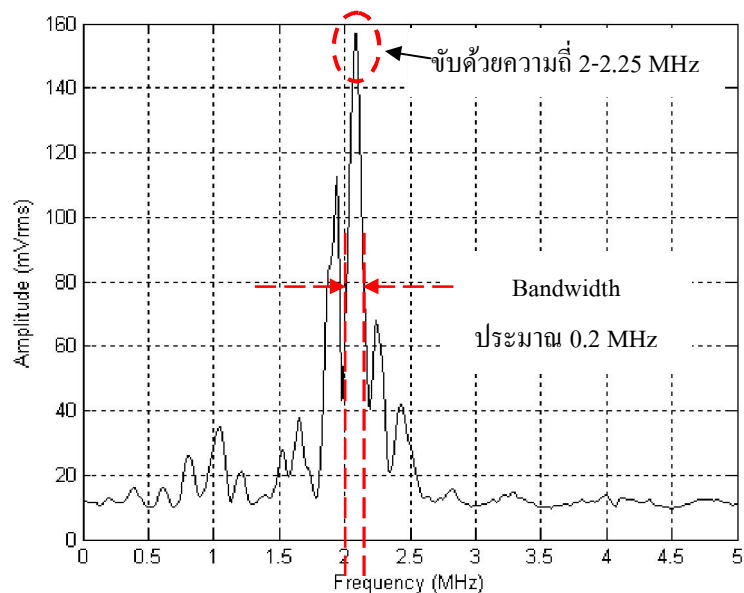
ค่าความต้านทานทางเสียงของวัสดุรองหลังผนังโลหะผสมอียิปทอซึ่งให้ค่าความต้านทานทางเสียงสูงสุด  $7.2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  สำหรับบรอนซ์ และ  $14.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  สำหรับทังสเตน ซึ่งค่าความต้านทานทางเสียงของวัสดุรองหลัง มีได้ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวของวัสดุรองหลังด้วย โดยวัสดุรองหลังบรอนซ์ผสมอียิปทอ และทังสเตนผสมอียิปทอ มีความเร็วคลื่นเสียงตามยาวเฉลี่ย 2,235 เมตร/วินาที และ 1,745 เมตร/วินาที ตามลำดับ

### 4.1.3 ผลการคุณลักษณะของหัวทดสอบ

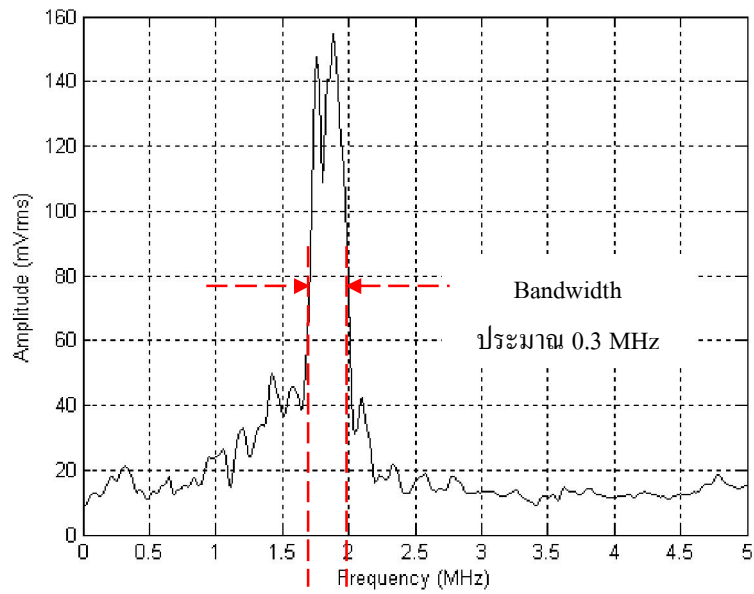
#### 4.1.3.1 ผลการวัดการตอบสนองด้านความถี่ (Frequency response)

ผลการวัดการตอบสนองด้านความถี่หลังประกอบหัวทดสอบ โดยให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ประกอบเข้ากับวัสดุรองหลังที่สร้างจากผนังทังสเตนผสมอียิปทอ (หนา 12 มิลลิเมตร น้ำหนัก 21.32 กรัม) เป็นหัวทดสอบที่ 1 และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ประกอบเข้ากับวัสดุรองหลังที่สร้างจากผนังบรอนซ์ผสมอียิปทอ (หนา 12 มิลลิเมตร น้ำหนัก 8.14 กรัม) เป็นหัวทดสอบที่ 2 วัดการตอบสนองด้านความถี่หลังประกอบหัวทดสอบ เทียบกับก่อนการประกอบหัวทดสอบ และเทียบกับหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ที่มีย่านความถี่ 2 MHz

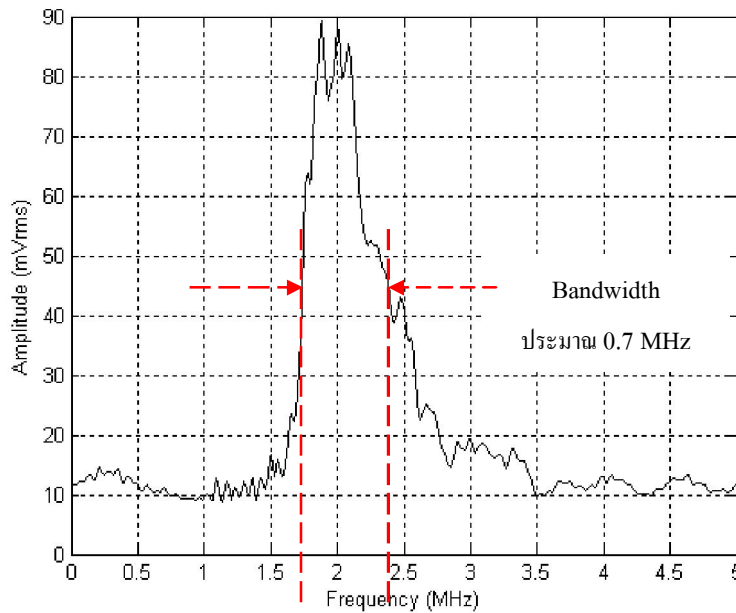
ซึ่งหัวทดสอบที่ 1, 2, และ หัวทดสอบเชิงพาณิชย์ จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3, และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.3 การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.4 การตอบสนองด้านความถี่ของหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ย่านความถี่ 2 MHz

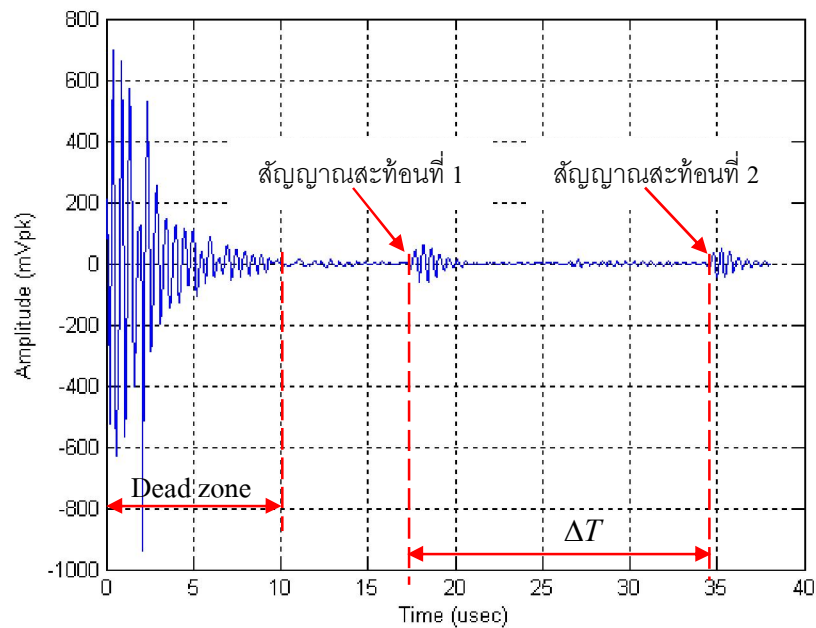
ตารางที่ 4.3 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะของหัวทดสอบ

ปัจจัยที่ศึกษา	ช่วงกว้างความถี่ (MHz)	แอมพลิจูด (mVrms)
หัวทดสอบ		
หัวทดสอบที่ 1	0.2	158.53
หัวทดสอบที่ 2	0.3	156.21
หัวทดสอบเชิงพาณิชย์	0.7	88.65

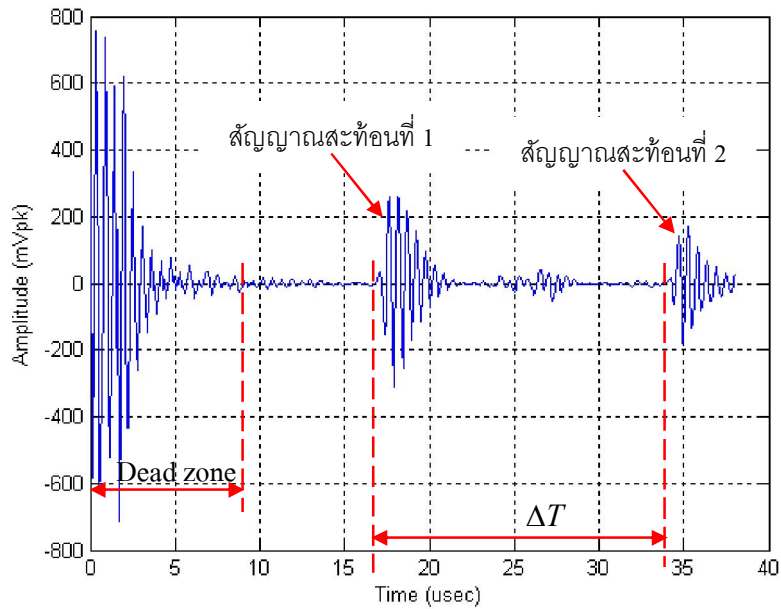
จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าหัวทดสอบที่ประกอบขึ้นจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการประกอบหัวทดสอบในงานวิจัยนี้ ไม่ได้ใส่แผ่นป้องกันการสึก (Wear plate) แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงถึงการเป็นปฏิภาคผกผันระหว่างความไวของการทดสอบ กับช่วงความถี่ที่ตอบสนอง (Frequency bandwidth) ดังนั้นช่วงความถี่ที่แคบกว่า ส่งผลให้แรงดันคลื่นเสียง (Sound pressure) สูงกว่า ซึ่งหมายถึงความไว (Sensitivity) ที่สูงกว่าด้วย

#### 4.1.3.2 ผลการตอบสนองทางเวลา (Time domain)

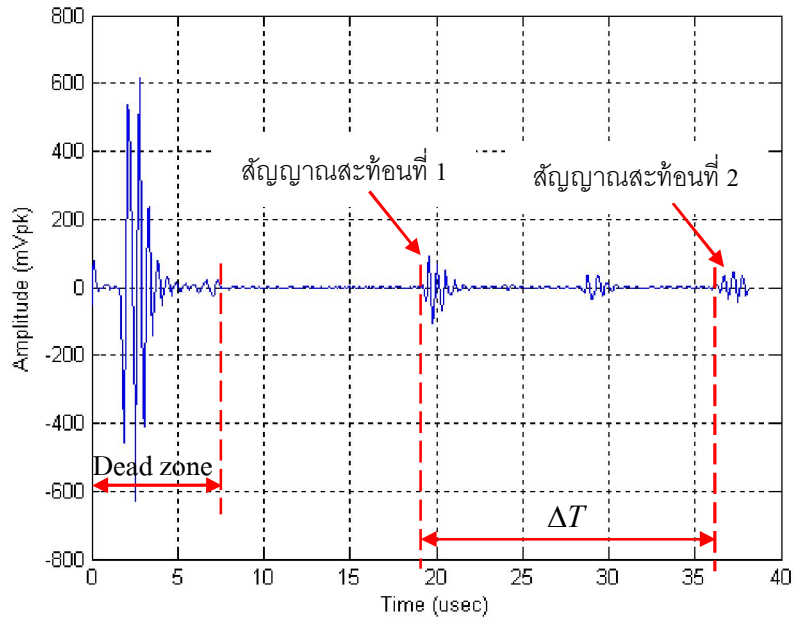
การศึกษาการตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบ ทำให้ทราบค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนาชิ้นงาน โดยตั้งสมมุติฐานให้ค่าที่วัดได้จากหัวทดสอบเชิงพาณิชย์เป็นค่าอ้างอิง และทราบถึงคุณลักษณะของสัญญาณที่เกิดช่วงอับ (Dead zone) ผลการทดลองแสดงดังนี้



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบที่ 1 ในการวัดความหนาชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 การตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบที่ 2 ในการวัดความหนาชิ้นงาน

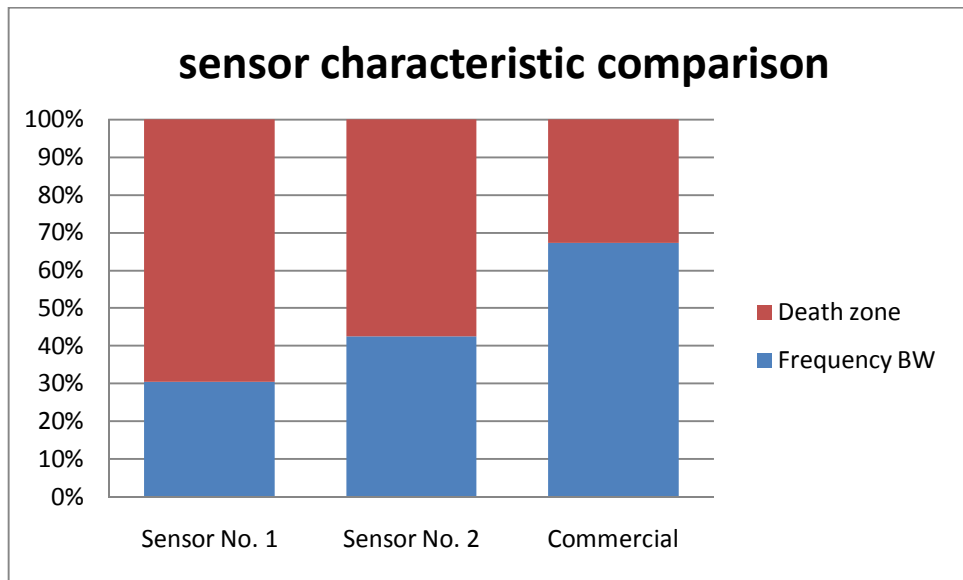


รูปที่ 4.7 การตอบสนองทางเวลาของหัวทดสอบเชิงพหุขั้วในการวัดความหนาชิ้นงาน

การทดลองวัดความหนาชิ้นงานเพื่อศึกษาความสามารถในการตอบสนองทางเวลาของหัวตรวจที่ประกอบขึ้น สามารถสรุปเป็นตารางได้ ดังตารางที่ 4.4 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของช่วงความถี่ในการตอบสนองของหัวทดสอบ กับเขตอับของหัวทดสอบ ได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นว่าช่วงความถี่เป็นปฏิภาคผกผันกับช่วงเขตอับ ซึ่งจะส่งผลอย่างมากในความสามารถต่อการแยกแยะสัญญาณ เนื่องจากการบ่งชี้ถึงอัตราการหน่วง หรือการดูดซับสัญญาณด้วย

ตารางที่ 4.4 สรุปความสามารถในการวัดความหนาขึ้นงานจากการตอบสนองทางเวลา

ปัจจัยที่ศึกษา หัวตรวจสอบ	เวลาการเดินทางของคลื่นเสียง ที่ขึ้นงานหนา 50 มิลลิเมตร(μS)	ค่าผิดพลาด	
		เวลา (μS)	เปอร์เซ็นต์ (%)
หัวทดสอบที่ 1	17.68	0.28	1.58
หัวทดสอบที่ 2	17.32	- 0.08	0.45
หัวทดสอบเชิงพาณิชย์	17.40	0	0

