การประเมินค่าความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด304 โดยใช้กระแสไหลวน

นายรัฐพงศ์ สังวรวิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การประเมินค่าความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304
โดยใช้กระแสไหลวน

นายรัฐพงศ์ สังวรวิตร วท.บ. (เทคโนโลยีการผลิต)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(รศ. ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร.วันจักรี เล่นวารี)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)
(ผศ. ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 โดยใช้กระแสไหลวน
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายรัฐพงศ์ สังวรวิตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.วันจักรี เล่นวารี
	ผศ. ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	มาตรวิทยาทางอุตสาหรรม
ภาควิชา	วิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้กระแสไหลวนประเมินค่าความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค เกรด 304 (SS 304) โดยอาศัยหลักการ คือเมื่อความเค้นตกค้างเกิดขึ้นภายใน (Internal Stress) เนื้อวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพเดิมซึ่งมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. หนา 12 มม การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัจจัยกำหนดสำหรับการสร้างความเค้นตกค้างด้วยกระบวนการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding-RSW) กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 12, 14, และ 16 kA เพื่อทำเป็นชิ้นทดสอบในการศึกษาระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวน และทำการตรวจสอบด้วยเทคนิควิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) เพื่อยืนยันชิ้นทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นมีระดับค่าความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบแตกต่างกัน เทคนิคการวัดด้วยกระแสไหลวนปรับตั้งค่าความถี่กระทำการที่ช่วง 0.1-3 MHz และใช้หัวตรวจสอบ Pin-point เป็นเครื่องมือวัดชิ้นทดสอบ การประเมินและวิเคราะห์ความสามารถระบบการวัด (MSA) จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการวัดค่าความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดแสดงให้เห็นว่าความถี่ 1 MHz มีประสิทธิภาพมากที่สุด มีค่า GR&R 172.86 MPa โดยที่ % GR&R มีค่าอยู่ที่ 16.61479 และ ndc ที่ 8 ค่า ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty) แบบ U_{ISO} เท่ากับ ± 58 MPa ที่ความเชื่อมั่น95 %

คำสำคัญ: การวัดความเค้นตกค้าง/ ความไม่แน่นอนในการวัด/ กระแสไหลวน / เหล็กกล้าไร้สนิม / การวิเคราะห์ระบบการวัด/ เทคนิคการเลี้ยวเบน

Thesis Title	Eddy Current measurement for Residual Stress Estimation in Stainless Steel Grade 304
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Rattapong Sungworavit
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Wanchak Lenwari
	Asst. Prof. Dr. Isaratat Pueng-On
Program	Master of Engineering
Field of Study	Industrial Metrology
Department	Control System and Instrumentation Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

This study was to propose the application of eddy current technique to measure residual stress in specimens of stainless steel grade 304 (SS 304) based on principle of internal stress changing the physical properties . Residual stress changes the original physical material properties affecting its conductivity. The cylindrical specimens with 50 mm in diameter and 12 mm thickness were prepared to generate residual stress by Resistance Spot Welding technique (RSW) at which the welding current was set at 12, 14, and 16 kA. They were used as specimens for determination of residual measurement system by eddy current. A Finite element model (FEM) method was performed RSW together with an X-ray diffraction (XRD) technique in order to determine the existance of residual stress at various amount.

The eddy current technique was performed at frequency range between 0.1 and 3 MHz using Pin-point probe on specimen. The Measurement System Analysis (MSA) was evaluated for change of conductivity from residual stress. The results showed that using eddy current technique at 1 MHz for residual stress measurement was the most efficient. It can be achieved GR&R at 172.86 MPa with %GR&R at 16.61479 and ndc at 8. As applied on actual butt welded joint, it could yield the uncertainty of ± 58 MPa at 95 % (U_{ISO}).

Keywords : Eddy current / Stainless steel / Residual stress/ Finite element method/ Measurement

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.วันจักรี เล่นวารี และ ผศ. ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ อบรมสั่งสอน การให้คำปรึกษาและแนวคิด อาจารย์เชิดพงษ์ จอมเดช นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา NDTL ที่กรุณาให้คำแนะนำการใช้เครื่องตรวจวัดด้วยกระแสไหลวนที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องตรวจวัดด้วยกระแสไหลวน และสถานที่ในการทดลองวัดค่าความเค้นตกค้าง ระหว่างทำงานวิจัย คุณศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้ และคุณศิขริน โสรโชติ นักวิจัยและเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ เครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Stress Analyzer) และสถานที่ระหว่างการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ รศ. ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ และคณาจารย์ สาขามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความรู้ด้านมาตรวิทยาแก่ผู้ทำวิจัย และขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สามารถสำเร็จเสร็จสิ้นได้ ถ้าปราศจากแรงสนับสนุนจาก ผู้มีพระคุณ ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
กิตติกรรมประกาศ		ง
สารบัญ		จ
รายการตาราง		ช
รายการรูปประกอบ		ซ
รายการสัญลักษณ์		ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ		ฎ
บทที่		
1. บทนำ		**1**
1.1	ความเป็นมา	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		**3**
2.1	ความเค้น (Stresses) และความเครียด (Strains)	3
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด(Relation Between Stress andStrain)	4
2.3	ความเค้นตามอุณหภูมิ	8
2.4	ประเภทของความเค้น	9
2.5	เหล็กกล้าไร้สนิม	17
2.6	สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม	20
2.7	การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding)	21
2.8	กระแสไหลวน	21
2.9	การประเมินค่าความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method)	35
2.10	การวิเคราะห์ระบบการวัด	36
2.11	ความไม่แน่นอนในการวัด	40
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44

หน้า

3. การดำเนินการทดลอง 46

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 46

3.2 อุปกรณ์การทดสอบ 46

3.3 การดำเนินการทดลอง 47

4. ผลการทดลอง/วิจัย **66**

4.1 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง โดยวิธี FEM ด้วย COMSOL 66

4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง โดยวิธี XRD 55

4.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง โดยวิธีกระแสไหลวน 60

4.4 ผลการวัดความความเค้นภายในชิ้นงานทดสอบแรงดึงภายใต้ภาระแบบสถิต (Static Load Test) 80

4.5 ผลการวัดค่าความเค้นตกค้างชิ้นงานต่อชนโดยการวัดด้วยกระแสไหลวน 84

4.6 การประเมินผลคุณสมบัติด้วยความแม่นยำของระบบการวัดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานโดยวิธีกระแสไหลวน 90

4.7 ความไม่แน่นอนของการวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธีกระแสไหลวน 93

5. สรุป **95**

5.1 สรุปผลการวิจัย 95

5.2 ข้อเสนอแนะ 96

เอกสารอ้างอิง **98**

ภาคผนวก **102**

ก การคำนวณความถี่สำหรับการวัดความลึกชิ้นงาน 102

ข คุณลักษณะของหัวตรวจสอบ 105

ค ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง 107

ง ผลการคำนวณค่าความเค้นตกค้างโดยวิธีFEM 123

จ ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด 127

ฉ การคำนวณความไม่แน่นอน (Uncertainty) 160

ประวัติผู้วิจัย **163**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ชื่อและลักษณะ Lattice	14
2.2	การประมาณการค่าความผันแปรของความสามารถของระบบการวัด	39
3.1	สมบัติทางกล ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดSUS 304	47
3.2	ค่าแรงดึงและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบ	63
3.3	สภาวะการปรับตั้งค่าตัวแปรของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ตามความถี่ของหัวตรวจสอบ	64
4.1	ระดับค่าความเค้นตกค้างของแบบจำลองที่ได้จากการประมวลผล	68
4.2	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน12 kA ด้วย XRD	74
4.3	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน14 kA ด้วย XRD	74
4.4	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน16 kA ด้วย XRD	74
4.5	ความสามารถระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ต่างๆ	77
4.6	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 102.5 kHz	86
4.7	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 500 kHz	87
4.8	แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 1 MHz	88
4.9	ความสามารถระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนของความถี่ต่างๆ	93
4.10	ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 1 MHz	94

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ 4
2.2 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด 6
2.3 สเตรนเกจแบบกลีบดอกไม้ (Rosette gage) สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง 13
2.4 ภาพตัดขวางหลอดเอ๊กซ์เรย์ 13
2.5 การสะท้อนรังสีเอ๊กซ์เรย์ 13
2.6 การหักล้างและเสริมกันของสะท้อนรังสีเอ๊กซ์เรย์ 13
2.7 รอบเวลาการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 20
2.8 ลำดับเวลา(Basic Weld Schedule) ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 21
2.9 การเกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานเนื่องสนามแม่เหล็กของขดลวด 22
2.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไหลวนต่อความลึก 26
2. 11 วงจรบริดจ์ที่ใช้ในเครื่องมือวัดกระแสไหลวน 29
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำกับขนาดและทิศทางของค่าอิมพีแดนซ์ 31
2.13 ลักษณะหัวตรวจสอบ ก) แบบสมบูรณ์ ข) ความแตกต่าง ค) สะท้อน ง) แบบเปลือย จ) ฝาครอบ 33
2.14 ชิ้นส่วนรูปทรงเรขาคณิตตามหลักการของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ 36
2.15 ช่วงระดับความเชื่อมั่นในรูปแบบการกระจายตัวปกติ 38
3.1 แสดงชิ้นงานก่อนเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 48
3.2 เครื่องเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 48
3.3 การเชื่อมและจับชิ้นงานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 49
3.4 ชิ้นงานหลังก่อนเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด 49
3.5 ขนาดและชิ้นงานทดสอบแรงดึง 50
3.6 การป้อนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่อแบบจำลอง 52
3.7 การ Meshing แบบจำลองของชิ้นงานในไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM) 52
3.8 ชุดเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคXRD-XSTRESS 3000 รุ่น G2R 53
3.9 ชุดอุปกรณ์สอบเทียบและมาตรฐานอ้างอิง (Free Stress) ของเครื่อง X-Ray 54
3.10 หน้าต่างโปรแกรม XTronic 1.4.0 9 ตอนเริ่มต้น 55
3.11 หน้าต่างโปรแกรมแสดง Manual Move Tab เพื่อควบคุมการขึ้นลงของปลายCollimator 56
3.12 หน้าต่างเริ่มต้นการวัดความเค้นตกค้าง 57

รูป **หน้า**

3.13 ส่วนติดต่อผู้ใช้เพื่อป้อนปัจจัยกำหนดการวัด 57

3.14 ส่วนติดต่อผู้ใช้ของCalculation Tab เพื่อป้อนสมบัติวัสดุและมุม2θ 58

3.15 ปลายของ Collimator ขนาด 1 mm และผิวหน้าชิ้นงาน 58

3.16 หน้าต่างแสดงผลขณะที่เครื่องกำลังทำการยิงรังสีตกกระทบที่มุมต่างๆ 59

3.17 ชุดเครื่องมือวัดกระแสไหวน และการติดต่อกับเครื่องผ่านRS232 Port 59

3.18 การตั้งค่ามุม และความถี่ใช้งาน1 MHz สำหรับเครื่องมือวัดกระแสไหลวน 60

3.19 ขั้นตอนการรันโปรแกรมJMP โดยใช้ Variability/Gauge Chart 61

3.20 หน้าต่างกล่องโต้ตอบเพื่อรอรับการเลือกแถวและหลักเพื่อการวิเคราะห์ 62

3.21 กำหนดข้อมูลในแกนX และ Y 62

4.1 แสดงผลการกระจายตัวของความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน 66

4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน12 kA โดย FEM 67

4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน14 kA โดย FEM 67

4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน16 kA โดย FEM 68

4.5 แสดงผลการวัดจาก Detector A 12 kA 69

4.6 แสดงผลการจาก Detector B 12 kA 70

4.7 กราฟความชันของการวัดชิ้นงานทดสอบที่ 12 kA บริเวณ Core ครั้งที่3 70

4.8 แสดงผลการจาก Detector A 14 kA 71

4.9 แสดงผลการจาก Detector A 14 kA 71

4.10 กราฟความชันของการวัดชิ้นงานทดสอบที่ 14 kA บริเวณ Core 72

4.11 แสดงผลการจาก Detector A 16 kA 72

4.12 แสดงผลการจาก Detector B 16 kA 73

4.13 กราฟความชันของการวัดชิ้นงานทดสอบที่ 16 kA บริเวณกระทบร้อน (HAZ) 73

4.14 เปรียบเทียบระดับค่าความเค้นของงานเชื่อมต้านทานชนิดจุด 75

4.15 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ12 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ 76

4.16 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ14 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ 76

4.17 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ16 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ 77

4.18 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจนขาดออกจากกัน 78

4.19 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 102.5 kHz 79

4.20 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 500 kHz 79

4.21 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 1 MHz 80

รูป **หน้า**

4.22 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 2 MHz 80

4.23 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 3 MHz 81

4.24 การแบ่งตำแหน่งชิ้นงานวัดความเค้นของชิ้นงาน 16 kA และ 14 kA 82

4.25 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 102.5 kHz 82

4.26 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 500 kHz 83

4.27 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 1 MHz 83

4.28 ภาพจำลองการวัดบริเวณต่างๆ บนชิ้นงาน 85

4.29 การวัดความเค้นบริเวณต่างๆ บนชิ้นงาน 85

4.30 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่ 102.5 kHz 89

4.31 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่ 500 kHz 89

4.32 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่ MHz 90

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ภาคตัดขวาง
B	=	Magnetic Flux Density
E	=	Modulus of Elasticity ของวัสดุชิ้นงาน
f	=	Frequency
G	=	Modulus of Rigidity
V_P	=	Primary Voltage
V_S	=	Secondary Voltage
$\bar{X}$	=	Arithmetic Mean/Mean/Average
X_L	=	Inductive Reactance
Z_P	=	Primary Impedance
λ	=	ความยาวคลื่น
θ_i	=	มุมตกกระทบ
θ_r	=	มุมสะท้อน
ϕ_P	=	Magnetic Flux
τ	=	Shear Force
ρ	=	Resistivity
σ	=	Stress
σ	=	ความผันแปร (Variation)
σ_c	=	Conductivity
μ	=	Magnetic Permeability
μ_r	=	Relative Magnetic Permeability
ν	=	Poisson Ratio

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Austenitic Stainless Steel	=	เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
AV	=	Appraiser Variation
BCC	=	Body Center Cubic
Compressive Stress	=	ความเค้นแรงอัด
Cr	=	โครเมี่ยม
d	=	d-Spacing
E	=	Modulus of Elasticity
Eddy Current	=	กระแสไหลวน
El	=	Elongation
EV	=	Equipment Variation
e	=	ลอการิทึมโดยธรรมชาติ
FCC	=	Face-Centered Cubic
FEM	=	Finite Element Method
IACS	=	International Annealed Copper Standard
L	=	Inductance
Load	=	ภาระกระทำ
MPa	=	เมกาปาสคาล
MSo	=	Operation Mean Square
MSpool	=	Pooled Mean Square
m^2	=	ตารางเมตร
Pa	=	Pascal
Residual Stress	=	ความเค้นตกค้างของรอยเชื่อม
RSW	=	Resistance Spot Welding
R.A	=	Reduction of Area
SC	=	Simple Cubic
SD	=	Standard Deviation
SS	=	Sum of Square
Stress	=	ความเค้น
Strain	=	ความเครียด
Tensile Stress	=	ความเค้นแรงดึง

U	=	Uncertainty
XRD	=	X-Ray diffraction

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมนั้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนงานโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นประจำ ซึ่งเป็นผลมาจากกรณีต่างๆ เช่น การใช้งานที่ยาวนานก่อให้เกิดการล้า การแบกภาระกระทำเกินกำลังของวัสดุ หรือความผิดพลาดเนื่องจากกระบวนการผลิต (Production process) กระบวนการผลิตมีหลายวิธี เช่น การรีด การตี การหล่อ เป็นต้น การเชื่อมประสาน (Welding) เป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่สิ่งสำคัญมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน และถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการประกอบโครงสร้าง รวมไปถึงในงานซ่อมบำรุงรักษา

การเชื่อมต้องใช้ความร้อนสูงจากกระแสไฟฟ้าเพื่อหลอมละลายวัสดุของชิ้นงานให้ติดกันก่อให้เกิดความร้อนต่อชิ้นงาน ในสภาวะการผลิตชิ้นงาน ชิ้นงานเชื่อมจำเป็นต้องเชื่อมหลายแนวเป็นสาเหตุให้เกิดการขยายตัวและหดตัวไม่เท่ากัน เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความเค้นตกค้างอันเกิดจากการแข็งตัวของเนื้อโลหะโดยรอบแนวเชื่อมที่ขยาย (Expansion) หรือหดตัว (Shrinkages) แตกต่างกัน ผลกระทบของความร้อนต่อชิ้นงานภายหลังการเชื่อมส่งผลให้เกิดการบิดตัว การหดตัว และความเค้นตกค้างของการเชื่อม (Welding residual stress)

ความเค้นตกค้างของการเชื่อมมีอยู่ทั่วไปในวัสดุ หรือชิ้นงาน ไม่สามารถแสดงออกมาให้เห็นได้ และยากต่อการขจัดให้หมดไปจากตัวชิ้นงาน ก่อให้เกิดปัญหามากมาย เพราะความเค้นตกค้างทำให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลงกว่าค่าที่คำนวณไว้ ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างของชิ้นงาน ในด้านความสามารถการแบกภาระกระทำภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เป็นสาเหตุของการแตกร้าว (Stress Cracking) นอกจากนี้ บริเวณที่มีความเค้นตกค้างทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณรอบรอยเชื่อม เพราะบริเวณนั้นจะเกิดขั้วอาโนดซึ่งมีความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า ในทางปฏิบัติ Shot peening Surface rolling

การวัดค่าความเค้นโดยส่วนใหญ่ที่กระทำอยู่ใช้วิธี การวัดความเค้นด้วยสเตรนเกจ แบบเจาะรู (Hole-Drilling Strain Gage Method) แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายที่สูง และถือเป็นการทดสอบโดยวิธีทำลายเกิดความเสียหายกับรอยเชื่อม ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะนำมุ่งเน้นไปที่

การพัฒนาการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบเฝ้าระวังความเสียหาย (Health monitoring) ของวัสดุโครงสร้าง และอุปกรณ์ต่างๆ ที่สนใจตรวจสอบมากขึ้น

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Test) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรมเครื่องบิน, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และงานตรวจสอบโลหะทั่วๆไป ส่วนมากใช้กับงานท่อขนาดเล็กในระบบระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการประเมินค่าความเค้นตกค้างในงานเชื่อมโดยใช้กระแสไหลวนตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติค เกรด 304 บริเวณกระทบความร้อน (Heat affect zone) เพื่อการป้องกันความเสียหาย และบำรุงรักษาเครื่องจักรให้มีสภาพใช้งานที่ยาวนาน การวัดและประเมินค่าการวัดถือเป็นส่วนหนึ่งของงานมาตรวิทยา เป็นพื้นฐานของการตรวจสอบคุณภาพและผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานเพื่อลดปริมาณสูญเสีย คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้และไม่เกิดความเสียหายขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ความเป็นไปได้ในใช้กระแสไหลวนวัดค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานเชื่อม
2. ศึกษาวิธีการสร้างความเค้นตกค้างในชิ้นงานเพื่อใช้ในการศึกษาระบบการวัด
3. ศึกษาสมบัติเฉพาะในด้านประสิทธิภาพและประเมินความสามารถของงระบบการวัด (MSA) ของเทคนิคการวัดต้นแบบที่สร้างขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองชิ้นงาน และประมวลผลเพื่อทำนายค่าความเค้นตกค้างด้วยคอมพิวเตอร์(โปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL)
2. สร้างชิ้นงานจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบ
3. ทำการสอบเทียบเทคนิคการวัด โดยการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้ากับแรงที่เกิดขึ้นจากเครื่องทดสอบแรงดึงที่สอบเทียบแล้ว ภายใต้ Proportional Limit
4. การสร้างความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจวัดด้วยกระแสไหลวน
5. สรุปผลการวิจัย, ทดลอง และสมบัติเฉพาะของระบบการวัดด้วยกระแสไหลวน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการผลิตชิ้นงาน จำเป็นที่ต้องให้แรง (ความเค้น) ในการขึ้นรูปวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic Deformation) การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Internal Stress) ภายในเนื้อวัสดุ เช่นการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) Grain ของวัสดุมีลักษณะยาว (Elongate Grain) ส่งผลให้เกิดความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) เพิ่มมากขึ้น แต่ความเหนียว (Ductility) กับลดลง สำหรับการเชื่อม (Welding) ความเค้นตกค้างในแนวเชื่อมมีผลมาจากการแข็งตัวของเนื้อโลหะที่ไม่สม่ำเสมอ หรือมีทิศทางที่ต่างกัน

2.1 ความเค้น (Stresses) และความเครียด (Strains) [1]

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายใน (Internal Resisting Force) เนื้อวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของโครงสร้างเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำ (External Load) เพื่อให้โครงสร้างนั้นอยู่ในสมดุล

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2.1}$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m^2) หรือ kgf/mm^2 หรือ psi (lbf/in^2)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ: m^2 หรือ mm^2 หรือ in^2

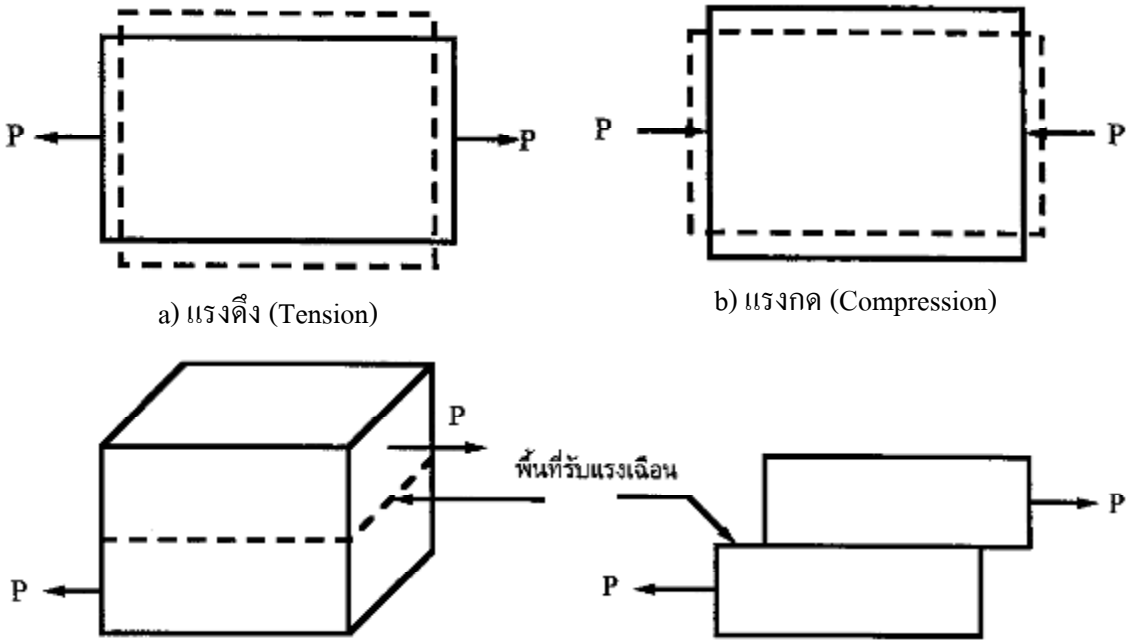
หน่วยของ Stress

หน่วย FPS	psi
หน่วย MK	kg/mm^2
หน่วย SI	N/m^2, MN/m^2, GN/m^2
	N/m^2 เรียกอีกอย่างว่า Pascal (Pa)

ความเค้นแบ่งตามลักษณะแรงมากระทำโดยทั่วไปใช้ ชนิด คือ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง (Tension) มากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.1a
2. ความเค้นแรงอัด Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกด (Compression) มากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.1b
3. ความเค้นแรงเฉือน(Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงเฉือน(Shear Force) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.1c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางA ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน



a) แรงดึง (Tension)

b) แรงกด (Compression)

c) แรงเฉือน (Shear)