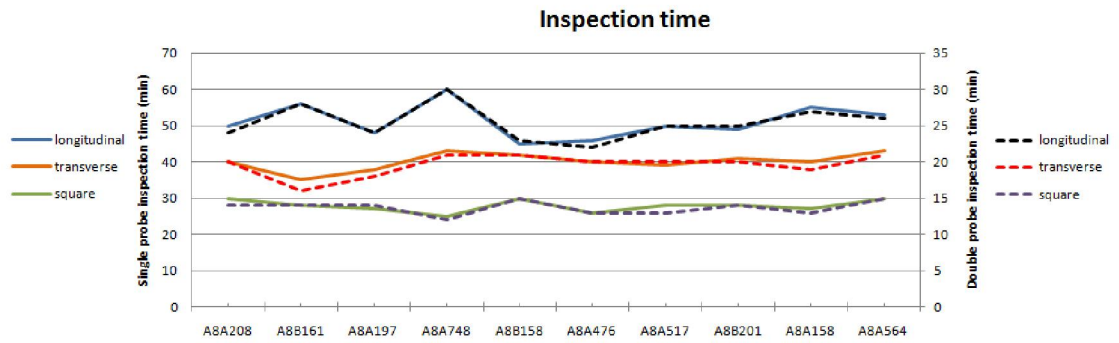


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบช่วงความถี่ เขตอับ และความไวของหัวตรวจสอบ

จากการสรุปความสามารถในการวัดความหนาขึ้นงานตามตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าหัวทดสอบที่ประกอบขึ้นมีความสามารถในการวัดความหนาขึ้นงานใกล้เคียงกับหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการพัฒนาหัวทดสอบ ให้มีความสามารถใช้งานเชิงพาณิชย์ได้ ทั้งนี้ยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่าหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ถึง 10 เท่า

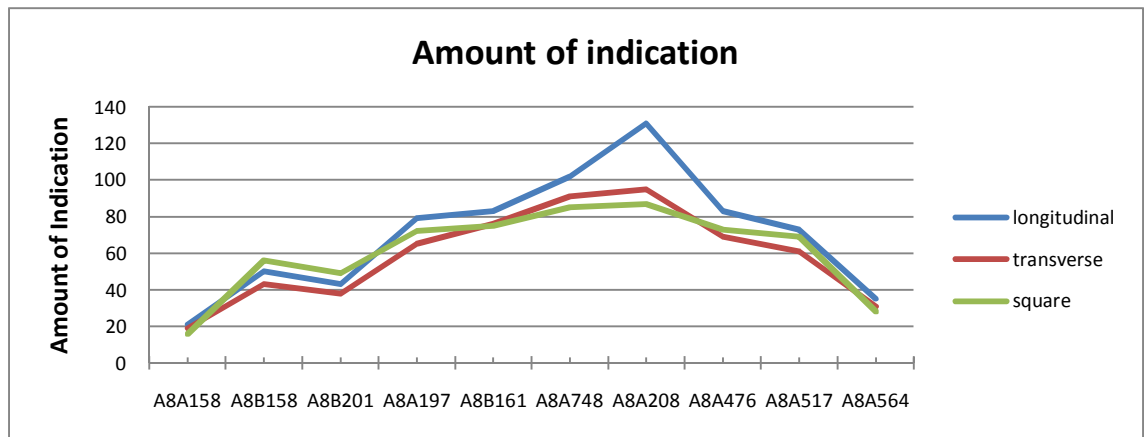
#### 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเวลาของระบบทดสอบโดยบุคลากร

ระยะเวลาในการทดสอบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยแกนซ้ายมือคือเวลาในการทดสอบของระบบทดสอบเดิม (หัวทดสอบเดี่ยว) แกนขวามือคือเวลาในการทดสอบของระบบทดสอบใหม่ (หัวทดสอบคู่) และแกนนอนคือประเภทต่างๆเหล็กกรัด ซึ่งให้ผลการทดสอบว่า สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งของการทดสอบ



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบเวลาในการทดสอบระหว่างระบบทดสอบเดิม และระบบที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่

นอกจากนี้ผลการทดลองยังให้ระยะเวลาในการทดสอบต่างกันทั้งสามรูปแบบ โดยเส้นตรวจสอบแนวยาว (Longitudinal) จะใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากที่สุด รองลงมาคือเส้นตรวจสอบแนวขวาง (Transverse) และเส้นตรวจสอบแนวตาราง (Square) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะระยะทางโดยรวมในการตรวจสอบที่ต่างกัน จึงได้ทำการวัดผลการทดสอบเชิงคุณภาพ โดยบันทึกผลเป็นจำนวนรอยตำหนิที่ตรวจพบในแต่ละการทดสอบตามเส้นตรวจสอบทั้ง 3 แบบ ดังรูปที่ 4.10

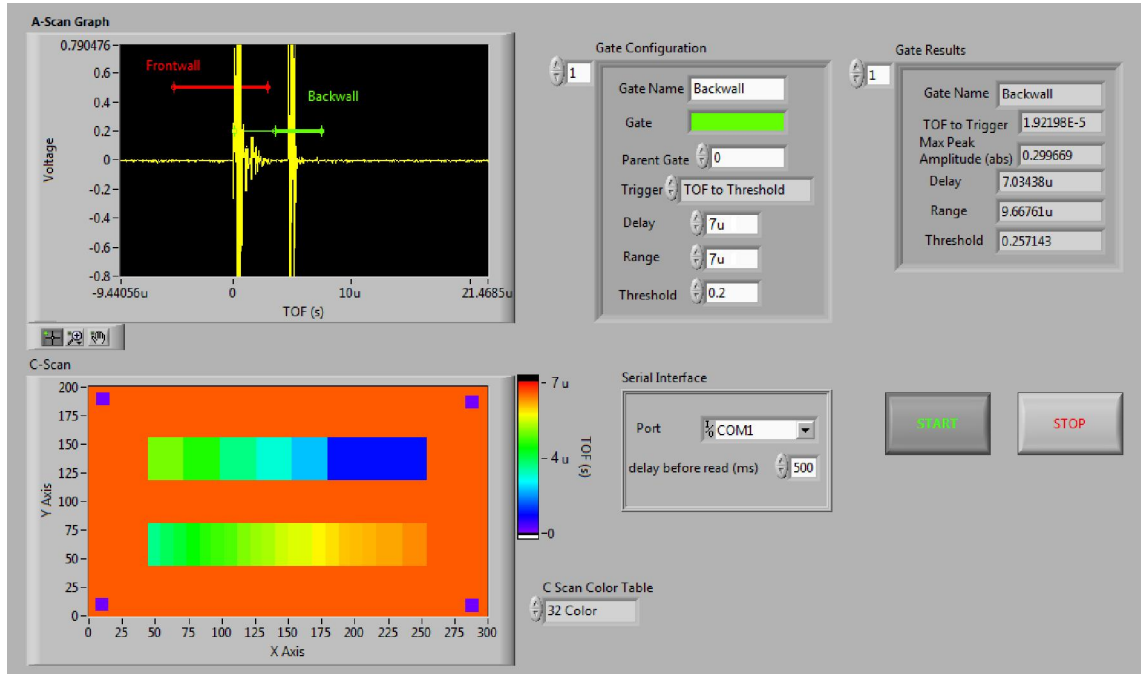


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจพบรอยตำหนิของแนวการตรวจสอบต่างๆ

จากผลที่แสดงการเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า การทดสอบตามเส้นตรวจสอบแนวยาวนั้นพบจำนวนตำหนิมากที่สุด แม้ว่าจะใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่มากที่สุดก็ตาม เพื่อความมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงควรเลือกที่จะทำการทดสอบตามเส้นตรวจสอบแนวยาว ตามมาตรฐาน ASTM A435

### 4.3 ผลการทดสอบระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกึ่งอัตโนมัติ

การทดสอบระบบต้นแบบนี้จะทำการทดสอบโดยตรวจสอบกับชิ้นงานทดสอบตัวอย่างเพื่อทำการแสดงสัญญาณ และตำแหน่งของรอยตำหนิที่สร้างขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ ในรูปแบบ A-Scan และ C-Scan เพื่อให้บุคลากรสามารถเข้าถึงผลการทดสอบได้ง่ายขึ้น ผ่านทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมแสดงผล และยังใช้เป็นหลักฐานในการทดสอบได้อีกด้วย



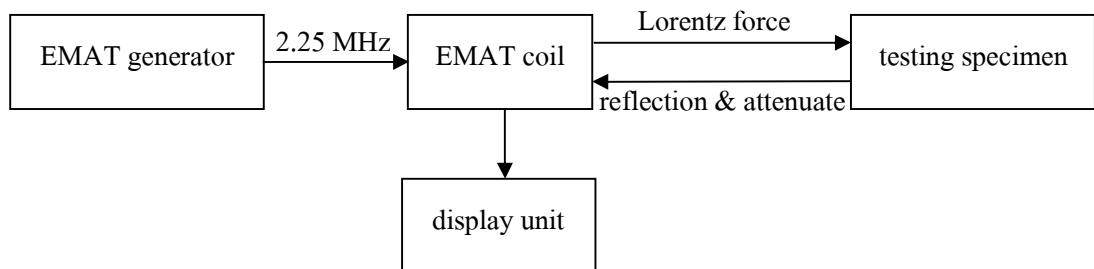
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นความลึกของรอยตำหนิที่แสดงเป็นจุดสี ซึ่งพบว่ารูสกรูขนาด 5 มิลลิเมตร บริเวณขอบของแผ่นชิ้นงานทดสอบตัวอย่างแสดงเป็นลักษณะเหลี่ยม ทั้งนี้เป็นเพราะรูมีขนาดเล็กกว่า หัวทดสอบมาก การแสดงผลจึงเป็นไปตามระยะการเคลื่อนที่ (10 มิลลิเมตร) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างต่อเนื่อง (ลาดเอียง) ในแถบด้านล่างก็เช่นเดียวกันจะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของจุดสีทุก 10 มิลลิเมตร

นอกจากนี้การที่สามารถปรับระดับ threshold สัญญาณสะท้อนจากพื้นหลังได้ ทำให้สามารถแยกแยะตำแหน่งความลึกของตำหนิได้ เมื่อทดสอบกับส่วนที่บางที่สุด (5 มิลลิเมตร) ของชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง ซึ่งปกติแล้วสัญญาณสะท้อนจากพื้นหลังจะถูกกลืนไปกับสัญญาณสะท้อนแรก

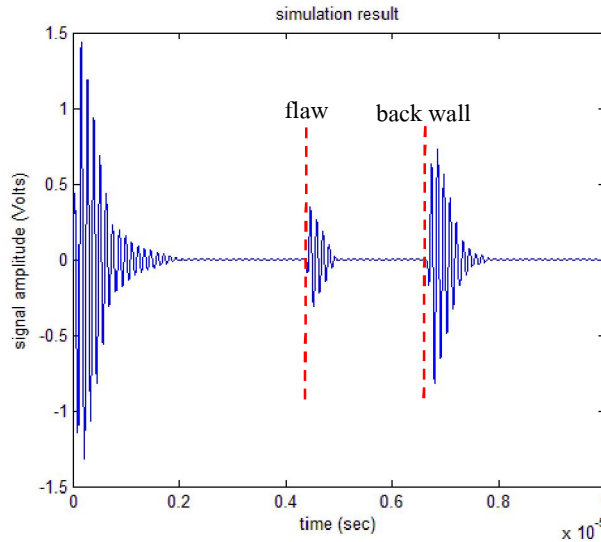
#### 4.4 ผลการประเมินความเป็นไปได้ต่อของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อความมั่นใจในการนำไปใช้งานได้ของหัวทดสอบ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบโดยการจำลองระบบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และค่าต่างๆที่ได้คำนวณขึ้นมา จะได้ระบบดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนผังการจำลองระบบของหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อให้สัญญาณมีคุณสมบัติในการแยกชัดที่เด่นชัด จึงได้กำหนดให้สัมประสิทธิ์การลดทอนมีค่าสูง (ในที่นี้คือผลจากความต้านทานของขดลวด และการสูญเสียของแรงจากเนื้อวัสดุ) โดยทำการจำลองถึงสัญญาณที่ได้จากการทดสอบแผ่นเหล็กความหนา 20 มิลลิเมตร และกำหนดตำแหน่งขนาดเล็กขึ้นที่ความหนา 13 มิลลิเมตร จะได้สัญญาณดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สัญญาณที่ได้จากการจำลองระบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 4.5 สรุป

ผลการพัฒนาระบบตรวจสอบโดยไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อน สรุปได้ดังนี้ คือ สามารถสร้างหัวทดสอบที่มีความไวในการทดสอบสูงและต้นทุนต่ำขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาทั้งในแง่ของต้นทุน ในส่วนของการพัฒนาระบบทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง โดยบุคลากรด้วยการออกแบบระบบจับยึดที่สามารถตรวจสอบได้พร้อมกัน 2 หัวทดสอบ เป็นการพัฒนาทั้งในแง่ของระยะเวลาในการทดสอบ การพัฒนาต้นแบบระบบกึ่งอัตโนมัติ เป็นการพัฒนาทั้งในแง่ของระยะเวลาและความน่าเชื่อถือ และหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อจะพัฒนาต่อไปเป็นระบบอัตโนมัติแบบติดตั้งในสายการผลิตได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัย การพัฒนาระบบตรวจสอบโดยไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนได้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการทดสอบทั้งในเชิงของเวลาและคุณภาพ โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนได้แก่ พัฒนาหัวทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง, พัฒนาระบบทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงโดยบุคลากร, ระบบต้นแบบการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในระบบกึ่งอัตโนมัติ และการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัย การพัฒนาระบบตรวจสอบโดยไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนสามารถสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 จากการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของสัญญาณด้านความถี่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกก่อนใส่วัสดุรองหลังให้ย่านความถี่ที่ 2,112,500 Hz และเมื่อใส่วัสดุรองหลังผงทังสเตนผสมอีพอกซี (ความต้านทานทางเสียง  $14.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) ให้ย่านความถี่ที่ 2,037,500 Hz โดยมีแอมพลิจูด 158.53 mVrms และเมื่อใส่วัสดุรองหลังผงบรอนซ์ผสมอีพอกซี (ความต้านทานทางเสียง  $7.2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) ให้ย่านความถี่ที่ 1,875,000 Hz โดยมีแอมพลิจูด 156.21 mVrms

5.1.2 จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวทดสอบที่สร้างขึ้นด้านความถี่ หัวทดสอบที่ 1 มีช่วงกว้างความถี่ประมาณ 0.2 MHz และหัวทดสอบที่ 2 มีช่วงกว้างความถี่ประมาณ 0.3 MHz ซึ่งมีช่วงกว้างความถี่แคบกว่าหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ และมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าด้วย ดังนั้นจึงทำให้หัวทดสอบที่สร้างขึ้นมีความไวในการตรวจสอบสูงกว่าหัวทดสอบเชิงพาณิชย์

5.1.3 จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวทดสอบที่สร้างขึ้นด้านเวลา โดยการวัดความหนาชิ้นงานเทียบกับหัวทดสอบเชิงพาณิชย์ หัวทดสอบที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก โดยหัวทดสอบที่ 1 มีความคลาดเคลื่อน 1.58% และหัวทดสอบที่ 2 มีความคลาดเคลื่อน 0.45%

5.1.4 จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเวลาของระบบทดสอบโดยบุคลากร พบว่ารูปแบบการทดสอบโดยเส้นตรวจสอบแนวยาว (Longitudinal) จะใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากที่สุด รองลงมาคือเส้นตรวจสอบแนวขวาง (Transverse) และเส้นตรวจสอบแนวตาราง (Square) ตามลำดับ แต่การทดสอบโดยเส้นตรวจสอบแนวยาวก็จะพบจำนวนตำหนิสูงสุดด้วย ดังนั้นจึงถือว่าเป็นรูปแบบที่มีคุณภาพสูงสุด

5.1.5 จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบจับยึดที่ได้ทำการออกแบบขึ้น พบว่าระบบจับยึดแบบหัวทดสอบคู่ที่ใช้วัสดุอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ นอกจากมีน้ำหนักที่เบากว่า และสามารถลดอิทธิพลของเขตอับแล้ว ยังสามารถลดระยะเวลาในการทดสอบได้ประมาณครึ่งหนึ่ง ทั้งนี้จะลดระยะเวลาที่ต้องเดินแนวการทดสอบลงได้ด้วย

5.1.6 จากผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบตัวอย่างพบว่า ความละเอียดของการแสดงผลจะเพิ่มขึ้นจากระยะอ่านค่าที่ถี่ขึ้นด้วย แต่ก็จะทำให้ระยะเวลาในการทดสอบมากขึ้นด้วย ซึ่งการตัดสินใจยอมรับเหล็กรีดร้อนจะต้องมีขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่องที่ใหญ่กว่าวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว (75 มม.) หรือครึ่งหนึ่งของความหนาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นระยะอ่านค่าจึงไม่ควรมากกว่า 1.5 นิ้ว (32.5 มม.) หรือหนึ่งในสี่ของความหนาผลิตภัณฑ์