รูปที่ 2.1 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ

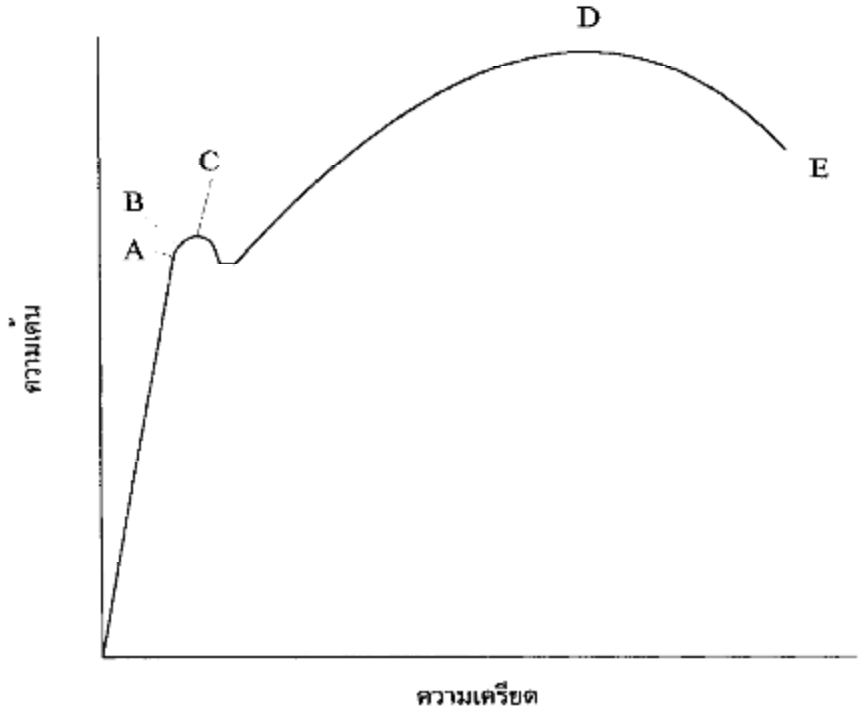
ความเครียด (Strain) เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (ความเค้น) กล่าวคือขนาดที่เปลี่ยนไปต่อขนาดเดิม การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวกยางยืดสปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Relation Between Stress and Strain) [1]

เมื่อทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) เพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งทำโดยการดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งขาด แล้วเขียน (plot) กราฟโดยความเค้นหรือแรงในแกนตั้ง และความเครียดหรือขนาดที่ยืดออกในแนวนอน ต้องการในการแสดงความสัมพันธ์จากกราฟ จะได้เส้นกราฟ ช่วง O-A กราฟที่เขียนได้เป็นเส้นตรงเพราะความยาวส่วนที่ยืดออกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นตามกฎของฮุค (Hook's law) จุด A เรียกว่า พิกัดสัดส่วน หรือขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional limit or limit of proportionality) เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรง หลังจากจุดนี้แล้ว ความเค้นไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวที่ยืดออก

จากจุด A ถึง B ความเค้นไม่เป็นสัดส่วนกับความเครียด ในบริเวณ OB เป็นช่วงยังยืดหยุ่นและเรียกตรงจุด B ว่า ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น (Elastic limit) ถ้าวัสดุยังคงถูกแรงดึงต่อไปอีกนิดเลยจุด B ความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อยกเลิกแรง วัสดุจะไม่หดกลับมาเท่ารูปร่างเดิม



รูปที่ 2.2 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด

ถ้าดึงต่อไปถึงจุด C ทำให้เกิดความเครียดมากจนถึงจุดแตกหัก (Fracture Point) วัสดุนั้นจะเสียความยืดหยุ่นไปจนหมดสิ้น และไม่กลับคืนสู่รูปร่างเดิมอีกต่อไป จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก(Yield Point) หรือบางทีเรียกว่า จุดครากบน (Upper Yield Point) หลังจากนั้นแรงภายในที่ต้านการยืดตัวจะลดลงเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าจุดครากล่าง (Lower Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย โดยทั่วไปค่าความเค้นที่ใช้ในการออกแบบหมายถึง ค่าความเค้นที่จุดคลากล่าง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน(Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย(Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซนต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง(Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซนต์การยืดตัว}\,(\%El) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \qquad (2.2)$$

เมื่อ L_f = ความยาวพิกัดสุดท้าย (หลังจากดึงจนขาด)

L_o = ความยาวพิกัดเดิม

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง}\,(\%R.A) = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \qquad (2.3)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า *%El* มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี(*%El* สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ(เปราะ, Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้เป็นต้น

2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้พิกัดสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{PL}{A\Delta L} \qquad (2.4)$$

มีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm^2 หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \tag{2.5}$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้มาก

2.3 ความเค้นตามอุณหภูมิ (Temperature Stress or Thermal Stress) [2]

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง วัสดุทุกประเภทที่ไม่ถูกตรึงไว้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด กล่าวคือ วัสดุจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่วนที่เปลี่ยนไปนี้ความสามารถคงรูป หากวัตถุนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Thermal Expansion-CTE) α

$$\delta = \alpha \ell \Delta t \tag{2.6}$$

วัสดุยาว $\ell + \delta$ หดตัวลงเหลือ $= \ell$ ดังนั้นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่า

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\ell + \delta} = \frac{\alpha \ell \Delta t}{\ell + \delta} \tag{2.7}$$

แต่ δ มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับค่า ℓ

ดังนั้น $\varepsilon = \alpha \Delta t$

ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุ

$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon = \mathrm{E}\alpha \Delta t \tag{2.8}$$

จัดรูปเพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความเค้นตามกำหนด จะได้

$$\Delta t = \frac{\sigma}{\mathrm{E}\alpha} \tag{2.9}$$

2.4 ประเภทของความเค้น

แบ่งได้ 3 ประเภท

1. Residual Stress (Macro Stress)
2. Intergranular Stress (Micro Stress) เป็นความเค้นในระดับเกรน grain diameter การเปลี่ยนเฟส
3. Stress (Sub-Micro Stress) น้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน

2.4.1 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

เมื่อโลหะได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ซึ่งกล่าวรวมๆว่าความเค้นตกค้าง เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นแล้วคงค้างภายในเนื้อวัสดุ(Internal Stress) โดยปราศจากแรงภายนอกมากระทำ ความเค้นอาจเกิดขึ้นแบบชั่วคราว หรือถาวร ความเค้นตกค้างเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการขยายตัว ยืดตัว หรือหดตัวภายในเนื้อวัสดุ หรือความเครียดในช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการมองเห็น นอกจากความเค้นตกค้างมีผลต่อสมบัติทางกลด้านต่างๆ แล้ว มันยังส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะนั้นๆ การบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกจะขัดขวางการเดินทางของอิเล็กตรอนที่เดินทางไปรอบๆ ชิ้นโลหะ และส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของโลหะมีค่าลดลง ในโลหะบริสุทธิ์ผลของการบิดเบี้ยวต่อสภาพการนำไฟฟ้าจะมีผลน้อยมาก แต่ในโลหะผสม ผลของการบิดเบี้ยวต่อสภาพการนำไฟฟ้าจะมีผลมาก

2.4.2 วิธีการวัดความเค้นตกค้าง [3]

ปัจจุบันมีการนำเทคนิควิธีการวัดต่างๆ เพื่อวัดค่าความเค้นตกค้างในวัสดุ หรือชิ้นส่วนโครงสร้าง การวัดค่าความเค้นตกค้างให้ถูกต้องจำเป็นต้องเลือกเทคนิคการวัดที่เหมาะสม ความเค้นตกค้างสามารถถูกวัดด้วยเทคนิควิธีการวัดต่างๆ ดังต่อไปนี้[3]

ทางกล (Mechanical)

1. Curvature
2. Hole-Drilling Strain Gage

การกระจาย (Diffraction)

1. Electron
2. X-Rays
3. Neutrons

สนามแม่เหล็กและไฟฟ้า (Magnetic and Electrical Field)

1. Magnetoacoustic
2. Barkhausen
3. Eddy Current
4. คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonics)

วิธีการอื่นๆ (Other Methods)

1. Piezospectroscopic Effects
2. Thermoelastic Methods
3. Photoelastic Method

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการวัดความเค้นตกค้างที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือ การการวัดความเค้นด้วยวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู และวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคXRD

2.4.2.1 การวัดความเค้นตกค้างด้วยสเตรนเกจ [4]

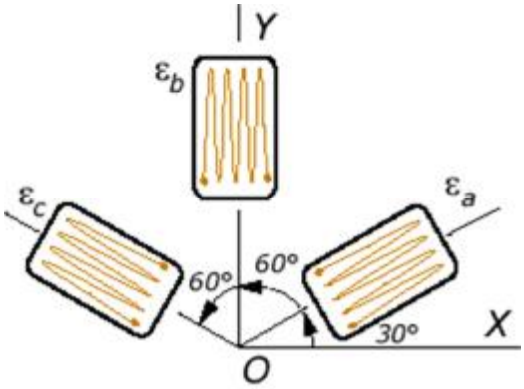
สเตรนเกจ เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเป็นค่าทางกลเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้า เนื่องมาจากแรงมากระทำ มีความไวมากต่อค่าความเครียดต่ออุณหภูมิ ใช้งานอย่างกว้างขวางในการวัดแรง ความดัน และน้ำหนัก หลักการคือ เมื่อ สเตรนเกจ ถูกแรงมากระทำให้ยืดออก ความยาวจะเพิ่มขึ้นขณะที่หน้าตัดลดลง ความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานเส้นลวดโลหะจะแปรผันตรงตามความยาว และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด เป็นไปตามความสัมพันธ์ค่าความต้านทานโลหะ

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.11}$$

R	=	ความต้านทานของโลหะ	
ρ	=	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega \cdot m$
l	=	ความยาววัตถุ	m
A	=	พื้นที่ภาคตัดขวาง	m^2

การติดตั้งมีหลายแบบมีทั้งตัวเดียว 2 ตัว และ 4 ตัวงจรมีทั้งแบ่งแรงดัน และ บริดจ์เกจแฟกเตอร์ (Gauge Factor) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียด และค่าความต้านทานเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น ความไม่บริสุทธ์ของโลหะ ชนิดโลหะ และตัวแปรอื่นๆ มีผลให้เกิดค่าเบี่ยงแบนเล็กน้อย

การวัดความเค้นด้วยวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู(Hole-Drilling Strain Gage Method) หลักการคือความเค้นตกค้างบริเวณขอบรูเจาะเกิดการคลายตัว เกิดขึ้นเมื่อถูกเจาะ และถูกวัดความเครียดที่ผิวมีความสัมพันธ์กับการคลายความเค้นหลัก(Principle Stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน หน่วยวัดความเค้นจะเป็น MPa, N/mm^2 หรือ lb/in^2 และยังมีวิธีการวิเคราะห์ความเค้นในรูปแบบที่เป็นเชิงรูปภาพ วิธีหนึ่งคือ วิธีการแบบ Morh's Circle ที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณและทิศทางความเค้นที่เป็นหลักได้ง่าย

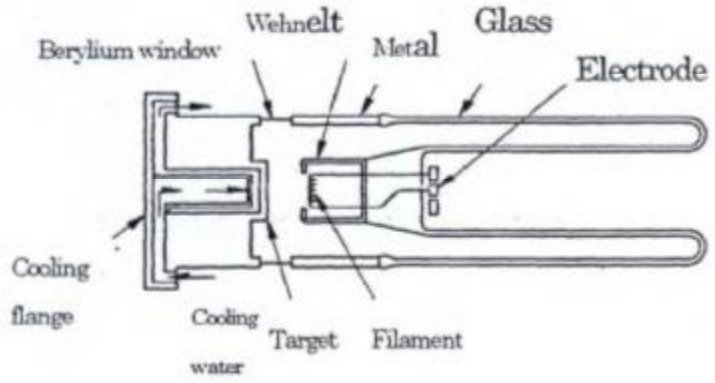


รูปที่ 2.3 สเตรนเกจแบบกลีบดอกไม้ (Rosette Gage) สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง

2.4.2.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD [5]

รังสีเอ็กซ์

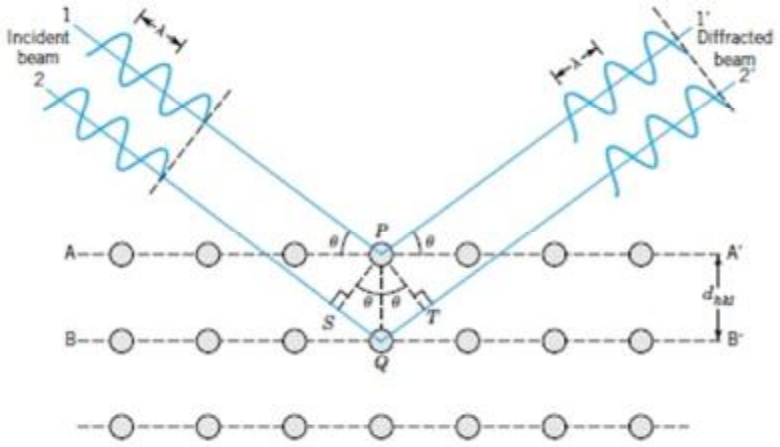
เครื่องมือที่ให้แหล่งกำเนิดลำแสงรังสีเอ็กซ์ใช้หลอดเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Tube) โครเมียม (A-40-Cr) ซึ่งให้ความยาวคลื่น 2.2897 อังสตรอม (Angstom) ความต่างศักย์ที่ให้กับขดลวดเพื่อที่จะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์จะต้องใช้แรงเคลื่อน 30 KV กระแส 30 mA ต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบที่ทำด้วยโลหะและอยู่ในสุญญากาศ เมื่อใช้ขดลวดโครเมียมเป็นขั้วลบแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ขดลวดร้อนขึ้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมา และถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นด้วยการใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วมาก ๆ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนเป้า (Target) ที่ทำด้วยโลหะต่างกันจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้นโดยพลังงาน 99 % จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งตัวเป้าจะต้องทำให้เย็นลงโดยการหล่อเย็นตลอดเวลาดังรูปที่ 2.4



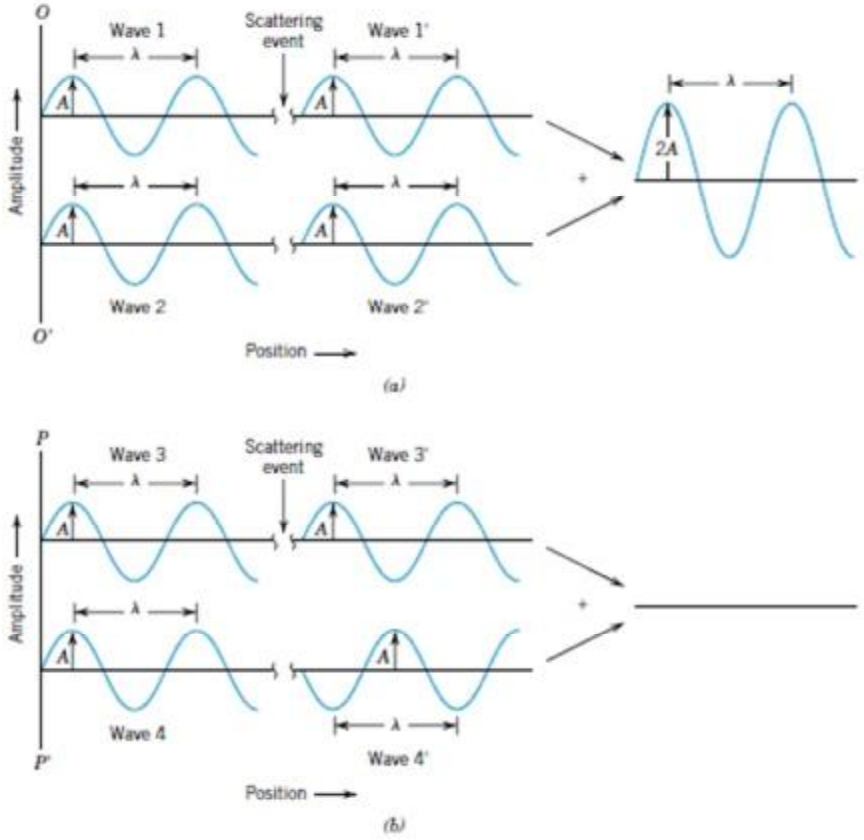
รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางหลอดเอ็กซ์เรย์[5]

เทคนิค X-Ray Diffraction หรือ เรียกสั้นๆว่าเทคนิคXRD เป็น เทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น ไปตกกระทบผลึก (มุมตกกระทบ θ_i) ชิ้นงานโดยทำมุม θ กับพื้นผิวของ

ผลึก ตามรูปที่ 2.5 และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี (มุมสะท้อน θ_r) ที่มุมต่างๆกัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูลเนื่องจากสารประกอบ และธาตุที่มีส่วนผสม หรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบน ที่มุมที่มีองศาต่างกัน ลำแสงที่สะท้อนออกมาอยู่ในเฟส (Phase) เป็นการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) ถ้ารังสีเอ๊กซ์เลี้ยวเบนออกมาไม่อยู่ในเฟส หรือลำแสงไม่เสริมกันแต่จะรบกวนกันและหักล้างกัน(Destructive Interference) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การสะท้อนรังสีเอ๊กซ์เรย์



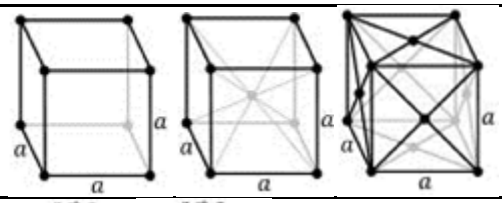
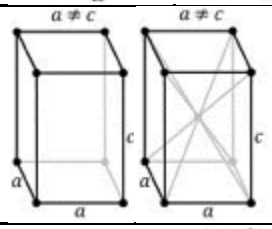
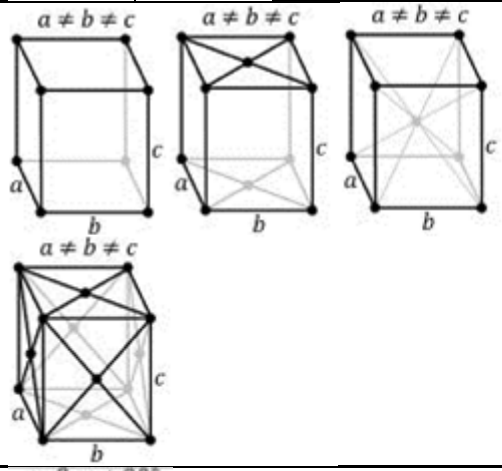
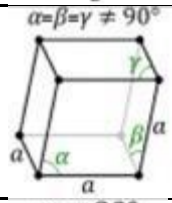
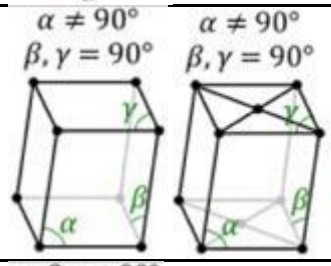
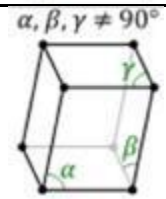
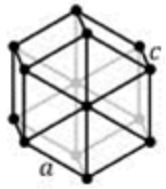
รูปที่ 2.6 การหักล้างและเสริมกันของสะท้อนรังสีเอ๊กซ์เรย์

จากอดีตจนถึงประมาณปี 1950 การวัดค่าความเค้นโดยใช้วิธีX-Rays ทำได้เพียงใช้ระนาบการสะท้อนปกติของรังสี (Reflecting-Plane Normal)

ในวัสดุจริงนั้น โครงสร้างของผลึกเป็น 3 มิติทั้งหมดUnit Cell จึงมีความซับซ้อนขึ้น รูปโครงของ Unit Cell เรียกว่า Lattice แบ่งออกเป็น 7 ประเภทหลักๆ โดยใช้ความยาวของทรงสี่เหลี่ยม 3 ด้าน ด้าน a ด้าน b และด้าน c กับมุมระหว่างด้าน มุม α มุม β และมุม γ

ใน1 Unit Cell นั้น อาจมีหลายอะตอมและอะตอมนั้นก็ไม่จำเป็นจะต้องอยู่ที่ขอบหรือมุมของLattice ก็ได้ อาจจะอยู่ตรงกลาง cell หรือตรงกลางของหน้าของ Unit Cell ในทั้ง7 ประเภทของ Lattice นั้น ตามตารางที่ 2.1 Lattice ประเภท Cubic หรือลูกบาศก์นั้น พบบ่อยที่สุดและเป็นรูปทรงที่ไม่ซับซ้อน วัสดุประเภทโลหะจำนวนมากก็มีโครงสร้างผลึกแบบ Cubic

ตารางที่ 2.1 ชื่อและลักษณะ Lattice

ชื่อประเภทของ Lattice	
Cubic $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Tetragonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Orthorhombic $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Rhombohedral $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	
Monoclinic $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq 90° \beta = \gamma = 90°$	
Triclinic $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	
Hexagonal	

โครงสร้างผลึกแบบ Cubic

โครงสร้างผลึกแบบ Cubic แบ่งออกเป็น 3 ชนิดย่อย คือ

1. Simple Cubic (SC) คือ Unit Cell ที่มีอะตอมอยู่ตรงมุมทั้ง8 ของลูกบาศก์เท่านั้น
2. Body-Centered Cubic (BCC) คือ Unit Cell ที่มีอะตอมอยู่ตรงมุมทั้ง8 ของลูกบาศก์และตรงกลาง Unit Cell
3. Face-Centered Cubic (FCC) คือ Unit Cell ที่มีอะตอมอยู่ตรงมุมทั้ง8 ของลูกบาศก์และตรงกลางหน้าทั้ง6 ด้านของลูกบาศก์

ระยะห่างระหว่างระนาบ (Plane) ของผลึก [6]

ระนาบคือแนวที่อะตอมเรียงกันเป็นเส้นตรงใน 2 มิติ หรือเป็นแผ่นตรงใน 3 มิติ ระนาบไม่จำเป็นจะต้องอยู่ในแนวขนานกับ Lattice ถ้ามีแสงหรือรังสีตกกระทบกับผลึกที่เอียงอยู่ ระนาบที่สะท้อนรังสีออกไปก็จะไม่ใช่ระนาบที่ขนานกับด้านยาวของ Lattice ถ้าความยาวของด้าน Cubic Lattice เท่ากับ a ระยะห่างระหว่างระนาบสองเส้นแรกในรูปข้างล่างนี้ (คู่ซ้ายสุด) ก็คือ a ระยะห่างระหว่างระนาบนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย XRD เนื่องจากกราฟที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบ อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด เนื่องจากวัสดุมีความยาวของ lattice ไม่เท่ากัน และอะตอมเรียงตัวต่างๆกันไป ทำให้มีระยะห่างระหว่างระนาบไม่เท่ากัน

ในปี 1978 B.D. Cullity ได้สร้างสมการเพื่อใช้คำนวณค่าความเค้นตกค้างขึ้นมาอีกสมการหนึ่งที่อยู่ในเทอมของค่าระยะห่างระหว่างผลึก ดังนี้

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi}\left(\frac{d_i - d_n}{d_n}\right) \qquad (2.12)$$

และจากสมการ Bragg's Law จะได้ว่า

$$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad (2.13)$$

ดังนั้น

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \qquad (2.14)$$

เมื่อ d = ค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมในผลึก (d-spacing)

λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

n = คือค่าคงที่เลขจำนวนเต็มใดๆ 1, 2, 3,....ที่บอกลำดับการเลี้ยวเบนผ่านอะตอมในแต่ละระนาบของผลึก สมการนี้กำหนดไว้ส่วนใหญ่มีค่าเป็น 1

θ = มุมตกกระทบของรังสีเอ๊กซ์บนชิ้นงาน

เพราะฉะนั้นเราจึงได้สมการ

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi}\left(\frac{\sin\theta n}{\sin\theta i}-1\right) \tag{2.15}$$

สมการที่ 2.15 เป็นสมการที่ให้ผลค่าความเค้นตกค้างที่ถูกต้องมากกว่าสมการที่ ดังนั้นเราจึงได้ค่าคงที่ตัวใหม่ที่เรียกว่าNew Stress Constant K_2 โดยที่

$$K_2 = \frac{E}{(1+\lambda)\sin^2\psi} \tag{2.16}$$

จะเห็นว่าค่า K ตัวนี้จะไม่มีเทอมของค่ามุม และจากสมการที่ เราสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของค่า K_2 ได้ดังนี้

$$\sigma_\phi = K_2\left(\frac{\sin\theta n}{\sin\theta i}-1\right) \tag{2.17}$$

หากชิ้นงานมีความเค้นอยู่ภายใน ความเค้นจะถูกคำนวณจากสมการที่

$$\frac{d_{\phi\psi}-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu\upsilon}{E}\sigma_\phi \sin^2\psi - \frac{\upsilon}{E}(\sigma_{11}+\sigma_{22}) \tag{2.18}$$

จากสมการข้างบน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปใหม่ได้เป็น

$$d_{\phi\psi} = d_0\frac{1+\nu}{E}\sigma_\phi \sin^2\psi - d_0\frac{\nu}{E}(\sigma_{11}+\sigma_{22}) + d_0 \tag{2.19}$$

ตัวคูณในเทอมของ $\sin^2\psi$ เป็นค่าความชันของกราฟระหว่าง d และ $\sin^2\psi$

จัดรูปสมการ 2.20 ใหม่เพื่อหาค่าความชัน m

$$m = \frac{m}{d_0}\left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sigma_\phi \qquad (2.20)$$

การวัดค่าความเค้นตกค้างจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction ผ่านการทดสอบด้วยวิธี Diffraction Method โดยนำค่า Parameter ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณ โดยอาศัยสมการที่ 2.15 และ 2.20 ตามหลักการที่ว่า มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์เท่ากับมุมสะท้อนกลับ และค่าความเค้นตกค้าง σ_ϕ ที่ได้จะสามารถวัดได้จากค่ามุม 2θ ที่เปลี่ยนแปลงไป จากการเอียงชิ้นงาน, $\psi \neq 0$

X-Ray Diffraction เป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาไปมาก และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน
แต่ข้อจำกัดคือ การวัดด้วยระบบนี้ไม่สามารถนำพาไปไหนมาไหนได้ ต้องกระทำการวัดเฉพาะในห้องปฏิบัติการ และมีความยุ่งยากในการวัด ถึงกระนั้น เทคนิคนี้ก็ให้ผลที่มีความแม่นยำสูง

X-Ray Diffraction ถ้าเราจะวัดความเค้นที่อยู่ใต้ผิวของวัสดุ เราจำเป็นต้องทำการปอกหรือขัดผิวให้มีระยะถึงจุดที่ต้องการวัด ซึ่งจะกลายเป็นการเปิดผิวเพื่อทำการวัดด้วย X-Rays และทำให้การใช้ X-Ray Diffraction กลายเป็นการตรวจสอบแบบทำลาย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการวัดความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลของความร้อนในงานเชื่อมชุดแบบความต้านทานด้วยกระแสไหลวนเทียบกับ XRD

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม [7]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เป็นโลหะผสมผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำไม่เป็นสนิมอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศ และโครเมียมในเนื้อสเตนเลส เกิดเป็นฟิล์มบางๆ (Passive Film, Chromium Oxide Film : CrO_2) มองไม่เห็นเคลือบเกาะติดแน่นอยู่ที่ผิวหน้า ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อสเตนเลสได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน (Corrosion) ไม่เกิดสนิมเหมือนโลหะทั่วไป ในท้องตลาดจะสามารถพบเห็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึง ธาตุที่เจือลงในในเนื้อเหล็กคือ โครเมียม และนิเกิล ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิม ประเภทนี้เป็นเกรดทางการค้า (Commercial Grade) คือมีใช้หาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป เครื่องมือผ่าตัดของแพทย์ ทนต่ออุณหภูมิสูง เหล็กกล้าไร้

สนิมถูกจำแนกประเภทได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐานAISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิม แบ่งออกเป็นกลุ่มพื้นฐานตามโครงสร้างจุลภาค ได้ 5 กลุ่มคือ

1. เฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steels)
2. มาร์เทนซิติค (Martensitic Stainless Steels)
3. ออสเทนนิติค (Austenitic Stainless Steels)
4. ดูเพล็กเฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก (Duplex Ferritic-Austenitic Stainless Steels)
5. พรีซิปปิเตชันฮาร์ดเดนนิ่ง (Precipitation-Hardening Stainless Steels) หรือเหล็กกล้าไร้สนิมบ่มแข็งเพิ่มความแข็งโดยวิธีการตกผลึก

1. กลุ่มออสเทนนิติค หรือสเตนเลสตระกูล 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70% มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (Non – magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16-25 % คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15% มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล 8-20 % โดยน้ำหนักเพื่อปรับปรุงสมบัติในการผลิตประกอบ (Fabrication) และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-centered cubic (fcc) ซึ่งเรียกว่า ออสเทนไนท์ โครงสร้างออสเทนไนท์ เป็นโครงสร้างที่มีความเหนียว มีอัตราการยืดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทก และคงลักษณะเช่นนี้ไว้ทุกอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลจากนิกเกิล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ และไม่สามารถทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน มีความยืดตัวและความเหนียวดีมาก ขึ้นรูปได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยวิธี Cold work มีความยืดตัวและความเหนียวดีทั้งอุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/8 คือ มีส่วนผสมของโครเมียม 18% และนิกเกิล 8%

การอบชุบ (Heat treatment)

เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไม่สามารถทำให้แข็งได้ด้วยการอบชุบ เฟสที่สถียรที่อุณหภูมิห้องคือ Austenite+Ferrite+โครเมียมคาร์ไบด์ การ Annealing โดยการให้ความร้อนที่ 1038-1121°C แล้วชุบน้ำเพื่อลดการตกผลึกของคาร์ไบด์ จะได้โครงสร้างเป็นAustenite ทั้งหมดซึ่งบางส่วนเป็น Metastable หากนำไปชุบ Subzero หรือรับแรงทางกลสามารถ เปลี่ยนเป็น Martensite ได้เช่นกัน Austenitic Stainless Steel จึงมีสมบัติแข็งแรงและมี ความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ที่ 500 – 800 °C จะเกิดการแพร่ของ C และ Cr รวมตัวกันเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ และเนื่องจาก ปริมาณ C ที่ลดลง อาจพบ Ferrite ได้ทั่วไปในMatrix ของ Austenite

ชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นควรจะทำStress relived ที่อุณหภูมิ 399°C เป็นเวลาครึ่งชั่วโมงถึง2 ชั่วโมง

2. กลุ่มเฟอริติค (Ferritic) แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญอาจอยู่ระหว่าง10.5%-27% และมีนิกเกิ้ลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย

3. กลุ่มมาร์เทนซิติค (Martensitic) แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 12-14% และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1% ไม่มีนิกเกิล สเตนเลสตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน และพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด, อุตสาหกรรมเครื่องบิน และงานวิศวกรรมทั่วไป

4. กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation Hardening) เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17% และนิกเกิล 4% คล้ายกับกลุ่มออสเทนนิติก และยังมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อย เช่น อะลูมีเนียมและไทเทเนียม สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 เมกาปาสคาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) คือ เมื่อให้ความร้อน เหล็กจะไม่แข็งแต่เหนียวมากทำให้สามารถแปรรูปทางกลได้มาก

5. กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอริติค และออสเทนนิติค มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28% และโมลิบดินัมสูงกว่า 5% และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลออสเทนนิติค พบว่ามีการใช้งานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์

Polymorphism คือการที่วัสดุมีรูปแบบโครงสร้างของ Space Lattice ในสภาวะของแข็งมากกว่า 1 ชนิด หรือมีหลายรูปผลึกในโลหะชนิดเดียว เช่น BCC, FCC เป็นต้น และถ้าการเปลี่ยนรูปของผลึกเหล่านี้สามารถย้อนกลับได้(Reversible) จะเรียกคุณสมบัตินี้ว่าAllotropy

เหล็กกล้าไร้สนิมถูกพบปัญหาหลังจากการเชื่อมวัสดุเข้าด้วยกันมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากประกอบด้วยธาตุหลายตัว เมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อม จึงเกิดการขยายตัว และการหดตัวไม่

สม่ำเสมอ ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยวไม่ได้รูปทรงตามต้องการ เกิดการแตกร้าวตามขอบเกรนหรือแนวเชื่อม ทำให้แนวเชื่อมไม่สามารถรับแรงได้เต็มที่ และการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (Stress Corrosion Cracking: SCC) การแตกร้าวภายหลังอันเนื่องมาจากความเค้นตกค้างภายในแนวเชื่อมซึ่งเป็นที่มาของความสนใจในการศึกษาการวัดความเค้นตกค้างภายในแนวเชื่อม

2.6 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม

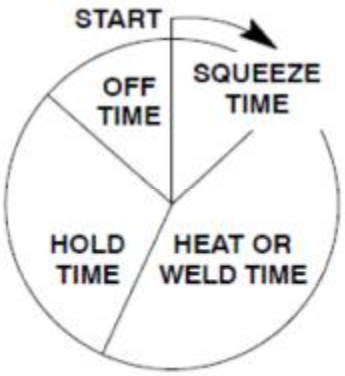
การที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความแรงคราก การยืด ความแข็ง และความเหนียวที่แตกต่างกันเนื่องจากมีลักษณะของโครงผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนสำคัญที่ทำให้มีลักษณะ โครงผลึกที่แตกต่างกันคือ ลักษณะของแลตทิช เฟสทรานซิชั่น (phase transition) และองค์ประกอบทางเคมีในขบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดSS 304 แสดงไว้ในบทที่3 ตารางที่ 3.1

2.7 การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding)[8]

การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเลกโทรดทั้งสองข้างให้ติดกัน

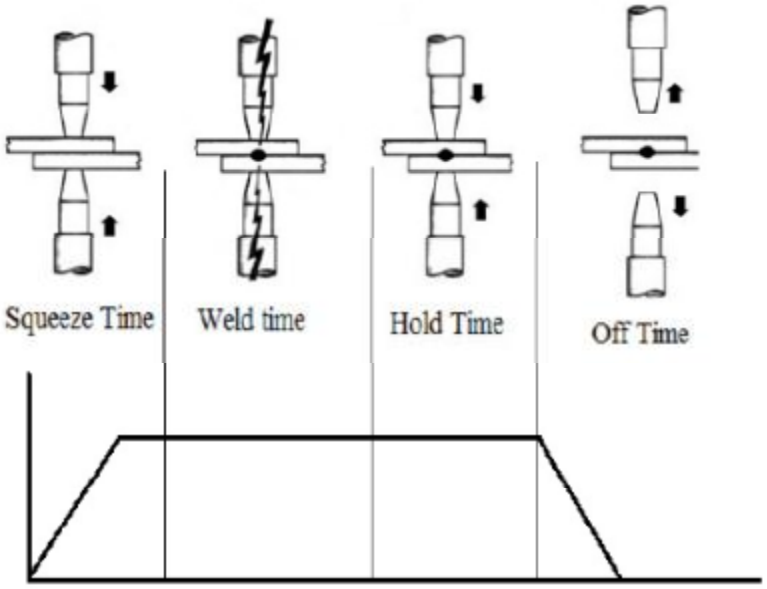
2.7.1 พื้นฐานการเชื่อมแบบควาต้านทานชนิดจุด

การเชื่อมแบบควาต้านทานชนิดจุด คือ กรรมวิธีการประสานวัสดุที่ผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อด้วยความร้อนที่เกิดจากความต้านการไหลของกระแสผ่านรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดจากอิเลกโทรด



รูปที่ 2.7 รอบเวลาการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

- เวลากด (Squeeze Time) คือ เวลาที่เริ่มต้นเข้ามาของสัญญาณเชื่อมและกระแสเชื่อมในครั้งแรกเป็นเวลาที่อิเลกโทรดสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา- เวลาเชื่อม (Weld Time) คือเวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้ามาในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง
- เวลากดค้าง (Hold Time) คือ ช่วงเวลาที่แรงกดจากหัวอิเลกโทรดที่ยังกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงเวลาท้ายสุดสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวที่มากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถยอมรับได้
- เวลาเย็นตัว (Off Time) คือ ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเลกโทรดเสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมและการเคลื่อนที่ไปทำการเชื่อมที่ตำแหน่งที่ต้องการต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมยังคงเดิม)



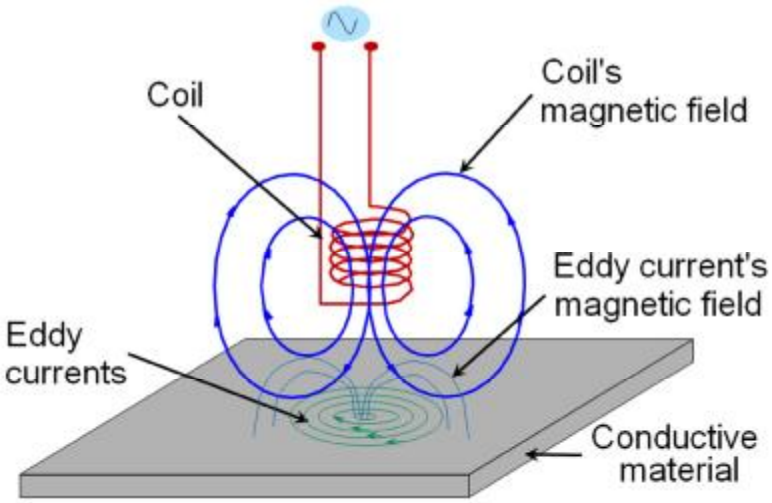
รูปที่ 2.8 ลำดับเวลา (Basic weld schedule) ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

2.8 กระแสไหลวน (Eddy current)[9]

การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current) ใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ ขดลวดที่มีกระแสไฟสลับไหลผ่านตามความถี่ที่กำหนด จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ ขดลวด เมื่อนำขดลวดเข้าใกล้ชิ้นทดสอบจำพวกโลหะที่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไหวนรอบๆ ชิ้นทดสอบ ส่วนประกอบหลักในการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ได้แก่ หัวตรวจสอบ (Probe) ภายในจะมีขดลวดกระตุ้น (Excitation Coil) ในขดลวดกระตุ้น ซึ่งวางตั้งฉากกับผิวของชิ้นทดสอบ เมื่อมีกระแสสลับไหลในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบซึ่งเป็นโลหะจะถูกสนามแม่เหล็กนี้เหนี่ยวนำ (Induce)

ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลเป็นวงกลมล้อมรอบสนามแม่เหล็ก ซึ่งกระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กวิ่งกลับทิศทางตั้งฉาก กับผิวอีกทีหนึ่ง ซึ่งต้านกับสนามแม่เหล็กของขดลวดที่หัวตรวจสอบ โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้านี้เป็นตัวที่บอกได้ถึงสภาพ หรือลักษณะภายในชิ้นงาน โดยที่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้านี้ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) เทียบกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าอิมพิแดนซ์ (Impedance) ของขดลวดตรวจสอบเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าของขดลวดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด เมื่อกระแสไฟฟ้าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพิแดนซ์ของขดลวดขึ้นเช่นกันดังนั้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพิแดนซ์ของขดลวดเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาสมบัติภายในชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.9 การเกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานเนื่องสนามแม่เหล็กของขดลวด

2.8.1 การเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน

เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก(Magnetic Field) จะเกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำ ทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (Magnetic Flux Density) ภายในสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และกระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีหน่วยเป็นเทสลา หรือเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) ไฟฟ้ารัศมี R จะมีค่าเท่ากับ

$$B = \frac{\mu I}{2\pi R} \tag{2.21}$$

เมื่อ B = ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

μ = ค่าซึมซาบทางแม่เหล้กของตัวนำ

I = กระแสไฟฟ้าภายในตัวนำ

ในวงจรไฟฟ้าใดๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรปฐมภูมิสามารถเขียนได้ในเทอมของแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ (Primary Voltage); V_P และค่าอิมพีแดนซ์ (Primary Impedance); Z_P ของวงจรได้

$$I_P = V_P / Z_P \tag{2.22}$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์; Z_P ประกอบไปด้วยความต้านทานไฟฟ้า(Ohmic Resistance); R และค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) X_L ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวด มีค่าเท่ากับ

$$X_L = 2\,\pi fL \tag{2.23}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ (Frequency) ของกระแสไฟฟ้าสลับมีหน่วยเป็นเฮริทซ์ (Hz)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) มีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry, H)

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่าประมาณเชิงซ้อน

$$Z_P = R + jX_L \tag{2.24}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของเครื่องตรวจสอบ มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ (Sine Wave)

$$I_P = I_O \sin(\omega t) \tag{2.25}$$

โดยที่ I_O คือ ค่ากระแสสูงสุด มีหน่วยเป็นแอมแปร์

และ ω คือ ค่าความถี่ มีค่าเท่ากับ $2\,\pi\,f$ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux, ϕ_P) เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวด โดยพบว่าเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้า I_P และจำนวนรอบของขดลวด N_P ดังรูปที่ 2.10

$$\phi_P \quad \propto \quad N_P I_P \tag{2.26}$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า I_P มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_P ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยเปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ (Secondary Voltage, V_S) ตามกฎของฟาราเดย์ เพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

$$V_S = -N_P \frac{d\phi_P}{dt} \tag{2.27}$$

เมื่อ $\frac{d\phi_P}{dt}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_P เทียบกับเวลา

จากสมการที่ 2.25 พบว่ากระแสไฟฟ้า I_P มีการเปลี่ยนแปลงเส้นแแบบรูปคลื่นซายน์ ดังนั้นเส้นเธงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นซายน์เช่นกัน

$$\phi_P = \phi_O \sin(\omega t) \tag{2.28}$$

เมื่อ ϕ_O เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คู่กับกระแสไฟฟ้า I_O ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

$$V_S = -N_P \omega \phi_O \cos(\omega t) \tag{2.29}$$

เมื่อนำขดลวดตรวจสอบเข้าใกล้ชิ้นงานที่จะทำการตรวสอบ แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิไหลในชิ้นงานโดย

$$I_S = V_S / Z_S \tag{2.30}$$

เมื่อ Z_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน และกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ I_S จะถูกเรียกว่า กระแสไหลวน (Eddy Current) เนื่องจาก ลักษณะการไหลที่เป็นวงกลม ซึ่งกระแสที่ไหลวนนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามุติยภูมิที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปฐมภูมิ

$$\phi_S \quad \propto \quad -I_S \tag{2.31}$$

ดังนั้นผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาพสมดุลรอบๆ ขดลวด เมื่อเข้าใกล้ชิ้นงาน

$$\phi_E = \phi_P - \phi_S \tag{2.32}$$

ซึ่งการไหลของกระแสไหลวนมีอิทธิพลให้เกิดการสูญเสียความต้านทาน และทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ ดังสมการ (2.33) และ (2.34)

$$Z \quad \propto \quad \phi_E \tag{2.33}$$

และ $$V = ZI_P \tag{2.34}$$

ซึ่งแสดงว่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดหัวตรวจสอบเป็นฟังก์ชั่นของสนามแม่ไฟฟ้าเหล็กรอบๆ บริเวณนั้น และสนามแม่ไฟฟ้านี้ที่ถูกเหนี่ยวนำในชิ้นงานเป็นความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของขดลวดหัวตรวจสอบและสมบัติของชิ้นงานทดสอบ

2.8.2 สมบัติการไหลของกระแสไหลวน

กระแสไหลวนเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลเป็นวงกลมในระนาบตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบ และสมบัติความนำไฟฟ้า รวมถึงการซึมซาบได้ของแม่เหล็กชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวกำหนดความลึกของการเหนี่ยวนำกระแสในชิ้นงาน กล่าวคือความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงตามความลึกจากผิวหน้าชิ้นงาน ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า "Skin Effect"

การหาคำตอบของสมการควบคุมการไหลของกระแสไหลวนสำหรับตัวนำที่มีความหนาแน่นแบบ Semi-Infinite ได้คำตอบอยู่ในรูปแบบ

$$J_X / J_O = e^{-\beta} \sin(\omega t - \beta) \tag{2.35}$$

เมื่อ Jx คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ความลึก x

Jo คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงาน

e คือ ลอการิทึมโดยธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.71828

β คือ มุมเฟส มีค่าเท่ากับ X/s เรเดียน (rad) และ

โดยที่ J_X / J_O คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ความลึก x ต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงาน

สมการที่ (2.35) สามารถแบ่งความสัมพันธ์ได้ออกเป็น2 องค์ประกอบ คือ

$$\boldsymbol{J_x/J_o \propto e^{-X/\delta}} \tag{2.36}$$

การลดลงของค่าเอกซ์โพเนนเชียลในความหนาแน่นของกระแสไหลวนกับความลึก และ

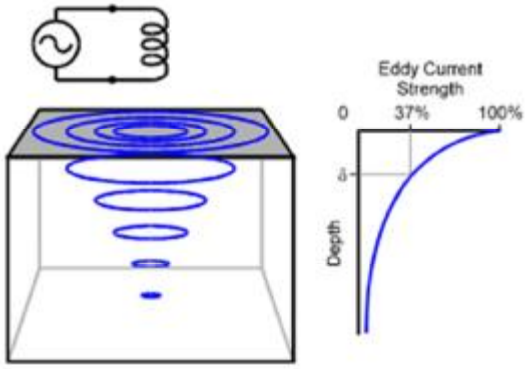
$$\boldsymbol{J_x/J_o \propto sin(\omega t - X/\delta)} \tag{2.37}$$

การเพิ่มของเวลาหรือความล้าหลังของเฟสในสัญญาณซายน์กับความลึก

เมื่อ δ คือ ความซึมซาบได้ของแม่เหล็กสัมพัทธ์(Relative Magnetic Permeability) มีค่าตามสมการ (2.38)

2.8.4 ความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม (Standard Depth of Penetration)

การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไหลวนแบบ Semi-Infinite ถูกพบว่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะมีค่าสูงสุดที่ผิวหน้าของชิ้นงาน และลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลขึ้นอยู่กับความลึกตามที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไหลวนต่อความลึก

ที่ระยะความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม (Standard Depth of Penetration) δ ความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะเหลือเพียง *I/e* หรือ 36.8% $\approx$ 37% ของความหนาแน่นกระแสไหลวนที่ผิวหน้าชิ้นงาน ค่าความลึกมาตรฐานในการแทรกซึมสามารถหาได้จาก

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} = 50\sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \text{ , mm} \qquad (2.38)$$

$$\delta_c = 2\sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \text{, inches} \qquad (2.39)$$

เมื่อ σ_c คือ ความนำไฟฟ้า (Conductance) หน่วยโมห์ (mho)

μ คือ ความซึมซาบได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) หน่วยเฮนรีต่อเมตร (H/m)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หน่วย ไมโครโอมห์- เซนติเมตร ($\mu\Omega \cdot$ cm)

μ_r คือ ความซึมซาบได้ของแม่เหล็กสัมพัทธ์(Relative Magnetic Permeability) หน่วยเฮนรีต่อเมตร

f คือ ความถี่ หน่วย เฮริทซ์ (Hz)

ที่ความลึกมากกว่า 3δ ถือว่าไม่มีกระแสไหลวน การปรับค่าความถี่ของกระแสเพื่อกำหนดความลึกของการแทรกซึมที่ต้องการ เป็นระดับความลึกที่มีความหนาแน่นของกระแสไหลวนมีค่าเท่ากับร้อยละ 5 ของความหนาแน่นที่ผิว ระยะห่างระหว่างหัวตรวจสอบกับชิ้นงานตรวจสอบ(Lift Off) เมื่อขดลวดห่างจากผิวงานมากขึ้น ปริมาณกระแสไหลวนจะลดลงตามความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ลดลง

ค่าความต้านทานไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์R มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่Georg Simon Ohm ซึ่งเป็นบุคคลแรกที่เสนอรายงานการทดลองเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในปี 1826 กฎของโอห์มแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า (V) , กระแสไฟฟ้า (I) และความต้านทาน (R) ไว้ดังนี้

$$R = \rho\frac{L}{A} \qquad (2.40)$$

เมื่อ ρ = ค่าคงตัว เรียกว่า สภาพต้านทาน (Resistivity) มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot$ m)

L = ความยาวของเส้นลวด มีหน่วยเป็น เมตร

A = พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็นตารางเมตร

ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวัตถุ วัตถุที่มีความต้านทานต่ำจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่าย เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้าในขณะที่ฉนวนไฟฟ้ามีความต้านทานสูงมากและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก

ส่วนกลับของค่าความต้านทานเรียกว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) มีหน่วยเป็นซีเมนส์(S) โดยที่ 1 MS/m = 1 m/($\Omega \cdot mm^2$) วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้แก่วัสดุจำพวกโลหะเพราะเนื้อโลหะมีอิเล็กตรอนที่สามารถไหลเคลื่อนนำ ไฟฟ้าได้ง่ายเมื่อถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าที่แม้ว่าจะมีขนาดน้อย ๆ ก็ตามในกลุ่มโลหะทองแดง (Cu) จัดเป็นโลหะที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าดีมาก เนื่องจากเป็นโลหะสามัญในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ทองแดงเป็นตัวอ้างอิง

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{2.41}$$

เมื่อ σ = Electrical Conductivity S/m

ρ = Electrical Resistivity ($\Omega \cdot m$ หรือ $\mu\Omega \cdot cm$)

ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity (% IACS))

เมื่อต้องการเปรียบเทียบความสามารถในการนำไฟฟ้าของโลหะใดๆ กับทองแดง หน่วยที่ใช้เปรียบเทียบ ก็คือ เปอร์เซ็นต์ IACS (international annealed copper standard) คือ ค่าที่คำนวณจากร้อยละของค่ามาตรฐานสำหรับทองแดงอบอ่อนสำหรับจุดประสงค์ทางไฟฟ้า โดยทองแดงที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร 0.01724 $\mu\Omega \cdot m$ ที่อุณหภูมิ 20°C สอดคล้องกับสภาพนำไฟฟ้า 100 เปอร์เซ็นต์ [26]

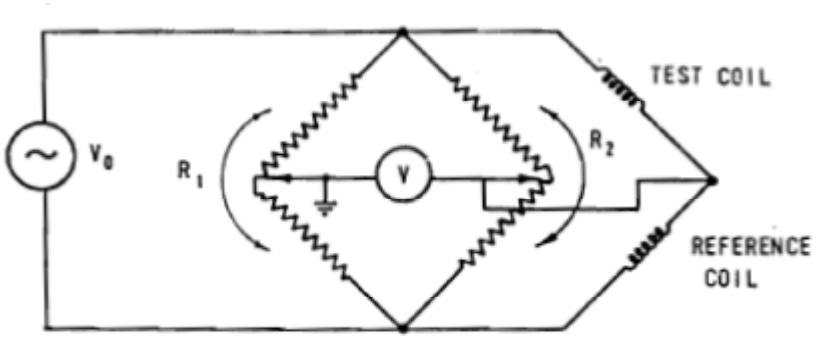
$$\sigma_{\%IACS} = \frac{172.41}{\rho} \tag{2.42}$$

เมื่อ $\sigma_{\%IACS}$ = % การเปรียบเทียบอ้างอิงกับทองแดงอบอ่อน

ρ = Electrical Resistivity ($\mu\Omega \cdot cm$), SUS 304 = 72 $\mu\Omega \cdot cm$

วงจรบริดจ์ (Bridge Circuit)

คือวงจรไฟฟ้าที่อาศัยหลักการสมดุลค่าความต่างศักดิ์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดเอาต์พุตเทียบกับกราวด์ วงจรบริดจ์มีการทำงานโดยใช้หลักการชี้ค่าศูนย์(Null-indicator) ทำให้มีค่าความแน่นอนสูงมาก ปกติวงจรบริดจ์ถูกนำไปใช้เป็นวงจรที่เกี่ยวข้องกับการวัด และระบบควบคุม โดยใช้ขนหนึ่งของวงจรบริดจ์เป็นจุดติดตั้งเซ็นเซอร์ (Sensor) หรือตัวทรานสดิวเซอร์ (Transducer) การใช้งานวงจรบริดจ์สามารถนำไปวัดตัวแปรอิมพีแดนซ์ที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงๆ ได้ ตามรูปที่ 2.11 เมื่อลากหัวตรวจสอบผ่านชิ้นงานที่มีสมบัติไม่เหมือนกันทำให้กระแสที่ไหลในแต่ละแขนของวงจรบริดจ์มีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.11 วงจรบริดจ์ที่ใช้ในเครื่องมือวัดกระแสไหลวน[]

2.8.5 อิมพีแดนซ์ของหัวตรวจสอบ

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดที่ถูกขดให้เป็นวงแตกต่างจากกระแสที่ไหลผ่านลวดเส้นตรง การแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของจึงแตกต่างกันด้วย ระนาบอิมพีแดนซ์เป็นสื่อแสดงลักษณะของชิ้นงานทดสอบ ขดลวดภายในหัวตรวจสอบจะมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน $Z = R+jX_L$ เมื่อนำไปวิเคราะห์ในวงจรปฐมภูมิที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า V_R คร่อมความต้านทาน R มีลักษณะของเฟสที่ตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหล แต่แรงดันไฟฟ้า V_L ที่คร่อมอินดักเตอร์ L จะมีเฟสนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ 90 องศา เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเป็นหลัก และแรงดันไฟฟ้ารวม V_T จะมีเฟสนำกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 90 องศา

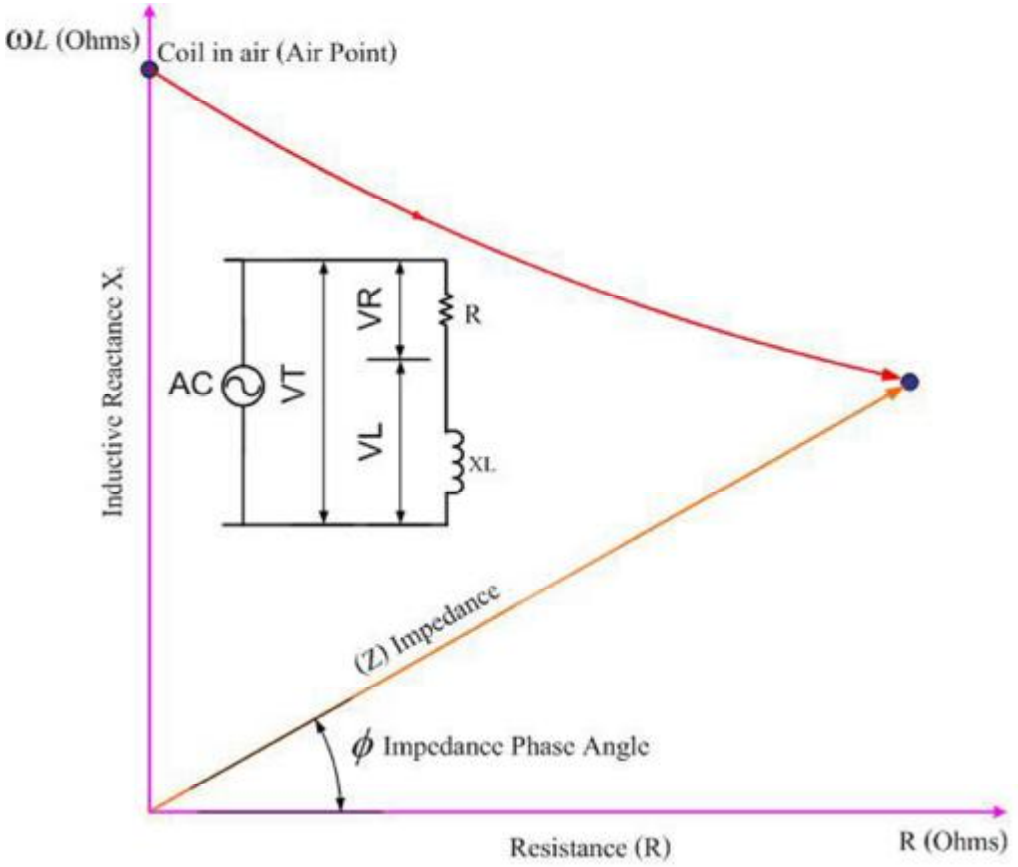
$$V_T=V_R+jV_L = IR+jIX_L = I(R+i\omega L) \tag{2.43}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{V_L}{V_R} = \tan^{-1}\frac{X_L}{R} = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} \tag{2.44}$$

ซึ่งความดันสัมพันธ์จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่2.8 เป็นแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor) ของแรงดันไฟฟ้า และรูปที่ คือแผนภาพเฟสเซอร์ของอิมพิเดนซ์ ของหัวตรวจสอบ ทั้งนี้ความยาวของเวกเตอร์ $\overrightarrow{OP}$ คือขนาดของอิมพิแดนซ์

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \tag{2.45}$$

มีหน่วยเป็นโอห์ม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือรีแอกแตนซ์เนื่องจากความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ส่งผลทำให้ตำแหน่งจุดปลายของเวกเตอร์ $\overrightarrow{OP}$ มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเรียกจุดนี้ว่าจุดทำงาน (Operating Point) มีเฟสนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ 90° เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเป็นหลัก และแรงดันไฟฟ้ารวม V_T จะมีเฟสนำกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 90° ส่งผลให้จุดปลายของเวกเตอร์ OP มีการเปลี่ยนแปลง จุดปลายของเวกเตอร์นี้ถูกเรียกว่า จุดทำงาน(Operating Point) ตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ กับขนาดและทิศทางของค่าอิมพีแดนซ์

ขวดลวดหัวตรวจสอบเมื่อเข้าใกล้ชิ้นงานสามารถพิจารณาเสมือนเป็นขวดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) และจะเหนี่ยวนำชิ้นงานให้เกิดกระแสไหลวนซึ่งเปรียบเสมือนเป็นขวดลวดทุติยภูมิที่มีเพียงหนึ่งรอบโดยกระแสไหลวนก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งต้านกับสนามแม่เหล็กของขวดลวดปฐมภูมิ และมีวิธีการที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวน คือ การวัดอิมพิแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลลวดปฐมภูมิ และสำหรับวิธีการตรวจสอบโดยวิธีการรับส่งซึ่งใช้ขดลวดสองขด โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำจากขดลวดตัวส่งจะถูกตรวจสอบจากการวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดตัวรับขดที่สองดังแสดงในรูปที่

จากวงจรหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิ(ขดลวดตรวจสอบ) และขดลวดทุติยภูมิ (ชิ้นงานตรวจสอบ) สามารถทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายโดยศึกษาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit)

$$Z_p = \frac{N_p^2 R_s X_0^2}{\left(N_p^2 R_s\right) X} + i\frac{\left(N_p^2 R_s\right)^2 X}{\left(N_p^2 R_s\right)^2 X} \tag{2.46}$$

สำหรับหัวตรวจสอบและเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนนั้นมีเงื่อนไขการตรวจสอบแต่ละชุดแตกต่างกันดังนั้นเพื่อให้การตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ สามารถเปรียบเทียบกันได้จึงทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันโดยเปรียบเทียบกับถือเป็นค่า รีแอกซ์แดนซ์ จากการเหนี่ยวนำในอากาศซึ่งถูกเรียกว่า นอร์มอลไลซ์อิมพีแดนซ์ (Normalized Impedance)

เมื่อกำหนดให้ $$A = \left(\frac{X_0}{N_p^2 R_s}\right) \tag{2.47}$$

2.8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของขดลวดตรวจสอบกับสมบัติของชิ้นงานตรวจสอบ

การตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ด้วยอิมพีแดนซ์ของขดลวดสามารถวิเคราะห์ได้ หน่วยที่ได้เช่นเดียวกับหน่วยตวามต้านทน คือ โอห์ม

การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของขดลวดตรวจสอบเป็นการวิเคราะห์ถึงอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปของขดลวดตรวจสอบ เช่น เส้นโค้งการเหนี่ยวนำ(Conductivity curve) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ การเพิ่มความต้านทานของชิ้นงานตรวจสอบและข้อกำหนดของหัวตรวจสอบ

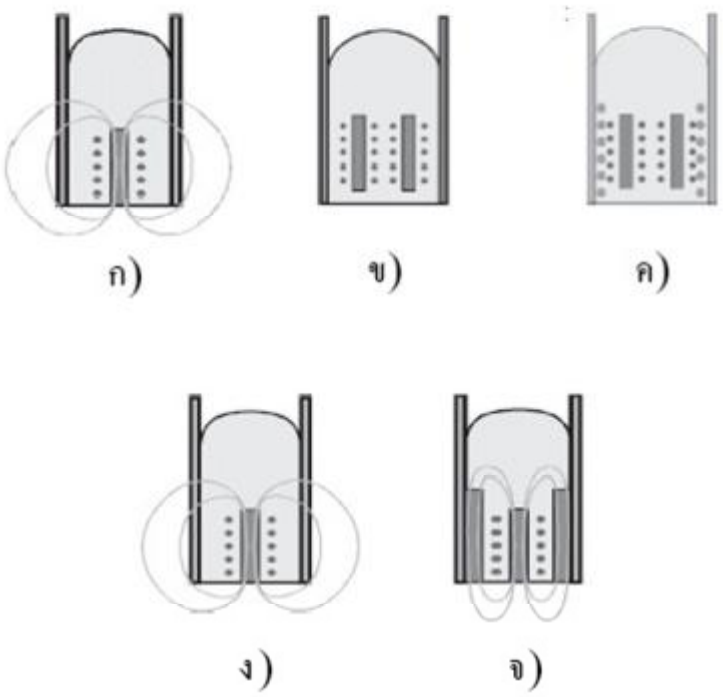
ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆในการตรวจสอบอิมพิแดนซ์ของขดลวดสามารถวิเคราะห์ได้จากจากสมการของ Zp ในวงจรสมมูล ซึ่งปัจจัยใดทำให้เทอม $\frac{X_0}{N_p^2 R_s}$ มีค่าลดลง ทำให้จุดทำงานเคลื่อนที่ขึ้นลงตามเส้นโค้งอิมพิแดนซ์ ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยได้ดังนี้

ถ้าการเชื่อมต่อทางเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างหัวตรวจสอบกับชิ้นงานลดลงเนื่องจากระยะห่างของหัวตรวจสอบกับชิ้นงานมากขึ้น หรืออัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบ หรืออัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อลดลง ขนาดของเส้นโค้งอิพิแดนซ์จะมีค่าลดลง

2.8.7 ประเภทของหัวตรวจสอบ (Probe) [10]

หัวตรวจสอบกระแสไหลวนมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานและการประกอบออกเป็น 5 ชนิดด้วยกัน

1. แบบสมบูรณ์ (Absolute)
2. ความแตกต่าง (Different)
3. สะท้อน (Reflection)
4. แบบเปลือย (Unshielded)
5. ฝาครอบ (Shielded)



รูปที่ 2.13 ลักษณะหัวตรวจสอบ

ก) แบบสมบูรณ์

ข) ความแตกต่าง

ค) สะท้อน

ง) แบบเปลือย

จ) ฝาครอบ

หัวตรวจสอบแต่ละชนิดมีความไวในการตรวจสอบ และมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน การเลือกหัวตรวจสอบและคอยล์แต่ละชนิดให้ถูกต้องและเหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบด้วย คือส่วนที่มีความสำคัญของการใช้งานกระแสไหลวน ไม่มีเครื่องมือใดที่ทำงานสำเร็จถูกต้อง ถ้าไม่ได้รับสัญญาณที่ถูกต้องจากหัวตรวจสอบ เราจะแบ่ง หัวตรวจสอบตามลักษณะการทำงาน (Mode of Operation) ออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- หัวตรวจสอบชนิดรวมหรือ Absolute Probe ประกอบด้วยขดลวดได้โดยตรง จะเหมาะสำหรับการแยกแยะเหล็ก และการตรวจจับ Crack รูปแบบที่มากมายมาก อย่างไรก็ตามพวกเครื่องมือประเภทนี้จะมีความไวต่อวัตถุการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และอื่นๆ
- หัวตรวจสอบแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential probe) นี้ ประกอบด้วยขดลวดรูปทรงกระบอกสองขดซึ่งพันด้วยลวดทองแดงเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า และพันในทิศทางที่

ตรงกันข้าม ทิศทางการพันลวดทองแดงที่แตกต่างกันทำให้สามารถวัดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองขดลวดนี้ได้ และทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างนั้นออกมาซึ่งค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากมีการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไปแล้ว หัวตรวจสอบแบบนี้จะไม่มีผลต่ออุณหภูมิของชิ้นงาน สามารถแสดงผลให้เห็นถึงความแตกต่างของเฟสรวมถึงความลึกของความบกพร่อง ซึ่งแสดงผลอยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ นอกจากนี้หัวตรวจสอบแบบดิฟเฟอเรนเชียลมีความไวในการตรวจสอบสูงกว่าชนิดแรก จึงมีความเหมาะสมสำหรับการค้นหาความบกพร่องของวัสดุเล็กๆมากว่าหัวตรวจสอบแบบอื่น

การวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนอยู่บนพื้นฐานของการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือความซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุ (Magnetic Permeability) ที่ถูกตรวจสอบ จากการวิจัยพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในกระแสไหลวนเป็นผลรวมของค่าความเค้นตกค้าง โครงสร้างจุลภาค (Micro Structure) ความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งของแนวผลึก (Density of Locations) สามารถถูกอธิบายความสัมพันธ์โดยรวมในสภาพแวดล้อมตามสมการที่ 2.48 นี้ [14]

$$\sigma(f)_{measured}=\sigma(f)_{residual\ stress}-\sigma(f)_{gain\ size}+\sigma(f)_{precipitation}\pm\sigma(f)_{dislocation\ (Cold\ work)} \qquad (2.48)$$

เมื่อ $\sigma(f)_{measured}$ ผลรวมค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่ความถี่สัมพันธ์กับความลึกในการผ่านเข้
(penetration Depth)

$\sigma(f)_{residual\ stress}$ ค่าการนำไฟฟ้าโดยความเค้นตกค้างภายในปริมาตรที่ถูกวั

$\sigma(f)_{gain\ size}$ ค่าการนำไฟฟ้าของขนาดของเกรน

$\sigma(f)_{precipitation}$ ค่าการนำไฟฟ้าของรูปร่าง และปริมาณการตกผลึก

$\sigma(f)_{dislocation\ (Cold\ work)}$ ค่าการนำไฟฟ้าของการเปลี่ยนตำแหน่งของแนวผลึก

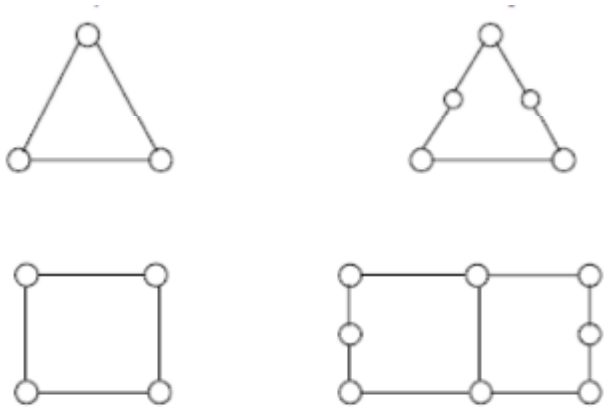
โครงสร้างจุลภาค เป็นการพิจารณาในระดับอะตอมของโมเลกุล ลักษณะทางกายภาพและโลหะวิทยาที่มีผลต่อการทดสอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

- รูปร่างลักษณะ และความหนาของงาน
- ระยะห่างระหว่างงานและขดลวด
- การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมี
- โครงสร้างจุลภาค
- อุณหภูมิ
- ความเค้นตกค้าง

การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่าความเค้นตกค้าง กล่าวคือ ค่าการนำไฟฟ้าสูงตามค่าความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นในเนื้อวัสดุ

2.9 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการใช้ระเบียบวิธีคิดทางตัวเลขเพื่อหาค่าผลลัพธ์วิธีการนี้เป็นที่ยอมรับกันโยทั่วไป ปัจจุบันโปรมแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีมากมาย งานวิจัยนี้เลือกการวิเคราะห์แบบจำลอง(Simulation Analysis) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัยโปรแกรม COMSOL ช่วยในการคำนวณ และการวิเคราะห์ประมวลผลด้วยโปรแกรม COMSOL ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงออกมาในลักษณะรูปภาพ แต่ละเอลิเมนต์จะถูกเชื่อมต่อกันเป็นจุดต่อ (Nodes) ที่จะทำการคำนวณ (Solve) หาค่าตัวแปรตามต้องการ การหาการกระจายความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานอันเนื่องมาจากอุณภูมิ ในชิ้นงานโลหะ คือการแบ่งชิ้นงานโลหะออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ แบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ชิ้นส่วนรูปทรงเรขาคณิตตามหลักการของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

หลักการของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ กล่าวอย่างง่ายๆ ก็คือ เราทำการเติมรูปทรงของผลิตภัณฑ์ ด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ ที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ เป็นต้น เนื่องจากเราสามารถคำนวณหาคำตอบที่แน่แท้ของชิ้นส่วนที่มีรูปทรงเรขาคณิตได้ ดังนั้นเมื่อ เราเติมชิ้นส่วนเล็กๆหล่านี้ลงไปในชิ้นส่วนใหญ่ เราก็สามารถศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของระบบได้แม่นยำมากขึ้น

2.10 การวิเคราะห์ระบบการวัด [11]

การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis–MSA) คือวิธีการที่ใช้ในการชี้บ่งความผันแปร (Variation) ที่เกิดขึ้นในการวัด ซึ่งสามารถที่จะบอกปริมาณผลกระทบของความผิดพลาดในการวัดได้ และทำให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความเหมาะสมพอที่จะเอาไปใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากระบบการวัดจะมีความผันแปรตามองค์ประกอบสำคัญคือ ค่าความผันแปรจากกระบวนการผลิต และความผันแปรเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด ดังสมการ (2.49)

$$\sigma^2_M = \sigma^2_P + \sigma^2_e \qquad (2.49)$$

ความผันแปรในระบบการวัดจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ความผันแปรทางตำแหน่ง (Location Variation) เป็นคุณสมบัติที่สัมพันธ์กับความแม่นยำ (Accuracy) ของค่าที่วัดได้ แบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ
   - Bias หรือ ความเอนเอียง
   - Stability หรือ ความมีเสถียรภาพ
   - Linearity หรือความเป็นเชิงเส้น

2. ความผันแปรทางความกว้าง (Width Variation) เป็นคุณสมบัติที่สัมพันธ์ความเที่ยงตรง (Precision) ของค่าที่วัดได้ แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ
   - Repeatability หรือความสามารถในการวัดซ้ำ
   - Reproducibility หรือ ความสามารถในการให้ผลซ้ำ

เพื่อที่แยกออกได้เป็นความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และความสามารถในการทำให้เกิดใหม่ (Reproducibility)

Repeatability เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการอ่านซ้ำของเครื่องมือวัด โดยจะต้องใช้คนทำการวัดคนเดียว งานตัวเดียวบนสภาวะแวดล้อมเดียวกัน วัดซ้ำบนเครื่องมือวัดนั้นหลายๆครั้ง เพื่อดูว่าค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งนั้นใกล้เคียงกันหรือไม่ เป็นการตรวจเช็คประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด

Reproducibility เพื่อที่จะดูว่าภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน เครื่องมือวัดเครื่องเดียวกัน และชิ้นงานเดียวกัน แต่ทำการเปลี่ยนคนวัด ค่าที่วัดออกมาจะยังคงเชื่อถือได้หรือไม่ เป็นการตรวจเช็คประสิทธิภาพของคนวัด

ในการวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะความผันแปรทางความกว้างหรือการศึกษา GR&R (Gage Repeatability & Reproducibility) เรียกสั้นๆโดยทั่วไปว่า R&R เป็นการประเมินผลระบบการวัดเพื่อทราบความแม่นยำของระบบการวัดวิเคราะห์แยกแยะสาเหตุความผันแปรของความกว้างที่เกิดขึ้นในระบบการ

วัด เนื่องจากการควบคุมกระบวนการผลิตใดๆ ผู้ควบคุมการผลิตมีความจำเป็นต้องทำการจัดการระบบการวัดให้มีความน่าเชื่อถือให้มากที่สุด GR&R เป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่แสดงผลออกมาในเชิงการวัดความสามารถของระบบการวัด โดยปกติผู้ควบคุมต้องทำให้ค่าGR&R จากระบบการวัดนั้นๆ ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หากค่าGR&R ยิ่งสูงจะแสดงว่าระบบการวัดด้อยประสิทธิภาพส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดไม่น่าเชื่อถือ และส่งผลโดยตรงกับการตัดสินใจควบคุมกระบวนการผลิต GR&R ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ

1. Repeatability
2. Reproducibility

ทั้งนี้ระบบการวัดหรือเครื่องมือวัดใดๆ ไม่สามารถวัดได้ค่าเดิมตลอดเวลา ระบบจะมีความผันแปรแฝงอยู่ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักๆ 5 ตัว คือ

1) มาตรฐาน
2) ชิ้นงาน
3) เครื่องมือ
4) คนวัด และ
5) สภาพแวดล้อม

ตัวแปรสำคัญ 5 ตัวเป็นตัวที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัด(Measurement error) และส่งผลโดยตรงกับค่าRepeatability และ Reproducibility มีความผันแปรแปรอยู่ 3 ตัวที่เกี่ยวพันกับค่า GR&R จะประกอบด้วย

1. EV (Equipment Variation) เป็นค่าความผันแปรของเครื่องมือ เกิดจากการวัดซ้ำหลายรอบของงานชิ้นเดิม คนวัดคนเดิม
2. AV (Appraiser Variation) เป็นค่าความผันแปรของคนวัด เกิดจากการเปลี่ยนคนวัดหลายๆ คน โดยใช้ชิ้นงานเดิม และเครื่องมือวัดเครื่องเดียวกัน
3. PV (Part Variation) เป็นค่าความผันแปรของตัวงานที่เกิดจากระหว่างตัวงานหลายๆชิ้น หรือหลายๆ ตำแหน่ง