5.1.7 จากการออกแบบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าหัวทดสอบที่ออกแบบขึ้นมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างและพัฒนาเพื่อนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมเหล็กรีดในสภาพการทดสอบเหล็กแผ่นหนาได้ถึง 60 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อได้เปรียบต่างๆหลายประการ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าควรจะมีการพัฒนาระบบตรวจสอบโดยไม่ทำลายสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กรีดร้อนเพิ่มเติมในประเด็นต่อไปนี้

5.2.1 ควรพัฒนาหัวทดสอบให้มีความสามารถในการผลิตแบบอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลาย และลดต้นทุนการใช้อุปกรณ์ทดสอบโดยไม่ทำลายจากต่างประเทศ

5.2.2 มาตรฐานในการตรวจสอบด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นมีหลายมาตรฐาน ทั้งนี้มาตรฐาน EN 10160 เป็นมาตรฐานหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่น แต่จะแตกต่างกันบ้างในส่วนทางด้านเทคนิค, วิธีการเดิน, เกณฑ์การยอมรับ ซึ่งจะเป็นตัวเลือกที่ดีในการพัฒนาระบบต่อไปให้ครอบคลุม

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงวิชาการยศาสตร์ เพื่อให้ออกแบบรถเข็นให้บุคลากรผู้ทดสอบสามารถทำงานได้สะดวกขึ้น และเพิ่มเติมให้ตรวจสอบพร้อมกันได้หลายหัวทดสอบมากขึ้น โดยน้ำหนักไม่มากเกินไป

5.2.4 ควรศึกษาถึงขีดจำกัดต่างๆของอุณหพลศาสตร์ ที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและระบบควบคุมก่อนจะติดตั้งระบบทดสอบโดยไม่ทำลายแบบอัตโนมัติในสายการผลิต ทั้งนี้อาจใช้ระบบจำลองของสายการผลิตแทนส่วนเคลื่อนที่ของระบบทดสอบโดยไม่ทำลายเพื่อลดต้นทุน และน้ำหนักของโครงสร้าง

5.2.5 ควรพัฒนาและทดสอบหัวทดสอบคลื่นเสียงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ทดแทนหัวทดสอบแบบผลึกเพียโซอิเล็กทริกอย่างจริงจัง เพื่อให้สามารถนำไปสู่การทดสอบในขณะที่เหล็กมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 100°C ได้ รวมถึงวัดความหนาของแผ่นเหล็กในระหว่างรีดได้อีกด้วย

5.2.6 การทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงนี้ไม่เหมาะสมกับการตรวจผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นที่มีขนาดความหนาดำกว่า 8 มิลลิเมตร ทั้งนี้ควรเลือกใช้วิธีการวัดสนามแม่เหล็กรั่วไหล หรือ Magnetic Flux Leakage (MFL) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในการหารอยตำหนิขนาดเล็กที่เปิดสู่วิวได้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

1. Iron and Steel Institute of Thailand, 2010, **Steel Fact: Thailand Steel Industry** [Online], Available: <http://www.isit.or.th> [2010, March 10].
2. **ASTM (American Society for Testing and Materials) Volume 1.04 ,2007**, A435 pp. 253-254
3. Insight NDT, 2007, **STEEL PLATE ULTRASONIC INSPECTION TROLLEY** [Online], Available: <http://www.insightndt.com/ultrasonic/steelplate.html> [2010, March 10].
4. Sutekiyo, U., 1971, **Method for Continuous Supersonic Inspection of Hot Steel Plates**, Japan, Ser.No. 870,374.
5. Voestalpine, 2003, **Automatic ultrasonic testing** [Online], Available: [http://www.voestalpine.com/grobblech/de/site/downloads/Anlagenprospekte.ContentPar.22504.File.tmp/Ultraschallanlage\\_E\\_06112008.pdf](http://www.voestalpine.com/grobblech/de/site/downloads/Anlagenprospekte.ContentPar.22504.File.tmp/Ultraschallanlage_E_06112008.pdf) [2010, March 10].
6. Martin, K., et al., 2008, “Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification”, **Journal of Nondestructive Evaluation**, Vol. 27, pp. 67-82.
7. Elbern, A.W. and Guimares, L., 2000, “Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restauration”, **Nondestructive Testing & Ultrasonics**, Vol. 5, No. 8.
8. Robert, S. and Prada, C., 2009, “Ultrasonic Flaw Detection using the 1-bit DORT Method” **Annual Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, Vol. 1096, pp. 97-104.
9. Michael EGE and Jürgen SCHRÖDER, 2006, **Ultrasonic Testing of Hot Plates Using EMAT Technology** [Online], Available: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.4.8.2.pdf> [2010, December 7].

10. อาษา ประทีปเสน, 2551, การทดสอบโดยไม่ทำลายในงานเชื่อมและงานวิจัย, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 163 – 210.
11. Pemov, I. F. and Nosochenko, O. V., 2003, “IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES OF ROLLED PLATES AND SLABS IN THE THICKNESS DIRECTION”, **Metallurgist**, Vol. 47, pp. 460-464.
12. Wikipedia, 2010, **EMAT** [Online], Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/EMAT> [2010, December 7].
13. Jeff, A., et al., 2002, “Development of an EMAT In-Line Inspection System For Detection, Discrimination, and Grading of Stress Corrosion Cracking In Pipelines”, In **Final Report (Phase I)**, Daniel, D. (Ed.), Houston, United States of America, pp. 6-9.
14. Werner Günther and Ulrich Sauer, 1996, **Ultrasonic Probe Suitable for Acoustic Coupling Via a Water Channel**, Germany, Patent. No. 5, pp. 493,912.
15. ไหม น้อยพิทักษ์, พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล และอาษา ประทีปเสน, 2550, “การออกแบบและพัฒนาหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับวัดความเค้นตกค้าง”, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2550, เลขที่ 0153.
16. Olympus, 2006, **Ultrasonic Transducers Technical Notes** [Online], Available: <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf> [2010, January 18].

**ภาคผนวก ก**

ตารางผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

ตารางที่ ก.1 ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตรวจสอบแนวยาว

ID Slab	Dimension	Total of length (meter)	Operating Time (Min)	
			Single probe	Double probe
A8A208	250 x 1550 x 8400	173	50	24
A8B161	251 x 1550 x 8400	173	56	28
A8A197	252 x 1550 x 8400	173	48	24
A8A748	253 x 1550 x 8400	173	60	30
A8B158	254 x 1550 x 8400	173	45	23
A8A476	255 x 1550 x 8400	173	46	22
A8A517	256 x 1550 x 8400	173	50	25
A8B201	257 x 1550 x 8400	173	49	25
A8A158	258 x 1550 x 8400	173	55	27
A8A564	259 x 1550 x 8400	173	53	26
Average Time :			51.2 Min	25.4 Min

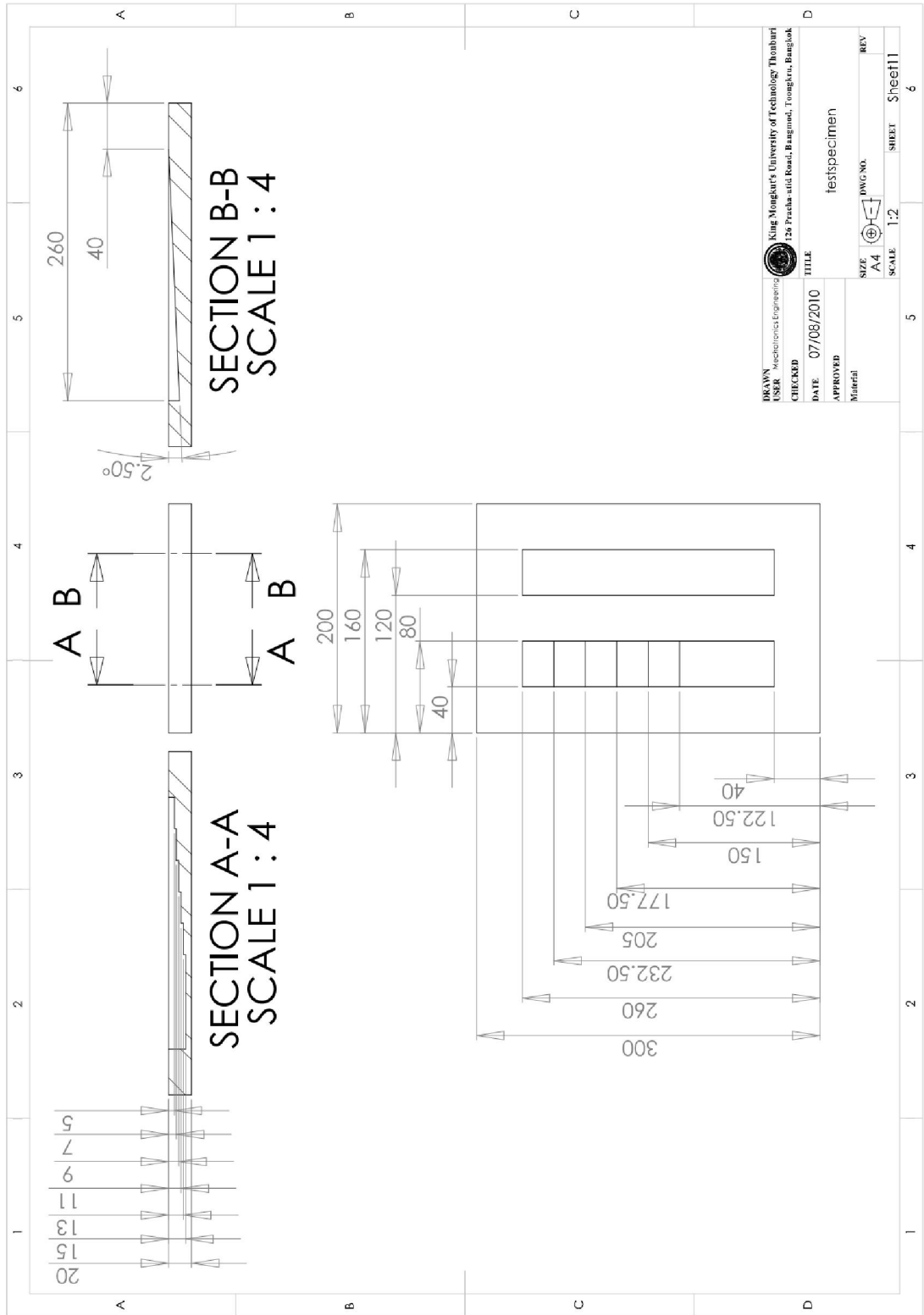
ตารางที่ ก.2 ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตรวจสอบแนวขวาง

ID Slab	Dimension	Total of length (meter)	Operating Time (Min)	
			Single probe	Double probe
A8A208	250 x 1550 x 8400	130	40	20
A8B161	251 x 1550 x 8400	130	35	16
A8A197	252 x 1550 x 8400	130	38	18
A8A748	253 x 1550 x 8400	130	43	21
A8B158	254 x 1550 x 8400	130	42	21
A8A476	255 x 1550 x 8400	130	40	20
A8A517	256 x 1550 x 8400	130	39	20
A8B201	257 x 1550 x 8400	130	41	20
A8A158	258 x 1550 x 8400	130	40	19
A8A564	259 x 1550 x 8400	130	43	21
Average Time :			40.1 Min	19.6 Min

ตารางที่ ก.3 ระยะเวลาในการทดสอบเมื่อใช้เส้นตรวจสอบแนวตาราง

ID Slab	Dimension	Total of length (meter)	Operating Time (Min)	
			Single probe	Double probe
A8A208	250 x 1550 x 8400	114	30	14
A8B161	251 x 1550 x 8400	114	28	14
A8A197	252 x 1550 x 8400	114	27	14
A8A748	253 x 1550 x 8400	114	25	12
A8B158	254 x 1550 x 8400	114	30	15
A8A476	255 x 1550 x 8400	114	26	13
A8A517	256 x 1550 x 8400	114	28	13
A8B201	257 x 1550 x 8400	114	28	14
A8A158	258 x 1550 x 8400	114	27	13
A8A564	259 x 1550 x 8400	114	30	15
Average Time :			28 Min	13.7 Min

**ภาคผนวก ข**  
**แบบชี้แจงงานทดสอบตัวอย่างสำหรับเครื่องต้นแบบ**



**ภาคผนวก ค**

การเสนอผลงานวิจัยการประชุมทางวิชาการ Electrical Engineering/Electronics Computer

Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) 2010

19 – 21 พฤษภาคม 2553

ณ โรงแรม ดิ เอ็มเพรส

จ.เชียงใหม่

# Ultrasonic Inspection System for Detecting Small Flaws at Far Surface of Steel Plate

T. Vilasmongkolchai\*, M. Noipitak\*\*, P. Kaewtrakulpong\*, A. Prateepasen\*\*

\*Department of Control System and Instrumentation Engineering

\*\*Department of Production Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thungkru, Bangkok 10140

**Abstract-** This paper presents the development of inspection system using ultrasonic for steel plate manufacturing. Generally, internal defects in the final product of steel plate are inspected manually by human operators, which is a time consuming process. In this research, the crystal of an ultrasonic probe at natural frequency suitable for steel plate examination was developed. In our design, high sensitivity (i.e. high signal peak amplitude) and good resolution were achieved using a (water coupling) probe structure, without ceramic wear plate, and a signal processing called the 1-bit technique. Backing material of the probe was carefully designed and experimented to obtain proper impedance matching with the probe's crystal by varying its material composition. Jig with a dual-probe support to speed up the inspection of a steel plate was implemented. Moreover, the 1-bit technique was applied to improve resolution of the inspection and to detect small flaws close to the far surface of the steel plate. The developed probe has more sensitivity than that of commercial probes in terms of frequency response. The 1-bit processing technique has been realized and simulated and it showed advantages over the conventional method for processing time and accuracy.

**Keywords-** Non-destructive testing, Ultrasonic inspection, steel plate, Ultrasonic probe.

## I. INTRODUCTION

Ultrasonic inspection is normally used in quality control of steel plate products [1, 2]. However, cost of the ultrasonic testing device is usually high and makes the inspection and product expense arise accordingly. As a result, a low-cost ultrasonic probe with high sensitivity and good resolution is designed and developed in this work. The improvement of probe resolution can be achieved by considering impedance matches between piezoelectric (PZT) and backing material within the probe. Unfortunately when the probe resolution increases, its sensitivity is greatly decreased [3]. In order to deal with this problem, a proper acoustic impedance of the backing material was selected along with a proper signal processing in this research.

The steel plate inspection in most manufacturers is usually carried out manually by human operators which is a very time consuming process. Inspection time can be reduced by applying more than one probe simultaneously. In this research a jig, holding two probes together, and clamped on a push cart was designed.

Besides the detection of small flaws closed to the far surface of the steel plate is another challenging problem in non-destructive testing by ultrasonic straight-beam pulse-echo method. Because the strong echo from the far surface always

hides information obtained from reflection of the small flaw, the signal interpretation becomes more difficult. Although the signal could be improved by an amplifier circuit for its apparent amplitude, noise embedded in the signal is also amplified. A signal filter can be employed to attenuate unwanted frequency components; however, low resolution and dislocation of the flaw signal may incur.

This research aims to develop an efficient low-cost ultrasonic system capable for detecting small flaws close to the far surface of a steel plate. To achieve this, a probe with high sensitivity has been constructed. A jig capable of holding double probes for simultaneously scanning and a 1-bit signal processing technique are implemented to reduce the inspection time and to identify the signal from small flaws closed to the plate far surface.

## II. APPROACH & EXPERIMENT PROCEDURE

This development is comprised of two main works. First is the construction of a high-sensitivity ultrasonic probe. The other is the inspection system developed for not only the inspection speed but also for flaw detection accuracy. Fig. 1 shows an overall structure of the system.