การศึกษา GR&R ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงมากในเรื่องนี้ก็คือการสอบเทียบเครื่องมือ ความสามารถของคน จำนวนตัวอย่างที่จะเก็บมาศึกษา ปกติใช้ประมาณ10 การลดความผันแปรสามารถทำได้ด้วยการวัดซ้ำ และการประเมินผลการวิเคราะห์GR&R สามารถดำเนินการได้ 3 วิธีคือ

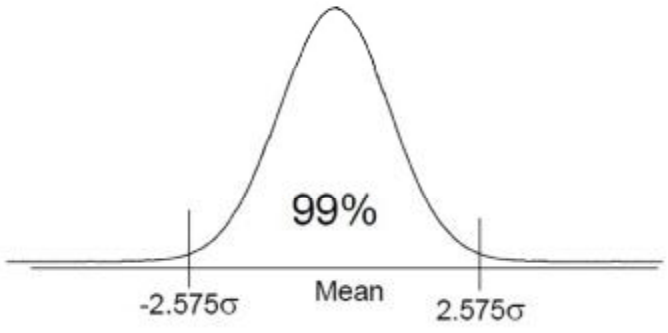
1.วิธีพิสัย (Range Method) เหมาะกับการทดลองวัดค่าในช่วงสั้นๆ และไม่มีการวัดซ้ำ มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถแยก Repeatability กับ Reproducibility ออกจากกันได้ วิธีนี้ถือว่าค่อนข้างหยาบ มองไม่เห็นภาพอะไรนัก

2.วิธีค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and Range Method) เหมาะสำหรับการวัดซ้ำ สามารถแยก Repeatability ออกจาก Reproducibility ได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมกันระหว่างชิ้นงานที่วัดและพนักงานผู้ทำการวัดออกจากค่า Repeatability ได้

3. ANOVA Method : สามารถแยกตามความผันแปร จากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานที่วัดและพนักงานผู้ทำการวัดออกจากค่า Repeatability ได้ แต่เป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และตีความยากอีกด้วย

การวิเคราะห์ความผันแปรเป็นวิธีการที่แบ่งความแปรปรวนของข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ โดยแยกความผันแปรทั้งหมดของข้อมูลออกตามสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผันแปรเหล่านั้น คือ แบ่งความผันแปรทั้งหมดออกเป็นความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Between Group) กับความผันแปรภายในกลุ่ม (Within Group) แล้วนำเอาความผันแปรระหว่างกลุ่มมาเปรียบเทียบกับความผันแปรภายในกลุ่ม

ในระบบควบคุณคุณภาพ QS 9000 กำหนดช่วงที่ระดับความเชื่อมั่น99% หรือ 5.15σ ของการวัดซ้ำ หลังจากนั้นจึงประมาณค่าความสามารถ ของระบบการวัดดังแสดงในตารางที่2.2



รูปที่ 2.15 ช่วงระดับความเชื่อมั่นในรูปแบบการกระจายตัวปกติ

ตารางที่ 2.2 การประมาณการค่าความผันแปรของความสามารถของระบบการวัด

ความผันแปร	ตัวแบบสุ่ม	ตัวแบบผสม
EV	$5.15\sqrt{MS_{pool}}$	$5.15\sqrt{MS_{pool}}$
AV	$5.15\sqrt{\frac{MS_O - MS_{pool}}{nr}}$	$5.15\sqrt{\frac{MS_O - MS_{pool}}{nr}}$
GR&R	$\sqrt{EV^2 + AV^2}$	$\sqrt{EV^2 + AV^2}$
PV	$5.15\sqrt{\frac{MS_p - MS_{pool}}{kr}}$	$5.15\sqrt{\frac{MS_p - MS_{pool}}{kr}}$
เมื่อ	$MS_{pool} = \frac{SS_E + SS_{OP}}{nkr - n - k + 1}$	

การวิเคราะห์ความผันแปรอาศัยหลักการทางสถิติหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความแตกต่างของข้อมูลแต่ละตัวกับตัวกลางเลขคณิตของข้อมูลชุดนั้น บางครั้งใช้สัญลักษณ์แทนด้วย SD ตามสมการที่ 2.50

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2}{N}} \tag{2.50}$$

เมื่อ SD คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

X คือค่าของข้อมูลแต่ละตัวหรือจุดกึ่งกลางชั้นแต่ละตัว

$\bar{X}$ คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดของกลุ่มตัวอย่าง

2.11 ความไม่แน่นอนในการวัด [12]

ในการตรวจวัดปริมาณทางกายภาพใดๆ สิ่งที่สำคัญต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นและความผิดพลาดนี้จะอยู่ตลอดไป ไม่เคยมีและจะไม่มีกรณีที่มีคนวัดตัวแปรและได้รับค่าที่แท้จริงของตัวแปรนั้น ในการตรวจวัดนั้นความผิดพลาดคือผลต่างของค่าที่แท้จริงกับค่าที่วัดได้ของตัวแปร แต่การวัดค่าตัวแปรในกระบวนการต่างๆ ไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของตัวแปรนั้นได้ ดังนั้นจึงมีวิธีการที่ใช้ในการประมาณความผิดพลาดที่เป็นไปได้ในการวัดเพื่อหาค่าความผิดพลาดที่แท้จริง ค่าประมาณนี้เรียกว่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าที่วัดได้ความไม่แน่นอนคือช่วงที่ใกล้เคียงกับค่าของตัวแปรที่ถูกวัดซึ่งคาดค่าที่แท้จริงของตัวแปรนั้นจะอยู่ในช่วงนี้ เพื่อกำหนดหรือบอกว่าในการวัดแต่ละครั้งมีความผิดพลาดมากน้อยขนาดไหน ซึ่งความไม่แน่นอนคือการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดซึ่งคาดว่าความผิดพลาดจะอยู่ในช่วงนั้นภายใต้ชุดของเงื่อนไขที่กำหนดให้ โดยเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการวัดความไม่แน่นอนไม่ใช่ความผิดพลาดเป็นเพียงการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดนั้น การรายงานผลการวัดจะรายงานผลของการวัดรวมกับค่าความไม่แน่นอน โดยการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดแบ่งเป็นสองส่วน คือความไม่แน่นอนแบบสุ่มและความไม่แน่นอนของระบบ

2.11.1 ความผิดพลาดแบบสุ่มและความไม่แน่นอนแบบสุ่ม

ในการวัดแหล่งกำเนิดของความผิดพลาดจะถูกรวมเข้าไปเป็นส่วนประกอบของผลลัพธ์ที่เป็นตัวไม่ทราบค่า ถ้าการวัดทำซ้ำภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่คงที่ผลลัพธ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงหรือเบี่ยงเบนในรูปแบบที่ไม่แน่นอนนั้นหมายความว่าส่วนประกอบของความผิดพลาดที่ถูกรวมเข้าไปในการวัดครั้งที่ 2 จะไม่มีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบของความผิดพลาดในครั้งแรก ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่ม

ความไม่แน่นอนเป็นการประมาณขีดจำกัด หรือขอบเขตของความผิดพลาดด้วยระดับความเชื่อมั่นค่าหนึ่ง คือการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดซึ่งคาดว่าความผิดพลาดจะอยู่ในช่วงนั้น ภายใต้ชุดของเงื่อนไขที่กำหนดให้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการวัดความไม่แน่นอนไม่ใช่ความผิดพลาดเป็นเพียงการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดเท่านั้น การรายงานผลของความไม่แน่นอนเขียนได้คือ $\pm$ 2 มม. หรือ $\pm$ 1Bar

2.11.2 ความผิดพลาดระบบ และความไม่แน่นอนระบบ

2.11.2.1 ความผิดพลาดระบบ

คือความผิดพลาดซึ่งเกิดขึ้นโดยมีความสม่ำเสมอและประมาณคงเดิม ในการวัดค่าของปริมาณเดียวกันซ้ำๆ กัน ซึ่งอาจเกิดจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความสั่นสะเทือน สัญญาณรบกวนที่ปนมากับแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น และส่งผลต่อการทำงานของเครื่องมือวัด หรือจากตัวเครื่องมือวัดเอง เช่น ความฝืดของกลไกการทำงานในเครื่องมือวัดที่มีกลไกเป็นส่วนประกอบ ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำลดลงเนื่องจากใช้งาน หรือคุณสมบัติประจำตัวเป็นต้น

ความผิดพลาดเหล่านี้ถึงแม้จะทราบแหล่งที่ก่อให้เกิดอยู่บ้าง แต่การหาปริมาณความผิดพลาดแน่นอนจากแต่ละแหล่งเป็นเรื่องยากมาก ถึงแม้ผลรวมความผิดพลาดทั้งหมดมีความเป็นไปได้ที่มีค่าสม่ำเสมอ แต่ความผิดพลาดจากแต่ละแหล่งจะไม่ส่งผลความผิดพลาดอย่งสม่ำเสมอ ความผิดพลาดระบบเป็นค่าคงตัวสำหรับช่วงของการทดลอง และมีผลต่อทุกๆ การวัดของตัวแปรด้วยปริมาณที่เท่ากันเราไม่สามารถสังเกตความผิดพลาดระบบในข้อมูลการวัดได้ แต่สำหรับระบบการวัดที่ได้มีการตั้งเป้าไว้แล้วผู้วัดจะสังเกตเห็นความผิดพลาดระบบ (เช่น การวัดเพื่อการสอบเทียบเครื่องมือวัด) จะไว้ว่าผู้ทำการทดลองจะไม่เห็นเป้าหมายของการทดลองแต่สมมุติว่าเป้าหมายที่ต้องการคือค่าเฉลี่ยของการวัด

2.11.2.2 ความไม่แน่นอนระบบ

นอกจากค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม ยังมีค่าแก้เนื่องจกผลการวัดที่ปรากฏในรายงานผลการสอบเทียบที่สอบย้อนไปยังมาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างประเทศ ค่าแก้เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการการวัดและการสะสมค่าที่อ้างถึงความไม่แน่นอนระบบ ความไม่แน่นอนระบบคือความไม่แน่นอนที่ยังคงที่ระหว่างการวัดที่เหมือนกันชุดหนึ่งไม่สามารถลดลงโดยการวัดซ้ำแล้วเฉลี่ยผลการวัดหรือเปลี่ยนแปลงในทางที่ทำนายได้เมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนไป เช่น

- ค่าความไม่แน่นอนในผลการสอบเทียบของมาตรฐานอ้างอิงหรือเครื่องมือที่ใช้
- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเปลี่ยนสภาพไปตามเวลาของมาตรฐานอ้างอิงหรือเครื่องมือที่ใช้
- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการแทรกค่าประมาณระหว่างจุดที่ได้รับการสอบเทียบของมาตรฐานอ้างอิงหรือเครื่องมือที่ใช้
- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความถี่ในช่วงใช้สอบเทียบแตกต่างจากความถี่ที่ได้รับการสอบเทียบของมาตรฐานอ้างอิงหรือเครื่องมือที่ใช้
- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแตกต่างของเงื่อนไขที่มีอิทธิพลในช่วงที่ใช้สอบเทียบกับในช่วงที่ได้รับการสอบเทียบของมาตรฐานอ้างอิง

2.11.3 ความไม่แน่นอนทั้งหมด

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าถึงแนวคิดของความไม่แน่นอนแบบสุ่ม U_r และความไม่แน่นอนระบบ U_s โดยการประมาณความไม่แน่นอนจะใช้ช่วงความเชื่อมั่น $P\%$ เมื่อทำการประมาณค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มและความไม่แน่นอนระบบแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ U_r และ U_s จะนำค่ามารวมกันอย่างไรเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนทั้งหมดในการวัดตัวแปร

2.11.3.1 การหาความไม่แน่นอนตามมาตรฐาน มี 2 แบบ คือ

แบบที่1 เป็นการหาความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบรวมกันโดยตรง

เป็นการนำเอาค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มและไม่แน่นอนระบบรวมกันโดยตรงหาได้จากสมการ

$$U_{ADD} = U_r + U_s \tag{2.51}$$

เมื่อ U_{ADD} คือ ความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบบวก

U_r คือ ความไม่แน่นอนแบบสุ่ม

U_s คือ ความไม่แน่นอนระบบ

การรายงานผลขั้นสุดท้ายของการวัด คือ

$$(\overline{X} - U_{ADD}) \le \mu \le (\overline{X} + U_{ADD})$$

หรือ $$\overline{X} \pm U_{ADD}$$

ถ้าประมาณครอบคลุม 99% การรายงานผลการวัดจะเป็น

$$(\overline{X} - U_{99}) \le \mu \le (\overline{X} + U_{99})$$

หรือ $$\overline{X} \pm U_{99}$$

$$(\overline{X} - U_{RSS}) \le \mu \le (\overline{X} + U_{RSS})$$

หรือ $$\overline{X} \pm U_{RSS}$$

แบบที่2 เป็นการหาความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบรากที่สองของผลรวมกำลังสอง(RSS, Root-Sum-Square) การหาความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบRSS หาได้จากสมการ

$$U_{RSS} = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \tag{2.52}$$

เมื่อ U_{RSS} คือความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบรากที่สองของผลรวมกำลังสอง

Ur คือความไม่แน่นอนแบบสุ่ม

Us คือความไม่แน่นอนระบบ

2.11.3.2 ความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบ U_{ISO}

ในการหาความไม่แน่นอนตามรูปแบบของ ISO ต้องหา U_A และ U_B

ความไม่แน่นอนแบบ A

U_A หมายถึงความไม่แน่นอนที่หาได้โดยวิธีการทางสถิติคือความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (U_r) นั่นเองหาได้จาก

$$U_A = U_r = t_{e.v}.S_x = t_{e.v}.\frac{S_x}{\sqrt{n}} \tag{2.53}$$

ความไม่แน่นอนแบบ B

U_B หมายถึงความไม่แน่นอนที่หาได้โดยวิธีการอื่นๆ ที่ไม่ได้มาจากวิธีการทางสถิติซึ่งหมายถึงความไม่แน่นอนระบบ (U_S) นั่นเองหาได้จากสมการที่2.53

$$U_B = \frac{U_S}{2} \tag{2.54}$$

เนื่องจากการหาค่า U_S ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นั้นเป็นการประมาณสำหรับการกระจายแบบปกติและสมมติว่าทั้งสองข้างของค่าเฉลี่ยเท่ากันและสมมติว่าเป็น2Sx ในขณะที่รูปแบบของ U_{ISO} นั้นใช้ค่าISX ดังนั้นUB จึงเท่ากับครึ่งหนึ่งของUs

ความไม่แน่นอนทั้งหมดแบบU_{ISO} หาได้ตามสมการที่ 2.55

$$U_{ISO} = k\sqrt{U_A^2 + U_B^2} \tag{2.55}$$

เมื่อ U_A = Type A Uncertainty

U_B = Type B Uncertainty

k = คือค่าที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติเมื่อ n เข้าสู่อันนต์ซึ่งหาได้จากตาราง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พณพล ปั้นเงิน[5] ทำการศึกษาในหัวข้อ การประเมินค่าความเค้นตกค้างโดยการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) เพื่อนำมาใช้กับงานรับภาระสถิตย์ โดยออกแแบบชิ้นทดสอบด้วยโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน นำไปผ่านกระบวนการวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ850°C นาน 30 นาที และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว แล้วทำการวัดด้วยคลื่นความถี่สูงเปรียบเทียบการวัดด้วยวิธีเอ๊กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น จากงานวิจัยพบว่าค่าความเค้นตกค้างที่ถูกวัดโดยการใช้คลื่นความถี่สูงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ร้อยละ12 เมื่อเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการวัดด้วยวิธีเอ๊กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

ธนชาติ แกว่นธัญกรณ์ [13] ศึกษาความเค้นตกค้างในหัวข้อ การศึกษาความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมต่อแบบ ที เค วาย (TKY Welded Joints) โดยออกแบบรอยต่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานการเชื่อมโครงสร้างของ AWS D1.1 วัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด JIS G 3101 SS 400 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่แนวราก และเติมรอยเชื่อมให้เต็มด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์ และวัดความเค้นตกค้างหลังการเชื่อมด้วยวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู และทำนายค่าความเค้นตกค้างบนแบบจำลองจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสอดคล้องกับผลการวัดด้วยวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู

Hillmann S. และคณะ [14] ทำการศึกษาในหัวข้อ NEAR-SURFACE RESIDUAL STRESS-PROFILING WITH HIGH FREQUENCY EDDY CURRENT CONDUCTIVITY MEASURMENT ทำการศึกษาค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในInconel 718 ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Non-ferrous materials) และการนำไฟฟ้าต่ำในช่วงความลึก 50 - 500 ไมครอน ด้วยกระแสไหลวนความถี่สูงที่ความถี่ 100 kHz ถึง 100 MHz เพื่อเปรียบเทียบกับการวัดความเค้นตกค้างผลการทดลองพบว่ารูปกราฟแสดงค่าความนำไฟฟ้าสอดคล้องกับค่าความเค้นตกค้างที่ถูกวัดวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู กล่าวคือ ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามค่าความเค้นตกค้างที่เพิ่มขึ้น

Li Luming และคณะ [15] ทำการศึกษาในหัวข้อ Magnetic fields abnormality caused by welding residual stress ทำการศึกษาความเค้นตกค้างในชิ้นงานเชื่อมท่อด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ พบว่าความเค้นตกค้างในงานเชื่อมมีผลกระทบต่อความผิดปกติของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของโดเมน (Domains) สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามผิวหน้าของชิ้นงาน

Zergoug M.และคณะ [16] ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ความเค้นทางกลด้วยวิธีกระแสไหลวน (Mechanical Analysis By Eddy Current Method) จากการทดลองดึงชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด304L ด้วยแรง 8 kN ในช่วงความยืดหยุ่น และ 3 kN ในช่วงพลาสติกความยืดหยุ่น และทำการวัดค่า Impedance amplitude และเฟสของกระแสไหลวน สรุปว่า การวิเคราะห์ความต้านทาน (Z) ด้วยกระแสไหลวนจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ซึ่งถูกสังเกตได้ในวัสดุเนื่องจากความเสียหายในช่วงพลาสติก และความล้า

Khan S.H. และคณะ [17] ศึกษาความเปลี่ยนแปลงในเหล็กกล้าไร้สนิมหลังผ่านกระบวนการการรีดเย็น (Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction) ด้วยกระแสไหลวน พบว่าเฟสและการไหลของกระแสไหลวนมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น โดยวัดชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดAISI 304, AISI 316, AISI 321, และ12Ch21N5G2STL คณะวิจัยได้ให้ความเห็นว่าการวัดด้วยกระแสไหลมสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงปริมาณออสเทนไนต์ระหว่างการรีดเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิม

Sariel J. [18] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในการเชื่อมจุดด้วย GTA (Gas Tungsten Arc Welding) บนจานซึ่งทำด้วยวัสดุTi6AI4V และวัดค่าความเค้นตกค้างด้วย XRD เปรียบเทียบผลกับการระหว่างการด้วยวิธีสเตรนเกจแบบเจาะรู และการจำลองเชิงตัวเลข สรุปผลการทดลองจากวิธีการวัด และการจำลอง ลักษณะการกระจายของตัวมีลักษณะของความเค้นตกค้างมีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ ความเค้นแรงดึงอยู่ใกล้กับขอบบริเวณการหลอมละลาย และตกลงสู่ความเค้นอัดอย่างชัดเจนเมื่อระห่างออกจากบริเวณหลอมละลาย ก่อนกลับเข้าสู่ระดับปกติที่บริเวณขอบของจานทดลอง แต่ค่าความเค้นจากทั้งสามวิธีมีความแตกต่างกันบ้าง

บทที่ 3 การดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างภายในเพื่อใช้สอบเทียบสำหรับการวัดค่าความเค้นตกค้างแบบไม่ทำลายด้วยกระแสไหลวน โดยอาศัยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงต่อความเค้นแรงดึงเพื่อสร้าง Calibration curve และนำไปวัดค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่สร้างขึ้น โดยนำวิธีการทำนายความเค้นตกค้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM) และการวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวแบนของรังสีเอ็กซ์(XRD) มาใช้เพื่อพิสูจน์ว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นมีระดับค่าความเค้นตกค้างที่แตกต่างกันจริง ชิ้นงานที่สร้างขึ้นถูกนำมาใช้ในการประเมินความสามารถระบบการวัดค่าความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวน เพื่อสรุปผลและประเมินประสิทธิภาพการวัดค่าความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัย ในการศึกษาความเค้นตกค้าง ประกอบด้วยหัวข้อการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีของความเค้นตกค้าง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หลักการตรวจสอบกระแสไหลวน (Eddy Current)
3. สร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ศึกษาเทคนิคการวัดความเค้นด้วยXRD
5. ประเมินผลการวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องมือGR&R
6. หาความไม่แน่นอนในการวัด
7. วิเคราะห์ และสรุปงานวิจัย

3.2 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์ของบริษัท STRESSTECH รุ่น G2R
2. ชิ้นทดสอบซึ่งได้รับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด กระแส12 14 16 kA อย่างละ 1 ชิ้น
3. เครื่องทดสอบกระแสไหลวนแบบพกพา Locator3S รุ่น Serial No. HOCKING, Model: Phase 1.1, Serial No.: 25445-25
4. หัวตรวจสอบแบบ Shielded Surface Probe รุ่น 313P24 500 kHz
5. ชิ้นทดสอบแรงดึง และเครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU-AUTOGRAPH
6. คอมพิวเตอร์ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังนี้

   คอมพิวเตอร์ DELL รุ่น VOSTRO 1000

   AMD Athlon™ 64 X2 Memory (RAM) 2.00 GB 32-bit Operation System

   ระบบปฏิบัติการ วินโดวส์ Microsoft Windows Vista™ SP 2

3.3 การดำเนินการทดลอง

แบ่งออกแบบการทดลองส่วนคือ การออกแบบชิ้นทดสอบ และวิธีการวัด

3.3.1 การออกแบบชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบในงานวิจัย แบ่งได้เป็น2 ลักษณะ คือ

1. ชิ้นงานที่มีความตกค้างอยู่ภายใน
2. ชิ้นทดสอบแรงดึงภายใต้ภาระแบบสถิต

3.3.1.1 ชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างภายใน

ชิ้นงานถูกกำหนดให้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless Steel) เกรด SS 304 มีสมบัติเฉพาะตามตารางที่ 3.1 ทรงกระบอกหน้าตัด 5 ซม. หนา 1.2 ซม. ผิวเรียบสะอาด ไม่มีวัสดุเคลือบผิวตามรูปที่ 3.1 ทำการสร้างความเค้นตกค้างจากความร้อนโดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องเชื่อม ยี่ห้อ UTO รุ่น SI – 6 – 355T ใช้ไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ชนิดกระแสไฟฟ้าเชื่อมแบบกระแสสลับ ความถี่ 50 เฮริท์ ระบายความร้อนด้วยน้ำ และกดชิ้นงนด้วยระบบนิวส์แมติก ในการเชื่อมเลือกใช้อิเล็กโตรดทิพเชื่อมที่มีขนาดปลาย 6 มิลลิเมตร ชนิดที่ 2 (Copper-Chromium alloy) รูปแบบปลายเป็นแบบ Truncated Radius Type ตามรูปที่ 3.2

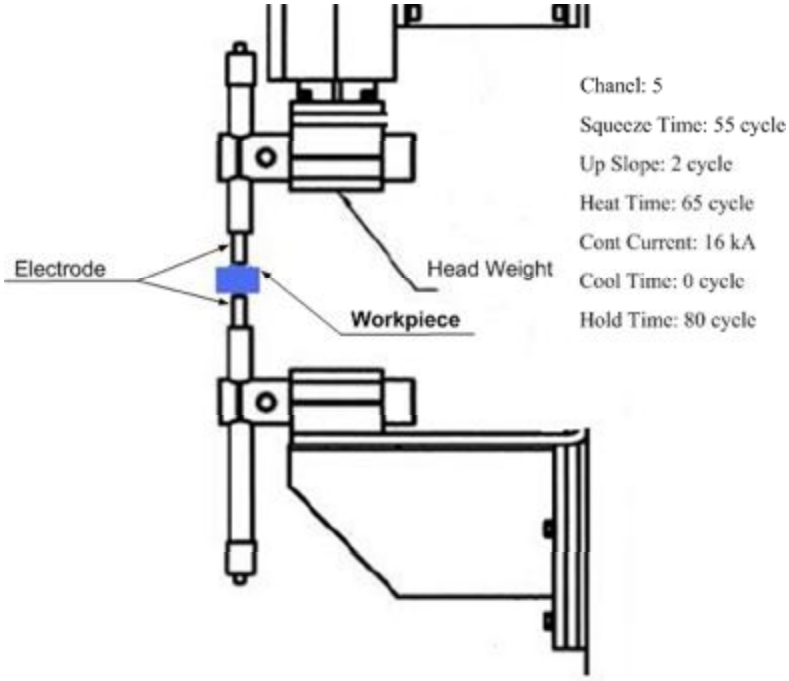
ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกล ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดSUS 304