### A. Background of Ultrasonic Scanning Display

A-scan is a waveform display representing echo amplitude (vertical axis) and transit time (horizontal axis) to give the information in form of one dimensional signal along the scanning path. Figs 2 and 6 are examples of a result from the A-scan display of UT monitor. Amplitude of the reflected signal represents the size of the reflector whereas the horizontal axis features the time of reflection, in other words, the location of the reflector. In general, signal quality of an ultrasonic probe is explained by its sensitivity and resolution. In the frequency domain, higher amplitude means better sensitivity and wider response bandwidth represents superior resolution. In Fig 2, an initial pulse (IP) is the signal reflected on the near surface of the specimen, Flaw indicates the signal reflected from an internal defect, and back wall echo (BE) represents the signal reflected from the far surface of the specimen. The left figure exhibits better resolution than the right, because the two signals were clearly separated. On the contrary, the right figure shows more sensitivity due to its higher amplitude.

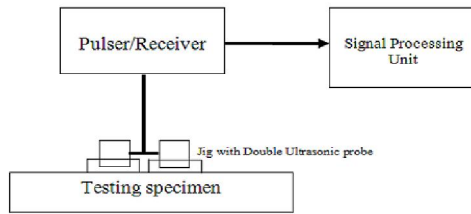


Figure 1. Overall structure of the system for steel plate inspection.

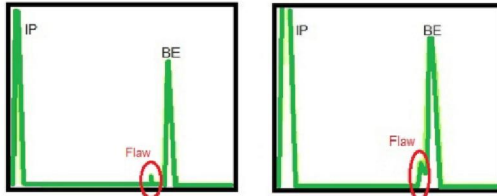


Figure 2. Comparison of A-scan sensitivity and resolution characteristic of different ultrasonic probes: the left shows the more resolution, and the right shows the more sensitivity.

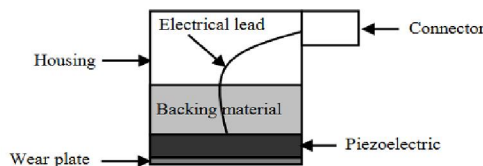


Figure 3. Components of ultrasonic probe.

### B. Ultrasonic Probe

The component of ultrasonic probe is shown in Fig. 3. PZT (made from Lead Zirconate Titanate) is the main part of an ultrasonic probe that transmits/receives ultrasonic waves and performs conversion between mechanical and electrical signals. The signals can be explained by [5]

$$f_s = v/2t \quad (1)$$

$$B \cong cf_s \quad (2)$$

where  $f_s$  is the natural frequency,  $v$  the sound velocity within the PZT,  $t$  the thickness of the PZT,  $B$  the bandwidth, and  $c$  the electromechanical coupling factor.

For the probe component, backing material is the second priority (to the PZT) because it can improve quality of the reflected signal by attenuating other frequencies that could be caused by noise and absorbing reflected ultrasonic energy from the back of the PZT. Moreover, it can help to adjust system frequency by [6] the following relation.

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

where  $\omega_0$  is the system frequency,  $k$  the stiffness, and  $m$  the mass of the backing material.

The backing material is usually made of material with high density and high damp to obtain a good resolution (wide bandwidth); however, it suffers a low sensitivity. To obtain a high sensitivity while retain its resolution, an impedance matching between the PZT and the backing material is required. The impedance of backing material depends on its longitudinal sound velocity ( $V_L$ ) and its density ( $\rho$ ) [5].

$$V_L = \sqrt{E(1-\mu)/\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (4)$$

$$Z = \rho\sqrt{E(1-\mu)/\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (5)$$

In these equations,  $E$  and  $\mu$  are the Modulus of elasticity and the Poisson's ratio of the material, respectively.

Wear plate is the component for preventing wearing of PZT but unfortunately also attenuating the ultrasonic transmission. Theoretically, the wear plate thickness must be a quarter of the ultrasonic wavelength to have no effect with attenuation [7].

In this research, according to the ASTM standard [1, 2], PZT for rolled steel inspection should have its natural frequency of 2.25MHz. The backing material was prepared by metal powder and epoxy. The metal powder has a characteristic to increase its acoustic impedance while the epoxy was employed to increase an ultrasonic absorbing rate. Compositions of Bronze powder with epoxy and tungsten powder with epoxy were carried out in various ratios to change the acoustic impedance and to obtain a probe with highest sensitivity.

Subsequently, the optimal composition underwent pressed forming and its longitudinal ultrasonic velocity was measured by a sound transmission technique with Pulser/Receiver (Panametrics-NDT Model 5077PR Square wave) and Oscilloscope (Agilent 54624A) as shown in Fig. 4.

After the backing material was assembled to the PZT. The probe was tested to investigate its frequency response and compared with the commercial probe by a spectrum analyzer. Fig. 5 shows a setup of the frequency response testing. The amplitude of the signal in each activated frequency was acquired and recorded to form its power spectrum.

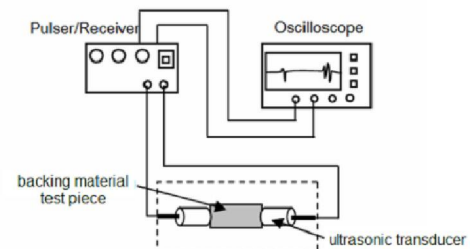


Figure 4. Setup of sound transmission technique for backing material acoustic impedance determination

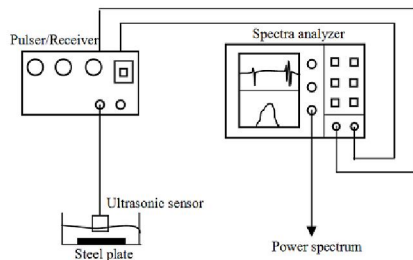


Figure 5. Setup of frequency response testing of our ultrasonic probe.

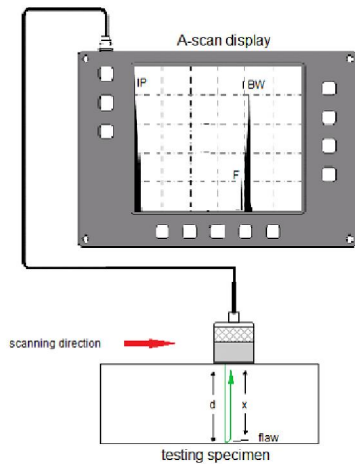


Figure 6. A-scan display of ultrasonic flaw detection in case of a flaw close to bottom surface.

### C. Hot rolled steel inspection

There are three alternative grid scanning lines of ultrasonic probe in hot rolled steel [1, 2]. First is a continuous scan along perpendicular grid lines of 9 inches (nominal). Second is a continuous scan along parallel paths, transverse to the major plate axis, of 4 inches. The last is a continuous scan along parallel paths, parallel to the major plate axis, of 3 inches. While a grid scanning is performed, a complete loss of back wall echo indicates a candidate for flaw location. The location is then undergone detailed examination which can identify the existence and size of the flaw. After that the size of the defect is used to make decision under acceptance criteria.

### D. Signal processing technique

As shown in Fig. 6,  $d$  is the thickness of the specimen and  $x$  is the depth of a flaw, when the flaw is located close to the far surface ( $d \approx x$ ), the times of flight of the flaw and the far surface (plate bottom) are close so the reflected signal of flaw (F) may be confused with the reflected far surface or back wall echo (BW) in the A-scan display. In case of small flaw closed to far surface, the time of flight of flaw reflected signal can

coincide with the back wall echo. The strong echo can hide the small signal of the flaw and can make misdetection. With this reason, a new signal processing technique was introduced in [8]. However, this technique is complex and requires a long processing time. Consequently the 1-bit processing technique [9] was selected in our work. In the normal A-scan, the signal is acquired in form of 8-bit data but it can not identify the reflected signal of small flaw close to the back wall echo. The concept of the 1-bit technique is the signal processing in time domain without amplitude information (only binary values considered). This can be performed by rectifying and thresholding the signal to obtain a 1-bit output as shown by the diagram in Fig. 7. This makes the strong echo from back wall unaffected with the flaw signal; moreover, it does not have dislocation. In addition, the smaller size of collected data will take less memory capacity and make this processing technique performs faster.



Figure 7. The diagram of 1-bit algorithm realizing simulation procedure.

This processing technique can be realized by simulation. The reflected signal with amplitude  $A$  can be modeled by the attenuation equation [10].

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

where  $A_0$  is the incident amplitude,  $\alpha$  the attenuation coefficient, and  $x$  the distance of diffraction.

Therefore the reflected signal ( $s$ ) acquired from the PZT can be described by

$$s = A e^{-\alpha'(v)} \cos(\omega t) \quad (7)$$

where  $\alpha'$  is the attenuation in the backing material,  $v$  the ultrasonic velocity in backing material, and  $\omega$  the natural frequency of the PZT.

The reflected signals will be combined with a background noise, and then processed by the 1-bit technique.

## III. RESULT AND DISCUSSION

### A. probe construction

The natural frequencies of the probes developed with backing material of bronze powder plus epoxy, and with tungsten powder plus epoxy are 1,875,000 Hz and 2,037,500 Hz respectively. Their amplitudes are at 100.13 mVrms and 150.96 mVrms, accordingly. The commercial probe (2MHz fundamental frequency) is responded at 1,575,000 Hz with amplitude of 8.3091 mVrms.

As shown in Fig. 8, the frequency response of the probe developed with backing material of tungsten powder and epoxy has a very high sensitivity compared with the commercial probe. This is significantly due to the lack of wear plate in our design. Not only in higher sensitivity, our developed probe had cost about 10 times cheaper than the other commercials.

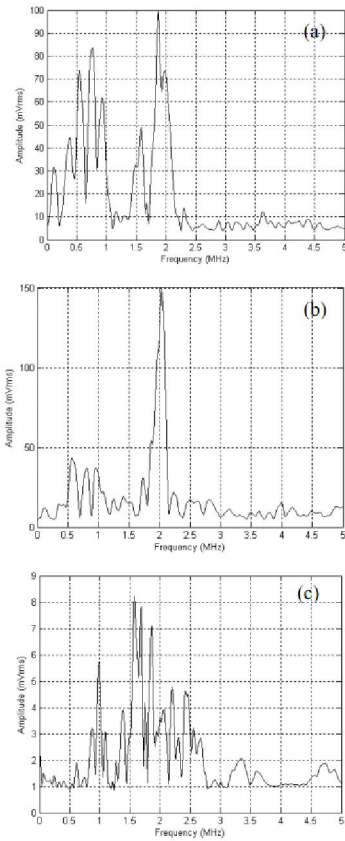


Figure 8. The frequency responses of probes developed with backing material of bronze powder and epoxy (a), with backing material of tungsten powder and epoxy (b), and that of 2 MHz commercial probe (c).

### B. Inspection Result in hot rolled steel

In this research, the designed jig which could hold two probes was implemented and shown in Fig 9. Water was used as couplant; in the other word, an immersion technique was applied. The jig was clamped on a cart to facilitate the scanning. It was found that the scanning time was reduced to approximately half of the conventional. However, ultrasonic testing operator had to observe the flaw from a two-channel display. Signal obtained from a small discontinuity, especially close to the far surface, was rather difficult to be perceived. In order to solve this problem, 1-bit signal processing was introduced.



Figure 9. Designed jig with a dual probe support.

The advantage of the designed jig is not only the scanning by two probes at the same time but also an easy adjustment of the height of water column. Normally the defect close to the near surface to approximately 3 mm. can not be inspected because of interference from reflected initial pulse. This is called a *dead zone*.

### C. simulation result of 1-bit signal processing

The conventional processing or A-scan using 8-bit analog to digital converter for digitalized the RMS value of signal always lag of time cause of the RMS calculation. But, the 1-bit processing technique does not cause the delay of the processing signal, so this technique can process without another correction algorithm for compensating the flaw dislocation. Besides, all acquired signals exhibit the same amplitude (binary logic) making the identification of small flaws easier. However the approach is susceptible to noise. To solve the background noise problem, an adjustable threshold level mechanism was employed. Fig. 10 shows the simulation result for three different signals: A-scan, reflected signal, and 1-bit processed signal, separately on the left and a close-up to the flaw location of the three signals in the same time window.

To get more advantages in approximating type and size of the flaw, a combination with the conventional 8-bit processing technique can also be applied.

## IV. CONCLUSIONS

Development of an ultrasonic probe and its inspection system were presented for steel-plate inspection applications. This research can be concluded as follow.

- 1.) A lower cost ultrasonic probe with higher sensitivity than general commercial probes was implemented.
- 2.) A jig with a dual-probe support was developed. It reduced inspection time to examine hot rolled steel product to approximately half of the original.
- 3.) The 1-bit signal processing technique capable of detecting flaws close to the far surface was presented. This technique is simple, efficient and can increase inspection resolution, specially for the defect close to the far surface.

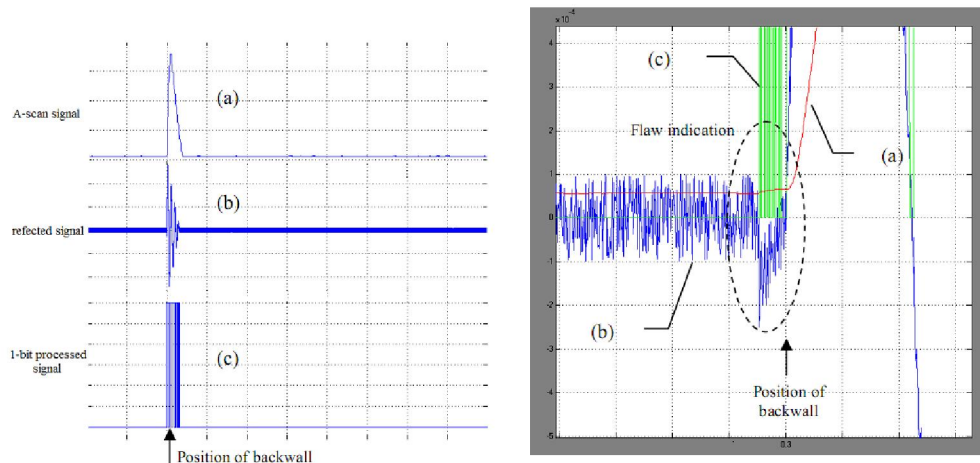


Figure 10. The time domain simulation of three different signals: A-scan, natural reflected signal, and 1-bit processed signal, and close up to flaw signal of the three signals which are combined in the same window (right).

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the financial support from the Thailand Research Fund through Master Research Grant (MRG-W1525E088) of T. Vilasmongkolchai, and the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0014/2551) of M. Noipitak, and grateful thanks to LPN Plate Mill Co, Ltd, and the researchers from ANDT for their assistance.

#### REFERENCES

- [1] ASTM international, "Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates," ASTM A435, March 1, 2007.
- [2] ASTM international, "Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications," ASTM A578, November 1, 2007.
- [3] Olympus NDT, "Ultrasonic Transducer Technical Notes," 2006. [online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>. [Accessed: Jan, 10 2010].
- [4] G. Liao and J. Xi, "Intelligent Embedded portable of Ultrasonic Testing Device," International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA), vol. 03, May 2009.
- [5] Peter J. Shull. Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications, Pennsylvania, USA., 2002.
- [6] C. Jomdecha and A. Prateepasen, "A Resonance Acoustic Emission Sensor using Single Piezoelectric Ceramic (Characteristic and Performances)," KMUTT Research and Development Journal, vol. 29, No.4, pp. 483-498, October-December 2006.
- [7] J. Merhaut, Theory of Electroacoustic, USA., McGraw-Hill, 1981.
- [8] N. Ruiz-Reyes, P. Vera-Candeas, J. Curpian-Alonso, J.C.Cuevas-Martinez, and J.L.Blanco-Claraco, "High-resolution pursuit for detecting flaw echoes close to the material surface in ultrasonic NDT," NDT&E international, vol. 39, pp. 487-492, April 2006.
- [9] S. Robert and C. Prada, "Ultrasonic Flaw Detection using the 1-bit DORT Method" Annual Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 1096, pp. 97-104, 2009.
- [10] Baldev Raj, V. Rajendran, and P. Palanichamy, Science and Technology of Ultrasonics, Pangbourne U.K. Alpha Science International Ltd., 2004 pp.30-32.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายธนศ วิชาสมงคลชัย
วัน เดือน ปีเกิด	6 มกราคม 2530
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2551
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2553
ทุนวิจัย	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีการศึกษา 2552-2553
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Vilasmongkolchai, T., Noipitak, M., Kaewtrakulpong, P. and Prateepasen, A., 2010, "Ultrasonic Inspection System for Detecting Small Flaws at Far Surface of Steel Plate", <b>Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International</b> , 2010, May 20, Chiangmai, pp. 168 – 172.