ความหนาแน่น (Density)	8 g/CC
ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength)	215 MPa
Poisson’s Ratio	0.27-0.29
โมดูลัสความยืดหยุ่น Modulus of Elasticity (E)	193 GPa
Thermophysical Density (k)	7830 kg/m3
Specific Heat Capacity (c)	0.500 j/g-C 500 j/kg.k (j/kg.C)
การนำความร้อน Thermal Conductivity	16.2-21.5 W/m.K
ความต้านทานไฟฟ้า	72 $\mu\Omega$-cm
สัมประสิทธิ์การขยายตัวCoef. of Thermal Expansion (CTE)	$17x10^{-6}$/ C

รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นงานก่อนเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

มีปัจจัยกำหนด Squeeze Time 55 Cycle, Up Slope 2 cycle, HeatTime 65 Cycle กระแสไฟฟ้าเชื่อม 12 kA 14 kA และ 16 kA ตามรูปที่ 3.3 เมื่อผ่านการเชื่อมแล้วชิ้นงานจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.4 หลังจากนั้น ตกแต่งผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบด้วยเครื่องกลึง นำชิ้นงานมาขัดด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำ Oxalic 10% 20 V 25 sec เพื่อลดความเค้นที่ผิวซึ่งเกิดจากการตกแต่งผิวหน้า ล้างชิ้นงานให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นและเป่าลมร้อนให้ผิวชิ้นงานแห้ง

รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

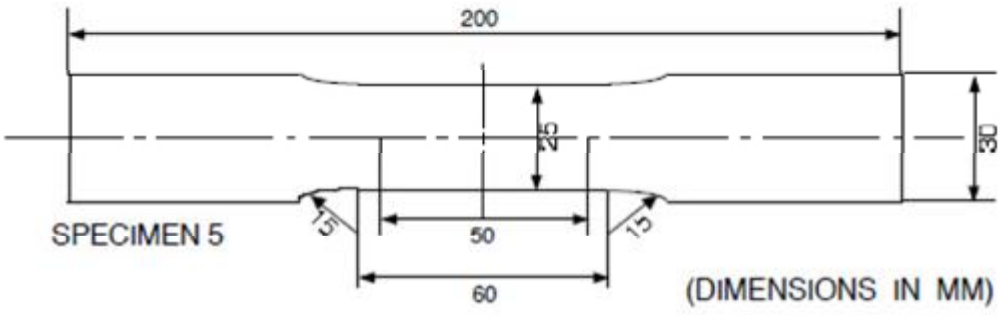


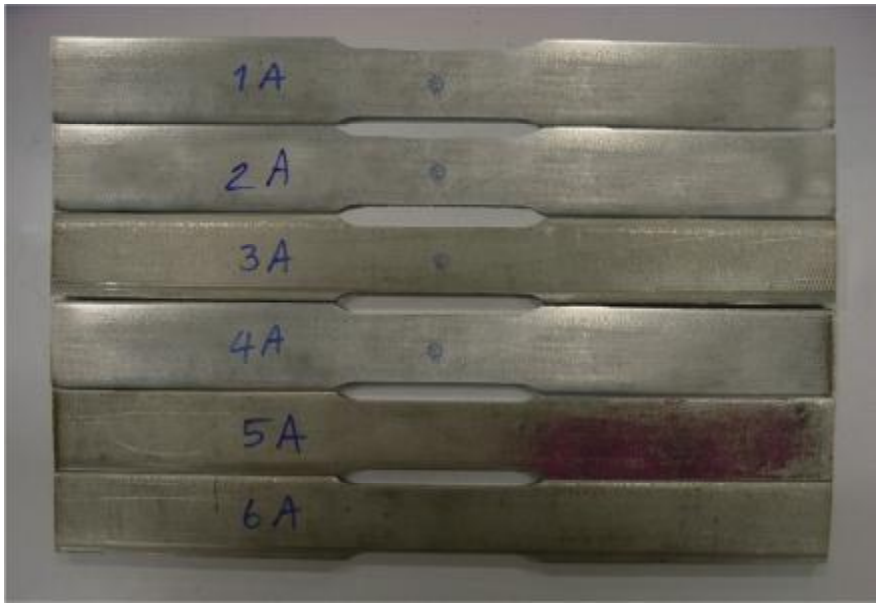
รูปที่ 3.3 การเชื่อมและจับชิ้นงานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

รูปที่ 3.4 ชิ้นงานหลังก่อนเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

3.3.1.2 ชิ้นทดสอบแรงดึงภายใต้ภาระแบบสถิต (Static Load Test)

ในการทดสอบการวัดเพื่อหาค่าความเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ต่อแรงดึงในช่วงขอบเขตของแรงดึงที่เท่ากับจุดคราก ชิ้นทดสอบแรงดึงทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ตัดให้ได้รูปร่างตาม มาตรฐาน JIS Z 2201 มีขนาดความกว้าง 25.28 มม. ยาว 300 มม. และมีความหนา 8.0 มม. ช่วงความยาวพิกัด (Gauge Length) 50 มม. ดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.5 ขนาดและชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง (Simulation Analysis) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม COMSOL

การจำลองความเค้นตกค้างด้วยวิธีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM) ด้วยแบบสองมิติ (2D) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองมากมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการทำนาย และวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน เมื่อเกิดความร้อนกำเนิดขึ้นภายในชิ้นงาน COMSOL multiphysics 3.4 เป็นซอฟแวร์ที่ใช้งานง่ายใช้ระยะเวลาในการประมวลผลน้อย ไฟล์แบบจำลองที่ได้จากโปรแกรมCOMSOL มีนามสกุล .mph

การวิจัยนี้ศึกษาค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานอันเกิดจากผลกระทบจากความร้อนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนที่ให้ความสนใจประกอบด้วย การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) และความเค้นเชิงความร้อน องค์ประกอบในแต่ส่วนถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลอง2 มิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

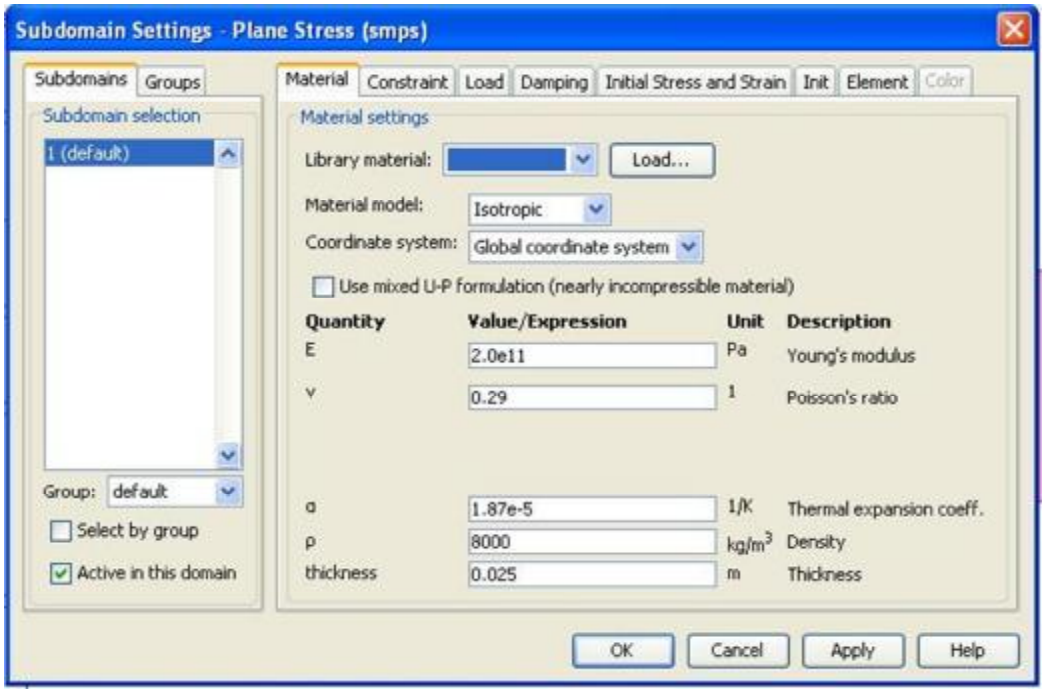
ต่อไป แบบจำลองชิ้นงาน2 มิติ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีความคล้ายคลึงกับหน้าตัดชิ้นงาน คือ ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง1.2 ซม ยาว 5 ซม.และพื้นที่เท่ากับตารางเซนติเมตร

กระบวนการจำลองแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

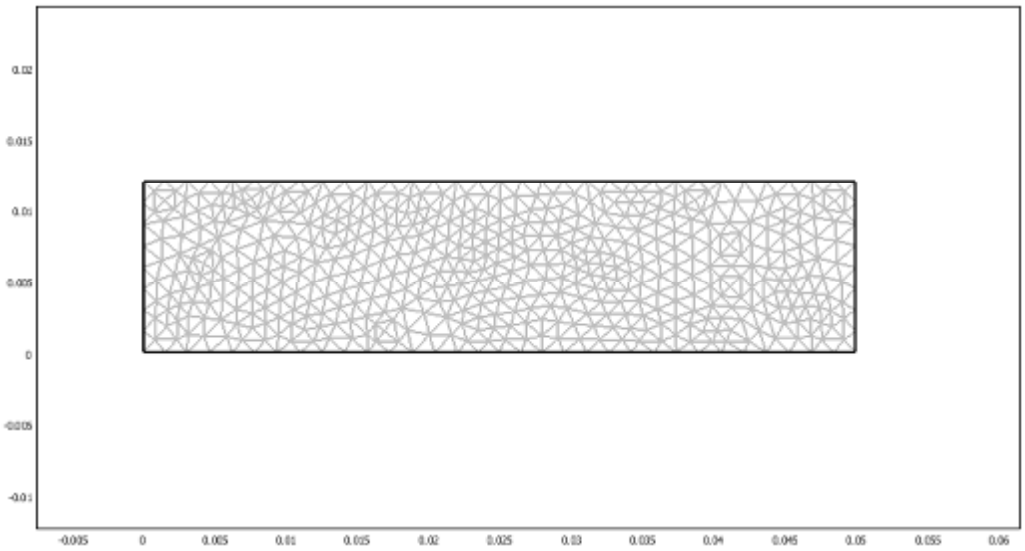
1. กระบวนการขั้นต้น(Preprocessing) เป็นการทำSolid Modeling ผู้ใช้กำหนดรูปแบบที่เหมะสม ป้อนข้อมูลสมบัติเฉพาะของวัสดุ ชนิดของภาระกระทำ(Load) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ แก้ปัญหาSolution เป็นกระบวนการใส่ภาระกระทำ(Load) และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เพื่อให้เครื่องคำนวณ
3. กระบวนการขั้นสุดท้าย(Postprocessing) ขั้นตอนแสดงผลลัพธ์(Result) ในรูปของเฉดสี

ขั้นตอนหลักในการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

1. เลือก Model Navigator เลือก Plane Stress และ General Heat Transfer
2. เลือก Draw เพื่อเขียน Line สร้าง Boundary
3. X: 0, 2.3, 2.9, 5,5, 2.9, 2.3, 0, 0
   Y: 0, 0, 0, 0, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 0
4. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุตามรูปที่3.6 สร้างแบบจำลองด้วยวิธีFEM
5. ภาระกรรมที่กระทำ คือ แรงที่เกิดจากหัวกดของเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดกระทำกับชิ้นทดสอบและอุณหภูมิภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการต้านทานของชิ้นงานที่มีต่อการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า คือ 12 kA 14 kA และ 16 kA
6. สร้าง Mesh เพื่อแบ่งขอบเขตชิ้นงานเป็นส่วนย่อยตามรูปที่ 3.7
7. Solve Problem
8. Postprocessing เพื่อดูผลการวิเคราะห์



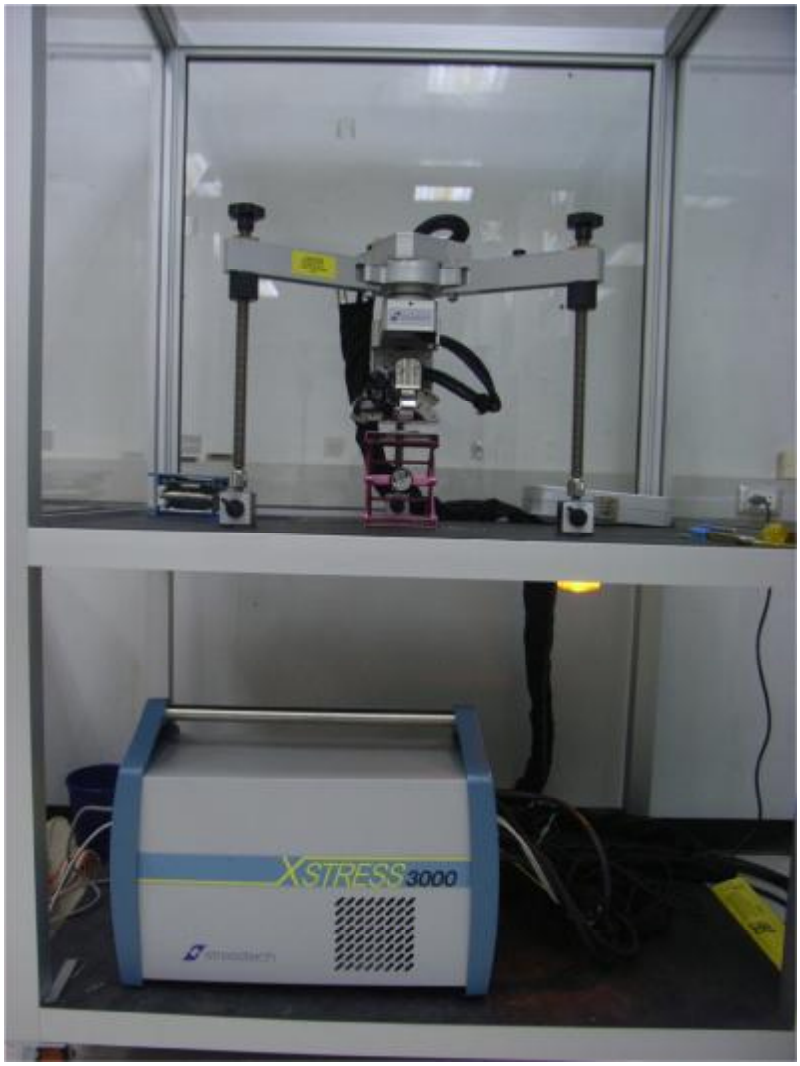
รูปที่ 3.6 การป้อนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่อแบบจำลอง



รูปที่ 3.7 การ Meshing แบบจำลองของชิ้นงานในไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM)

3.3.3 การวัดความเค้นตกค้างในชิ้นงานโดยวิธีวิธีเอ๊กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

เป็นการหาค่าความเค้นที่ผิวของชิ้นงานจากการใช้เทคนิคทางรังสีเอ๊กซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.05ถึง 0.25 นาโนเมตร โดยฉายรังสีให้แพร่กระจายเป็นบริเวณ 1-2 มม. ลึกลงไปในผิวงาน 10 ถึง 30 ไมโครเมตร และได้ถึง 0.5 มม. ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ๊กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันเครื่องมือที่ใช้เป็นแบบ XSTRESS 3000 รุ่น G2R ผลิตโดยบริษัท Stresstech Oy หมายเลขเครื่อง 121802 สามารถวัดความเค้นตกค้างในชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ ใช้หลอดรังสีเอ็กซ์เป็น Cr-K เครื่องถูกติดตั้งในตู้ป้องกันการแพร่กระจายรังสีต่อสายสัญญาณจาก PC COM PORT ของเครื่องวัดกับคอมพิวเตอร์ด้วยพอร์ตอนุกรมRS-232 ขั้นตอนการวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธีเอ๊กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันถูกอธิบายในหัวข้อ 3.3.2.1



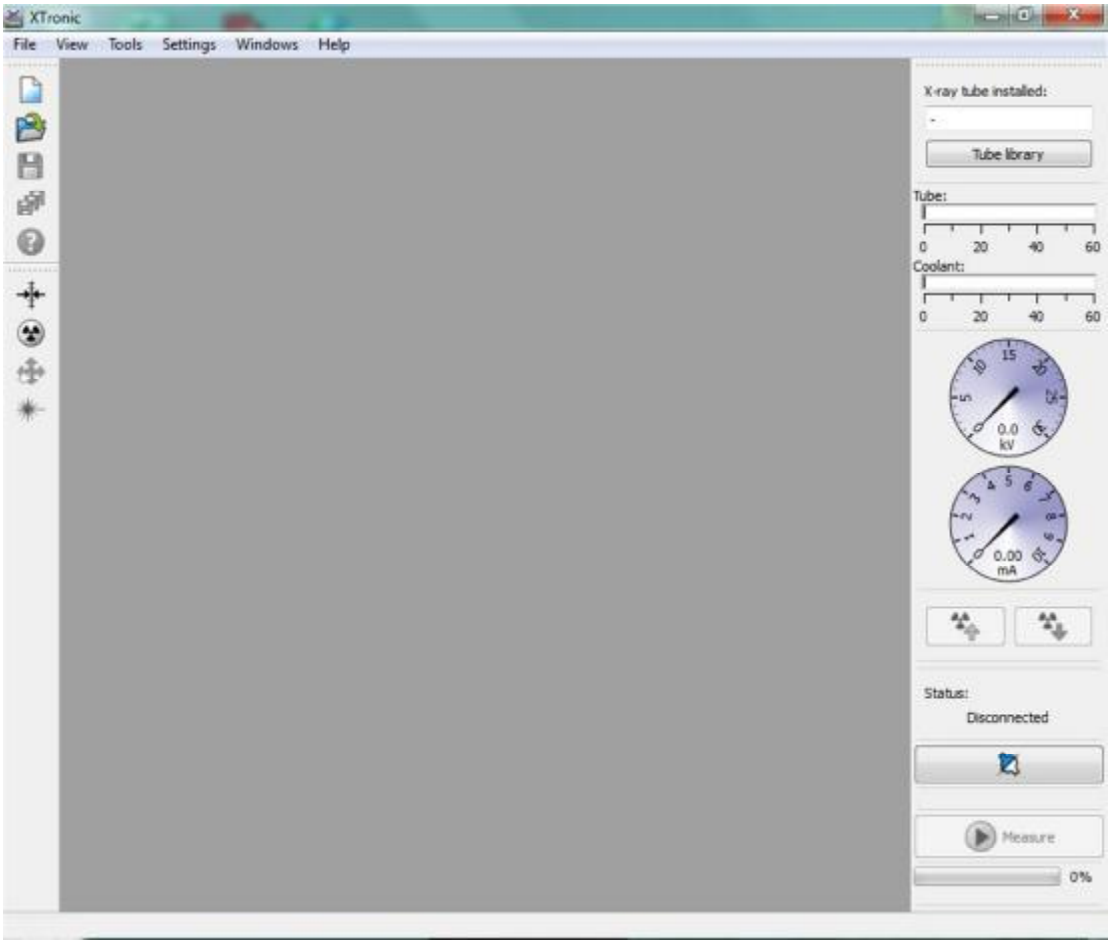
รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคXRD-XSTRESS 3000 รุ่น G2R

รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์สอบเทียบและมาตรฐานอ้างอิง (Free Stress) ของเครื่อง X-Ray

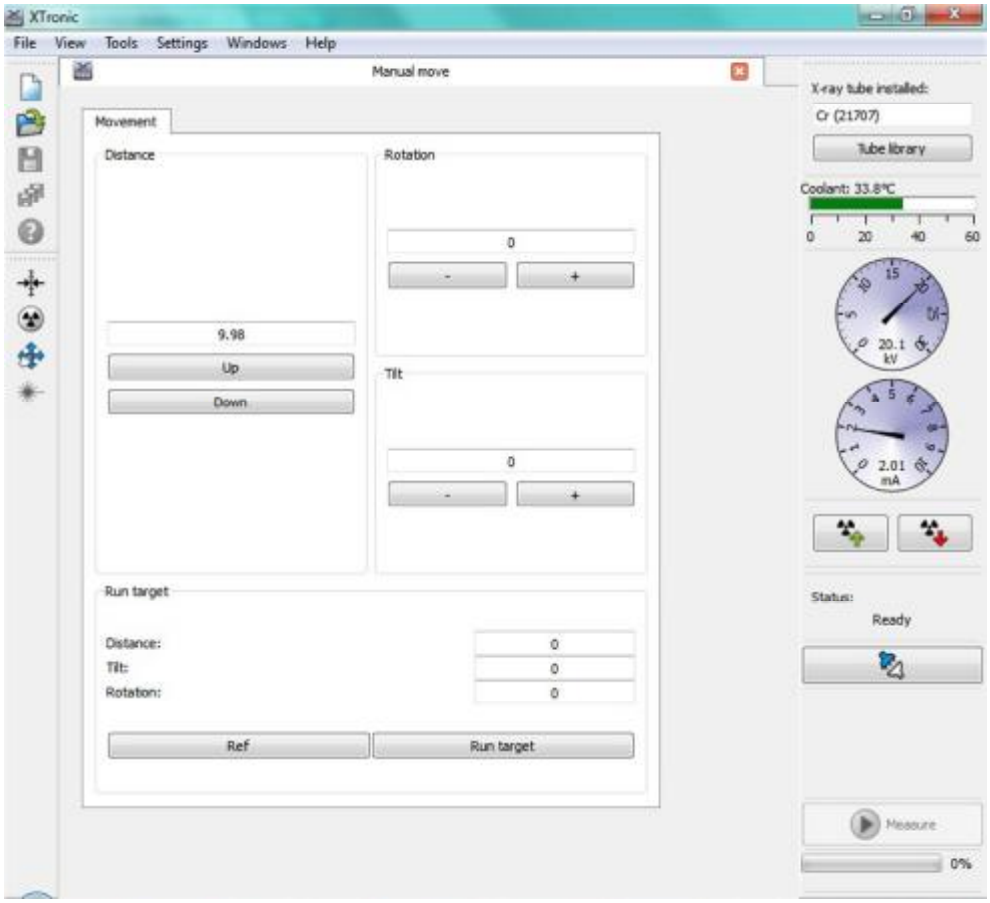
3.3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดสวิตซ์เครื่องที่ Main Unit ของเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Stress Analyser) เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ บริษัท Hewlett-Packard รุ่น HP EliteBook 8460p DKSH210855-HP ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ Windows 7 Professional SP1 64-bit Operation System, CPU: Intel Core i7-2670QM 2.20 GHz หน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB
2. เปิดโปรแกรม XTronic 1.4.0 (2011) หน้าต่างโปรแกรมที่ถูกเปิดออกตามรูปที่ 3.10 โปรแกรม XTronic เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดย ผู้ผลิต แรงดันไฟฟ้า 20.0 kv และกระแสไฟฟ้า 2.00 mA Coolant 27.6 C หลังทำการวัดแรงดันไฟฟ้า 20.0 kv และกระแสไฟฟ้า 2.00 mA Coolant 27.6 C
3. ตั้งค่าหน่วยการวัดความเค้นตกค้างเป็น MPa จาก Settings/General
4. กดปุ่ม Connect
5. เริ่มกระบวนการวัดโดยทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องโดยการ Alignment เพื่อให้ลำแสงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากหลอดเอ็กซ์เรย์กับหัววัด (Detector) อยู่ในแนวศูนย์กลางเดียวกัน
6. ทำการทดสอบสารตัวอย่างมาตรฐานอ้างอิง (Austenite Free Stress) เพื่อหาค่ามุม θ_0 (มุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนวัสดุอ้างอิงและค่า *d0* ที่ 0 องศา
7. ทำการทดสอบวัสดุทดสอบ (SS304) เพื่อหาค่ามุม θ_n (มุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนวัสดุทดสอบ) จากการวัด และค่า *d1* (ระยะห่างระหว่างเพลนของชิ้นทดสอบ) ซึ่งได้จากการคำนวณ

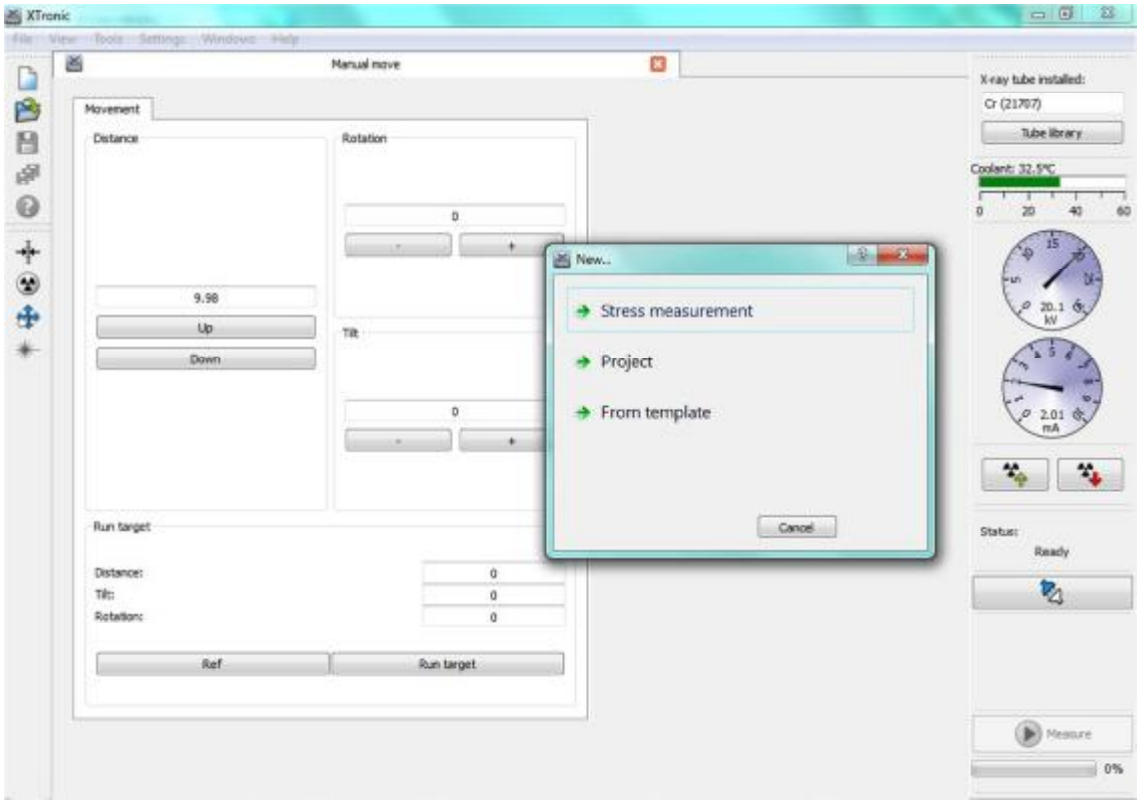
8. นำค่าระยะห่างระหว่างเพลน (Plane) *d0* และ *dn* ที่ได้จากการคำนวณหาค่าอัตราส่วนของค่าความแตกต่างระหว่างระยะห่างของระนาบอะตอมวัสดุทดสอบกับวัสดุอ้างอิง(ε) ดังสมการที่ 2.14
9. เลือกไฟล์ Calibration
10. กดปุ่ มRun up
11. เริ่มกระบวนการวัด
12. กำหนดค่าการคำนวณคือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) และ Modulus of Elasticity ตามตารางที่ 3.1
13. เปิดหน้าต่าง Manual move [F8] เลือก Movement Tab ตามรูปที่ 3.14 เลื่อน หัว Tip of the collimator เลื่อนชิ้นงานทดสอบให้บริเวณการวัดactual spot size บริเวณทดสอบได้ระดับตั้งฉากกับลำแสงของรังสีตกกระทบ 0° tilt [21] ทดสอบอยู่ใน ทิศทางการวัดจะขนานกับทิศทางของ tilt



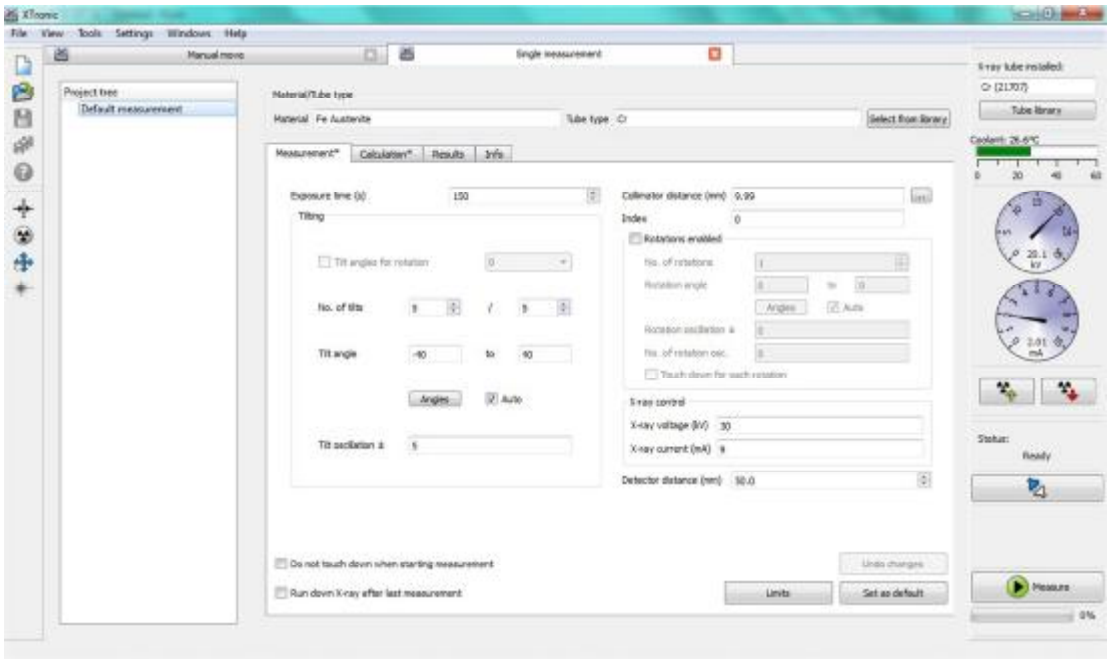
รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม XTronic 1.4.0 9 ตอนเริ่มต้น



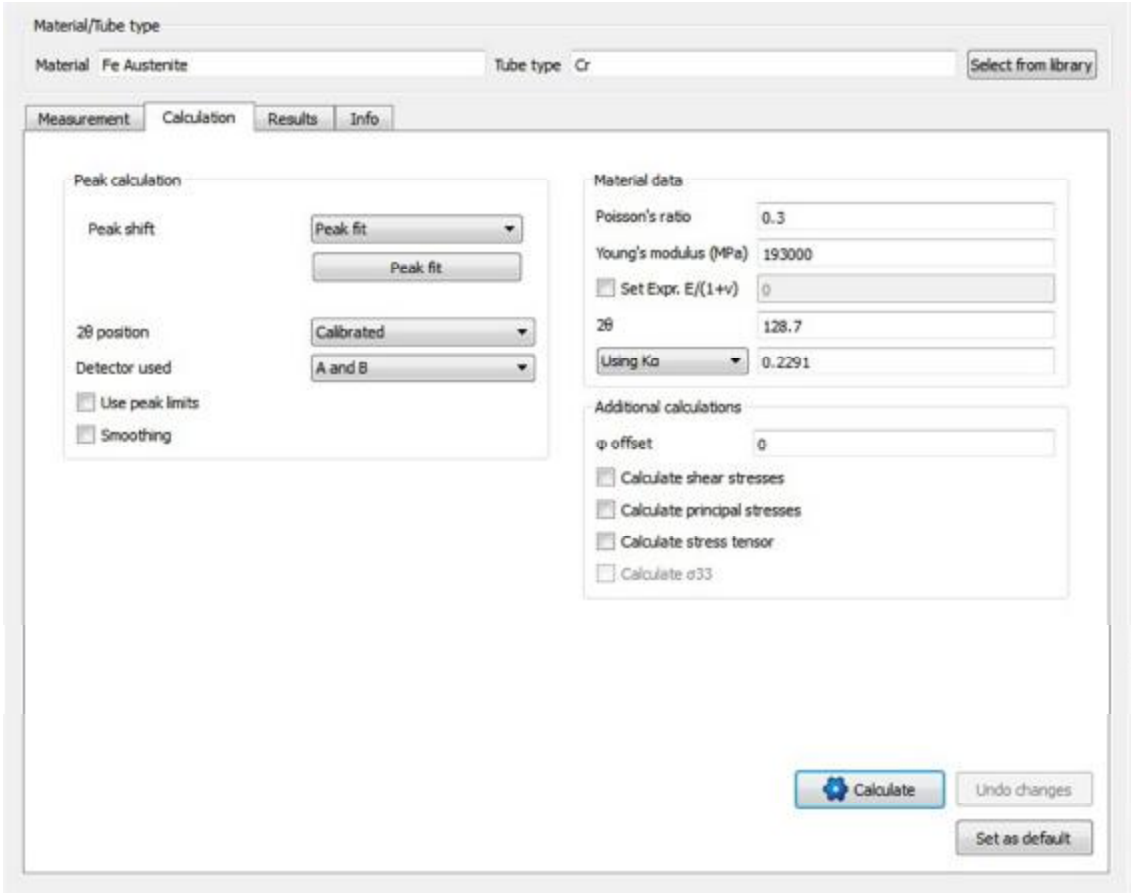
รูปที่ 3.11 หน้าต่างโปรแกรมแสดง Manual move Tab เพื่อควบคุมการขึ้นลงของปลาย Collimator



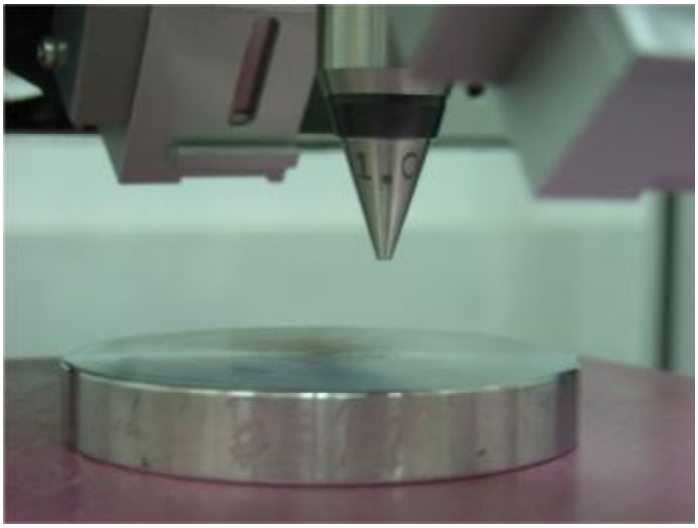
รูปที่ 3.12 หน้าต่างเริ่มต้นการวัดความเค้นตกค้าง



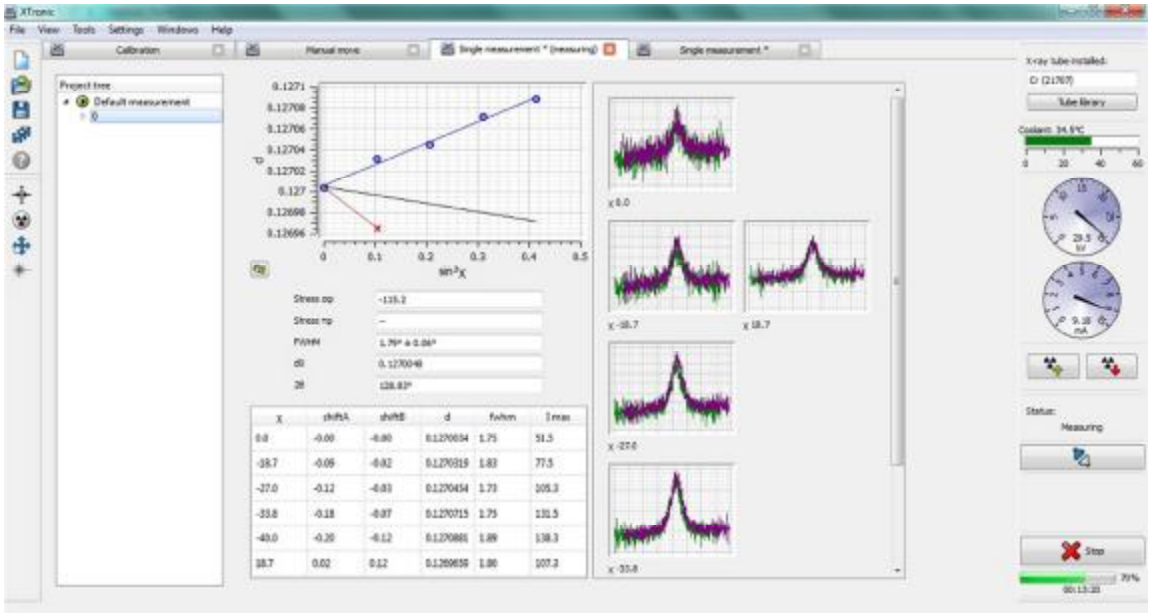
รูปที่ 3.13 ส่วนติดต่อผู้ใช้เพื่อป้อนปัจจัยกำหนดการวัด



รูปที่ 3.14 ส่วนติดต่อผู้ใช้ของ Calculation Tab เพื่อป้อนสมบัติวัสดุและมุม2 θ



รูปที่ 3.15 ปลายของ Collimator ขนาด 1 mm และผิวหน้าชิ้นงาน

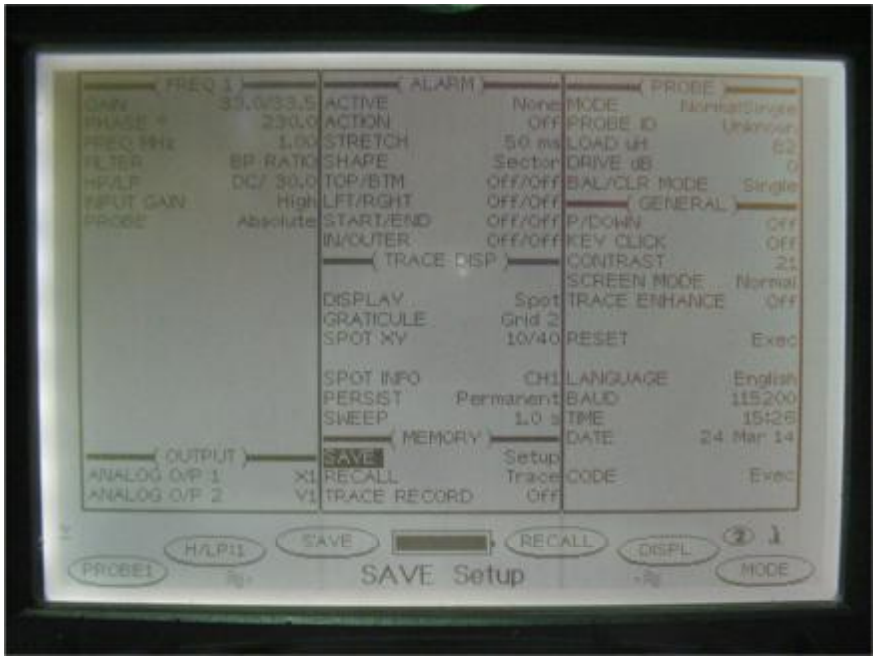


รูปที่ 3.16 หน้าต่างแสดงผลขณะที่เครื่องกำลังทำการยิงรังสีตกกระทบที่มุมต่างๆ

3.3.4 การวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวน

ในขั้นตอนนี้เป็นการใช้เครื่องมือวัดกระแสไหลวนรุ่น Locator3s หมายเลขเครื่อง 556895/05 และหัวตรวจสอบ 313P24 500 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 มม.เป็นของบริษัท GE Inspection Technology หัวตรวจสอบแบบ Absolute probe 313P24 มีความไวและการแยกชัดสูง ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยRS232 Port เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและเรียกดู ตามรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 ชุดเครื่องมือวัดกระแสไหวน และการติดต่อกับเครื่องผ่านRS232 Port

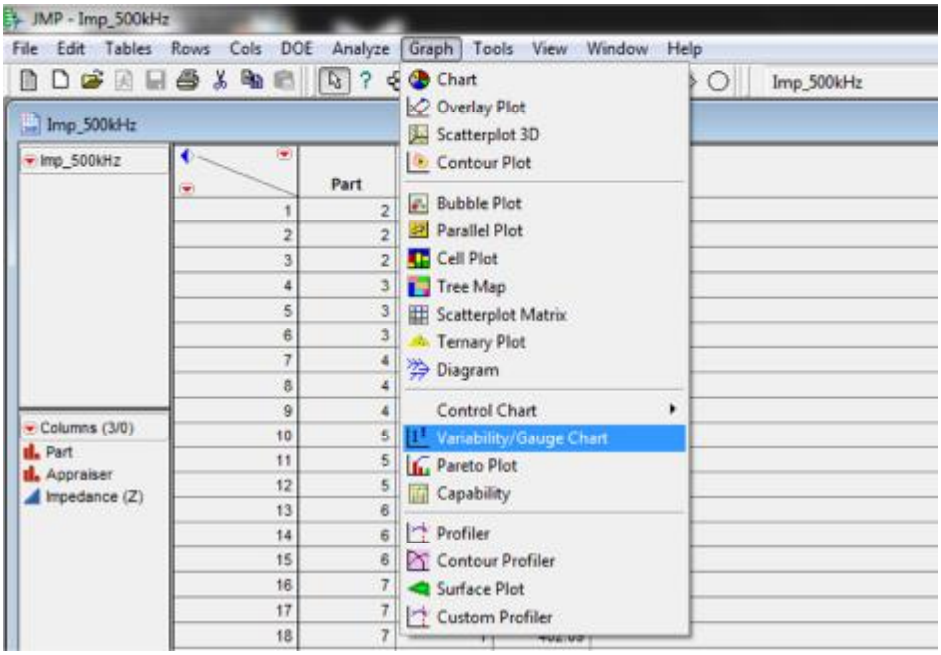


รูปที่ 3.18 การตั้งค่ามุม และความถี่ใช้งาน1 MHz สำหรับเครื่องมือวัดกระแสไหลวน

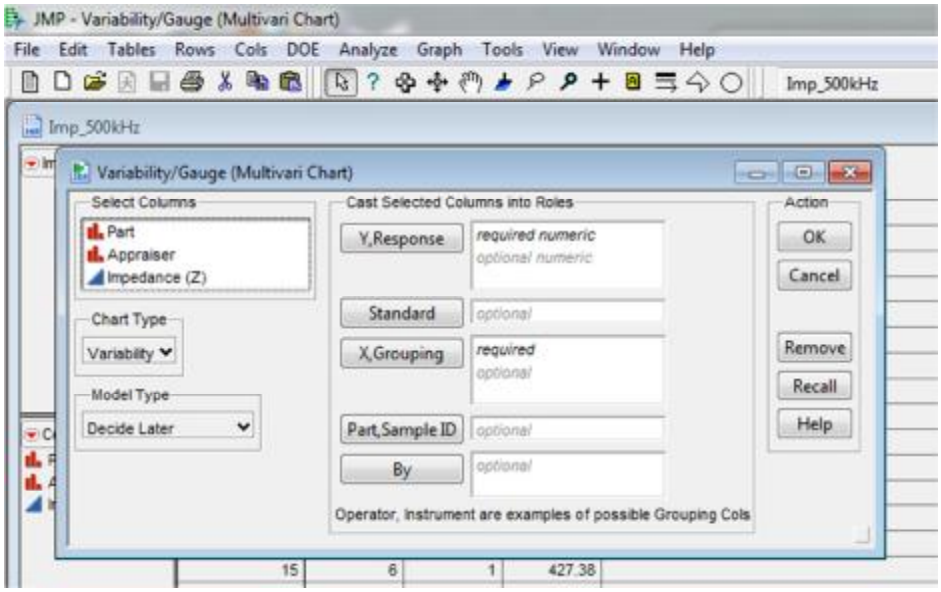
ปรับ GAIN และมุมเฟส ให้เหมาะสมกับความถี่ของหัวตรวจสอบในช่วงต่างๆ คือ 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz และ 3 MHz ตามตารางที่ 3.3 วัดชิ้นงานความเค้นตกค้างโดยการวางปลายหัวตรวจสอบในแนวตั้งฉากบนผิวชิ้นงานบริเวณเดียวกับXRD วัดตำแหน่ง Core, Edge, HAZ และ Base ของ ชิ้นงานทั้งสามชิ้น คือ12 kA, 14 kA และ 16 kA

1. เปรียบเทียบความผันแปรของการวัดความเค้นตกค้างด้วยโปรแกรม JMP 7.0.1โดยการป้อนข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปแบบตารางข้อมูล และข้อมูลแต่ละประเภทต้องอยู่ในแนวตั้งเท่านั้น เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วนแล้ว เข้าสู่การวิเคราะห์ข้อมูลดิบด้วยวิธีการรันโปรแกรมตามขั้นตอนต่อไปนี้
2. เมื่อเปิดหน้าต่างโปรแกรม เพื่อเริ่มต้นการทำงานเรียบร้อยแล้วสร้างตารางข้อมูล โดยเลือกที่ File>New>Data Table
3. ปรับเปลี่ยนสมบัติของตาราง โดย Double Click ที่หัวตารางเปลี่ยนชื่อ หรือเลือก Cols>Column Info และเพิ่มสดมภ์โดยเลือกที่ Cols> New Column
4. Graph> Variability/Gauge Chart> ดังรูปที่ 3.19 โปรแกรมจะแสดงกล่องโต้ตอบตามรูปที่ 3.20

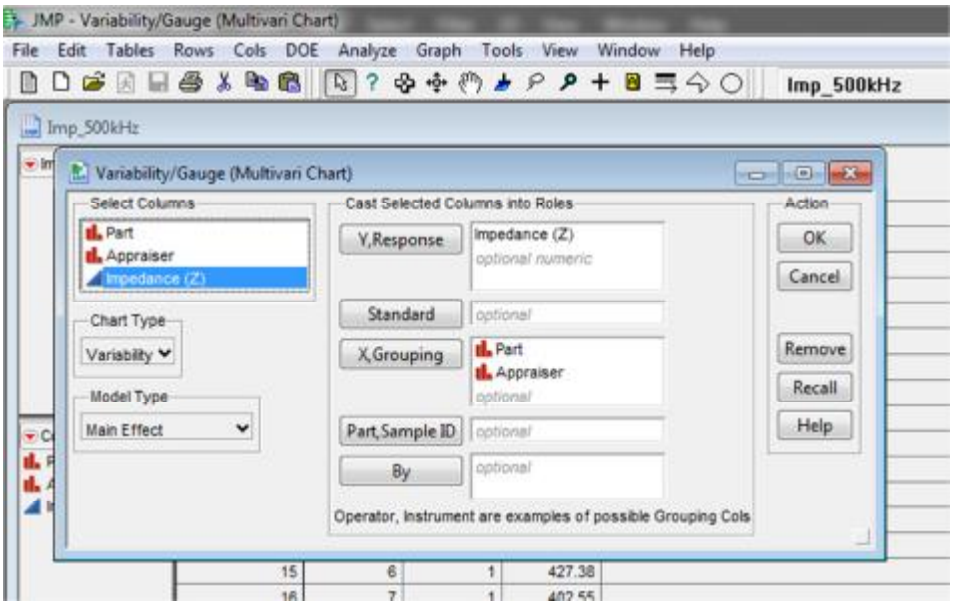
5. เลือก Part และ Appraiser ลากไปวางในกล่องข้อความเพื่อกำหนดค่าX, Grouping เลือก Impedance (Z) และลากไปวางในกล่องข้อความเพื่อกำหนดค่าY, Response จะได้ตามรูปที่ 3.21
6. กดปุ่ มOK
7. วิเคราะห์ผล GR&R ที่ได้จากโปรแกรม JMP



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการรันโปรแกรมJMP โดยใช้ Variability/Gauge Chart



รูปที่ 3.20 หน้าต่างกล่องโต้ตอบเพื่อรอรับการเลือกแถวและหลักเพื่อการวิเคราะห์



รูปที่ 3.21 กำหนดข้อมูลในแกนX และ Y

3.3.5 การสอบเทียบเครื่องมือวัดจากเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

การทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง Shimadzu-Autograph รุ่น AG25TB Load Cell Type SFL-25AG หมายเลขเครื่อง 28093935 ควบคุมการทำงานด้วยระบบประมวลผลสัญญาณตัวเลข ใช้ระบบ

อัตโนมัติในการสอบเทียบ และบาลานซ์โหลดสามารถทดสอบแรงดึงและแรงอัดโดยใช้แรงทดสอบได้สูงสุด 25 ตันความผิดพลาดการเคลื่อนที่ ± 0.1 % ของความเร็วใช้งานการทดสอบแรงดึง วัสดุทดสอบถูกเพิ่มแรงดึงบนเครื่องทดสอบ ทดสอบที่อุณหภูมิห้องที่ 25° C ดังรูปที่ 3.22

ขั้นตอนแรก ทำการทดสอบวัสดุชิ้นทดสอบโดยให้แรงดึงจนกระทั่งวัสดุเกิดความเค้นจนถึงจุดดรากตัว วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรเพื่อหาจุดล้าตัวและจุดที่วัสดุชิ้นทดสอบรับแรงดึงได้สูงสุดโดยใช้แรงดึงแบบต่อเนื่อง (Dynamic Load Test) ค่าแรงดึงตั้งไว้ที่25,000 กิโลกรัมแรง ความเร็วในการดึง 20 มม./นาที จนกระทั่งชิ้นงานขาด

ขั้นตอนที่สอง ทำการดึงวัสดุชิ้นทดสอบโดยการเพิ่มแรงดึงอย่างช้า ๆ ทีละขั้นตอน(Static Load Test) ความเร็วในการดึง 2 มม./นาที โดยค่าแรงดึงที่ใช้ในการดึงเพิ่มขึ้นครั้งละ10% ของค่าแรงดึงสูงสุดที่ตั้งไว้หรือ 2500 กิโลกรัมแรงจนกระทั่งแรงดึงที่ให้มีค่าเท่ากับ 15,000 กิโลกรัมแรง หรือ คำนวณเป็นความเค้นตามสมการที่ (2.1) จะมีค่าเท่ากับ 735.5 MPA ตามตารางที่ 3.2 หลังจากแรงดึงมากกว่า 15,000 กิโลกรัมแรง ชิ้นทดสอบจะเริ่มแตกหัก

รูปที่ 3.22 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU-Autograph

ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดึงและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบ

No.	kgf	N	Pa	MPa
1	2500	24516.625	122583125	122.58
2	5000	49033.25	245166250	245.17
3	7500	73549.875	367749375	367.75
4	10000	98066.5	490332500	490.33
5	12500	122583.125	612915625	612.92
6	15000	147099.75	735498750	735.50

ระหว่างชิ้นงานอยู่ภายใต้แรงดึงที่กำหนด ทำการวัดชิ้นงานด้วยความถี่ต่างๆ ตามตารางที่ 3.3 โดยการวางหัวตรวจสอบบนผิวหน้าชิ้นทดสอบตามรูปที่ 3.7 บันทึกค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ในแนวแกน XY บนหน้าจอแสดงผลของเครื่องมือวัดกระแสไหลวน และคำนวณเวคเตอร์ลัพธ์ และ

ตารางที่ 3.3 สภาวะการปรับตั้งค่าตัวแปรของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ตามความถี่ของหัวตรวจสอบ

ความถี่	GAIN	มุมเฟส
102.5 kHz	35.8/37.2	357
500 kHz	33.0/33.5	260
1 MHz	33.0/33.5	230
2 MHz	38.8/40.2	160
3 MHz	37.8/39.2	140

สำหรับความถี่ที่ 102.5 kHz เพื่อวัดความลึกจากผิวหน้าชิ้นงาน 4 มม. จะถูกวัดจากทั้งสองด้าน ขั้นตอนนี้ ใช้เครื่องมือวัดกระแสไหลวนรุ่น Locator3s หมายเลขเครื่อง 556895/05 และหัวตรวจสอบ 313P24 500 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 มม.เป็นของบริษัท GE Inspection Technology

หัวตรวจสอบแบบ Absolute probe 313P24 มีความไวและการแยกชัดสูง รายละเอียดตามภาคผนวก ข. ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยRS232 Port เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและเรียกดู

รูปที่ 3.23 หัวตรวจสอบแบบ Absolute probe 313P24

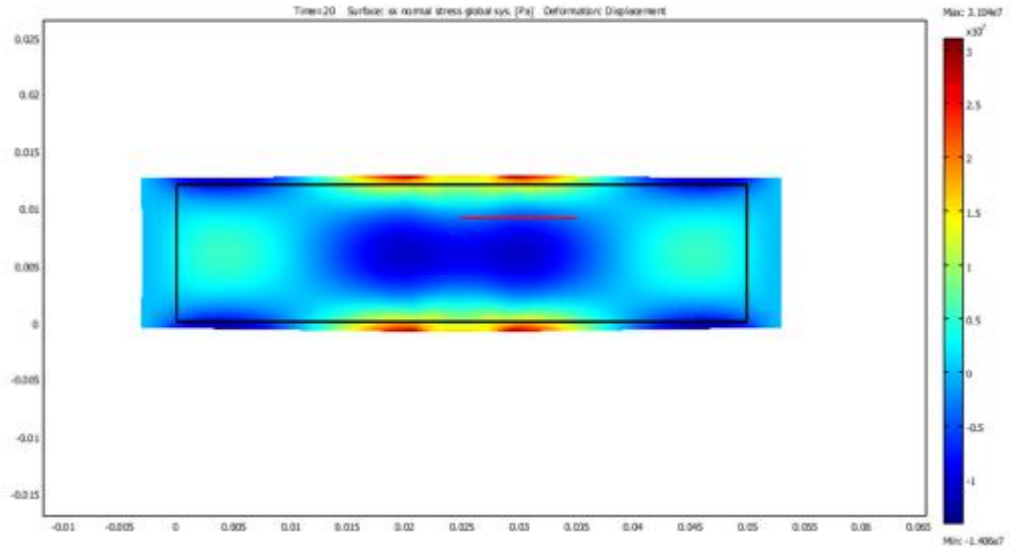
รูปที่ 3.24 การวางหัวตรวจสอบบนผิวหน้าชิ้นทดสอบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

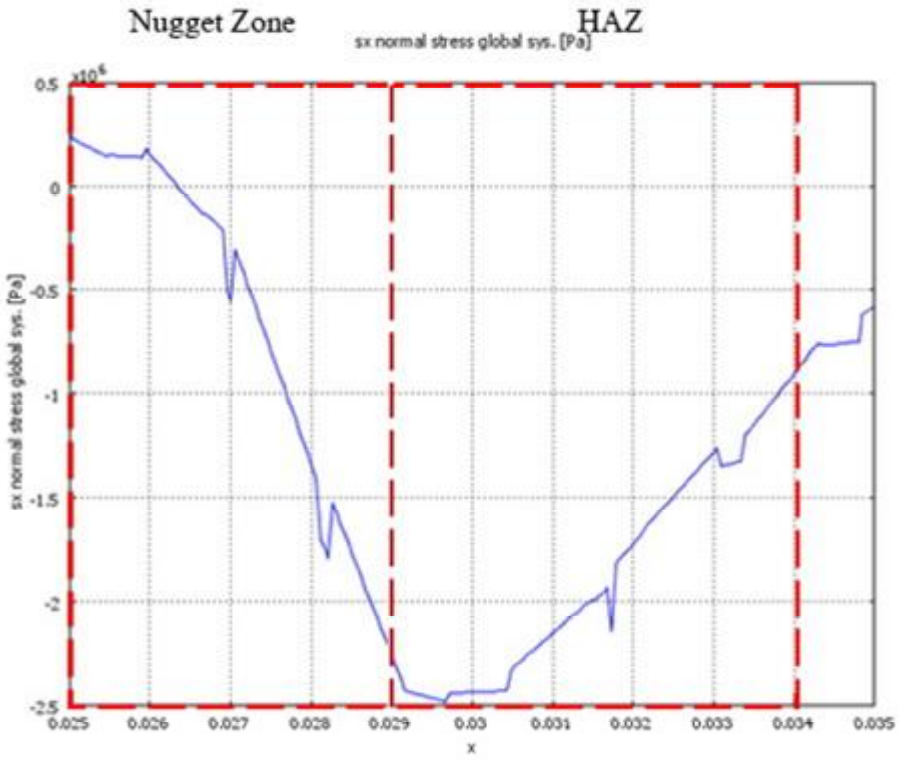
การประเมินค่าความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยวิธี XRD และวิธีกระแสไหลวนเป็นการทดลองและเก็บผลจากการดำเนินการจริง ซึ่งต่างกับการประเมินค่าความเค้นตกค้างจากวิธี FEM ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ จากการป้อนข้อมูลซึ่งอาจจะตรงหรือคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ ผลการประเมินค่าความเค้นตกค้างจากการทดลองทั้งสองวิธีและจากการคำนวณถูกบันทึกไว้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการสร้างแบบจำลองความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน โดยวิธี FEM ด้วย COMSOL

จากการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของงานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด ระดับความเค้นพิจารณาที่ความลึก 3 มม. จากผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากบ่อหลอมละลายที่ผิวหน้าชิ้นงานถูกปาดออกไปเพื่อให้เกิดความเรียบของผิวหน้าชิ้นงานในการวัดด้วยกระแสไหลวนรูปที่ 4.1 เป็นภาพหน้าตัดของชิ้นงานซึ่งแสดงระดับค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณขอบบ่อหลอมละลาย

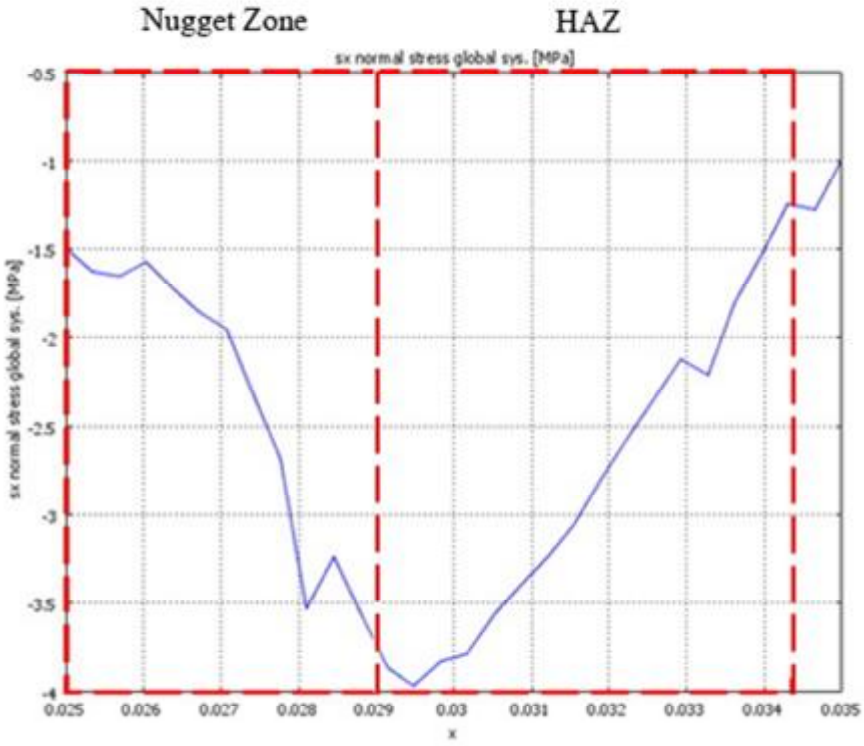


รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน



รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน12 kA โดย FEM

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน14 kA โดย FEM



รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นงาน16 kA โดย FEM

ในรูปที่ 4.2 – 4.4 เป็นผลการคำนวณค่าความเค้นด้วยโปรแกรมถูกแสดงด้วยกราฟ แกนX เป็นระยะทางในแนวรัศมีออกจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกระบอก แกน และ Y เป็นค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน จะเห็นว่าค่าความภายในชิ้นงานมีค่าความเค้นแตกต่างกันไม่ต่ำกว่าธ ค่า ค่าความเค้นเกิดขึ้นที่บริเวณต่างๆ ถูกแสดงในตารางที่4.1

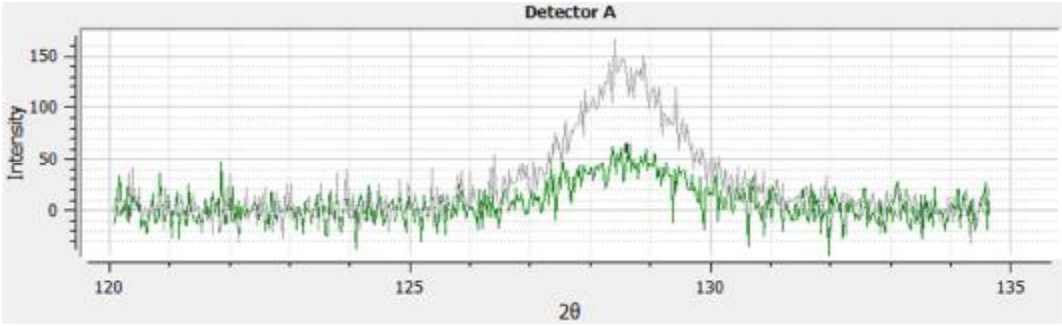
ตารางที่ 4.1 ระดับค่าความเค้นตกค้างของแบบจำลองที่ได้จากการประมวลผล

กระแส (kA)	ตำแหน่ง	ค่าความเค้น (MPa)
12	C	0.2
12	H	-2.33
12	BM	-0.58
14	C	-0.52
14	H	-3.1
14	BM	-2.16
16	C	-1.49
16	H	-3.8
16	BM	-0.9

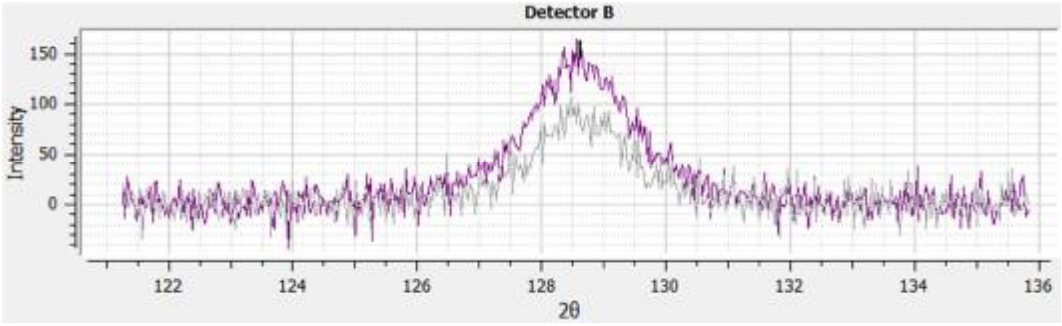
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน โดยวิธี XRD

การทดลองนี้การประเมินค่าความเค้นตกค้างทั้ง3 บริเวณ ด้วยวิธี XRD โดยใช้เทคนิค $\sin^2 \psi$ จากผลการทดลองหาค่าความเข้มการสะท้อนของรังสีเอ๊กซ์กับระนาบของอะตอมที่เกิดขึ้นจากการเอียงมุมระหว่างหัววัดกับพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบเป็นมุมต่างๆ ตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา จำนวน 5 มุม (Tilt) คือ 0.0, 18.7, 27.0, 33.8, และ 40.0 องศา ± 5 องศา ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดถูกพิจาณาจากการสะท้อนรังสีโดยโปรแกรมของเครื่อง เครื่องจะใช้ Detector ตรวจนับปริมาณของรังสีที่สะท้อนกำระนาบผลึก และรายงานผลมุมสะท้อนของมุมเลี้ยวเบนของรังสี และคำนวณจุดยอดที่เลื่อนไปจากจุดยอดอ้างอิงที่ได้จากมุม 0° จากนั้นโปรแกรมของเครื่องจะทำการคำนวณหาค่าความชัน(M) ของวัสดุเพื่อประเมินค่าความเค้นตกค้าง

รูปที่ 4.5-4.7 เป็นกราฟจากการวัดความเค้นที่บริเวณกลางบ่อหลอมละลาย(Core of Nugget) ของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดของชิ้นงาน 12 kA รูปที่ 4.5 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector A และรูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector B ซึ่งกระทำที่มุม-27° แกน X เป็นมุมสะท้อนที่ 2θ แกน Y เป็นปริมาณความเข้มของรังสีที่ตรวจจับนับได้จากDetctor มีจุดยอดของความเข้นของการสะท้อนรังสีที่ 128.6° เส้นสีเทาเป็นเส้นที่เครื่องตรวจวัดได้ที่มุม0° และใช้ค่ามุม 2θ ที่ตรงกับจุดยอดเป็นเส้นอ้างอิง

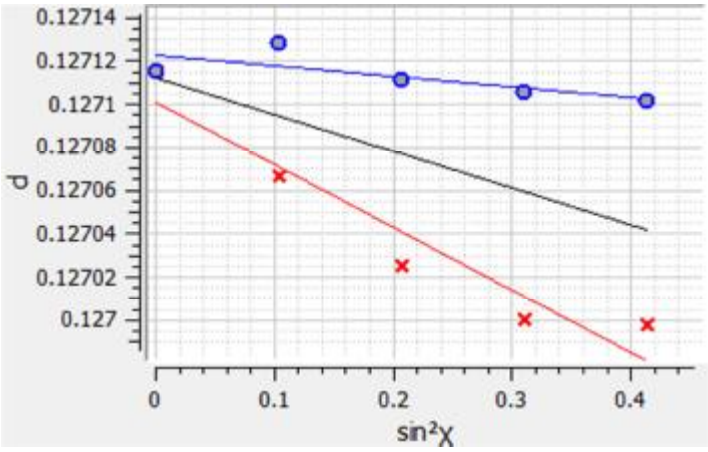


รูปที่ 4.5 ผลการวัดจาก Detector A 12 kA



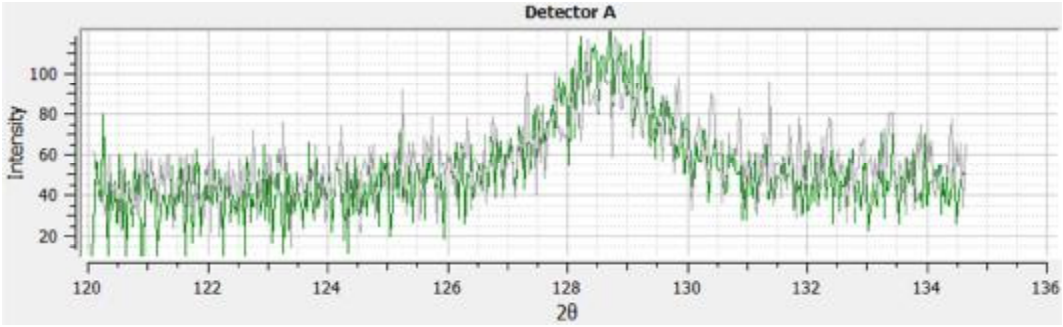
รูปที่ 4.6 ผลการวัดจาก Detector B 12 kA

รูปที่ 4.7 แกน X เป็นค่า $\sin^2X$ โดยที่ X คือ มุมที่หัววัดทำมุมกับผิวหน้าชิ้นทดสอบ แกนY เป็นค่า d spacing จากรูปที่มุม 0° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1271151 มุม $\sin^2 40$ มีค่าเท่ากับ 0.41317 มุม +40° และมุม -40° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1269983 และ 0.1271014 ตามลำดับ มีค่า d Spacing เฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.12704985 ความชันมีค่าเท่ากับ-0.000157 แล้วนำไปคำนวณหาความเค้น

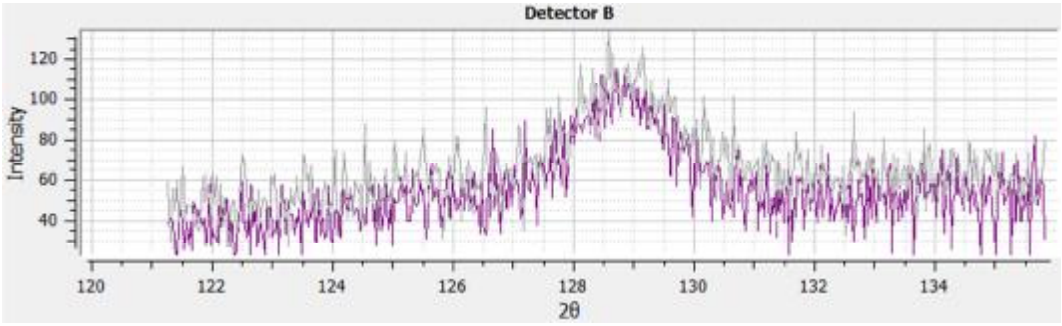


รูปที่ 4.7 ผลกราฟกราฟความชันของการวัด ชิ้นงานทดสอบที่12 kA บริเวณ Core ครั้งที่3

รูปที่ 4.8-4.9 เป็นกราฟจากการวัดความเค้นที่บริเวณกลางบ่อหลอมละลาย(Core of nugget) ของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดของชิ้นงาน 14 kA รูปที่ 4.8 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector A และรูปที่ 4.9 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector B ซึ่งกระทำที่มุม-27° วัดครั้งที่3 แกน X เป็นมุมสะท้อนที่ 2θ แกน Y เป็นปริมาณความเข้มของรังสีที่ตรวจจับนับได้จากDetctor มีจุดยอดของความเข้นของการสะท้อนรังสีที่ 128.72° และ 128.51°เส้นสีเทาเป็นเส้นที่เครื่องตรวจวัดได้ที่มุม0° และใช้ค่ามุม 2θ ที่ตรงกับจุดยอดเป็นเส้นอ้างอิงคือ 128.83° และ128.61° ที่ Detector A และ B ตามลำดับ

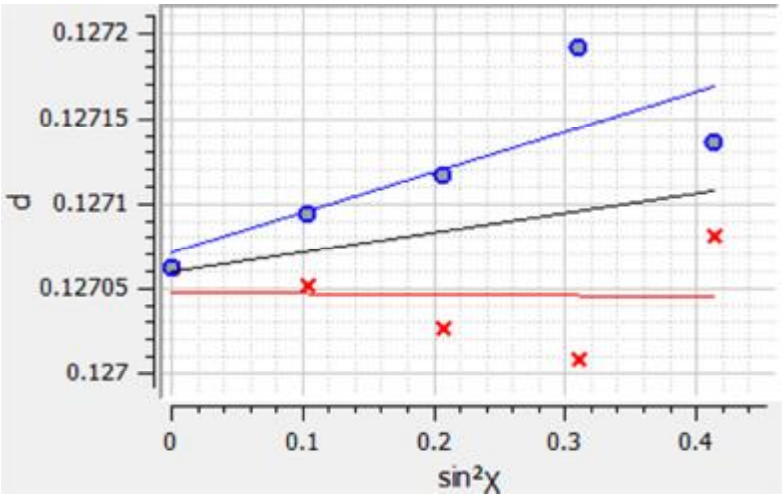


รูปที่ 4.8 ผลการวัดจาก Detector A 14 kA



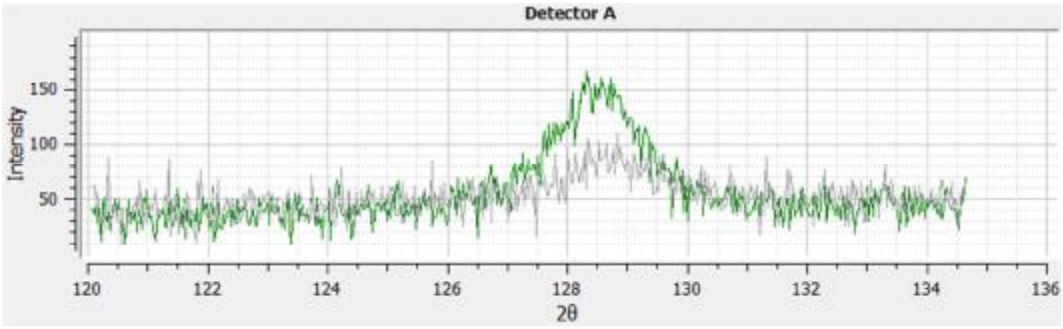
รูปที่ 4.9 ผลการวัดจาก Detector B 14 kA

รูปที่ 4.10 แกน X เป็นค่า $\sin^2 X$ โดยที่ X คือ มุมที่หัววัดทำมุมกับผิวหน้าชิ้นทดสอบ แกน*Y* เป็นค่า d Spacing จากรูปที่มุม 0° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1270627 มุม $\sin^2 40$ มีค่าเท่ากับ 0.41317 มุม +40° และมุม -40 ° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1270817 และ 0.1271364 ตามลำดับ มีค่า d Spacing เฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.1271090 ความชันมีค่าเท่ากับ0.000464 แล้วนำไปคำนวณหาความเค้น

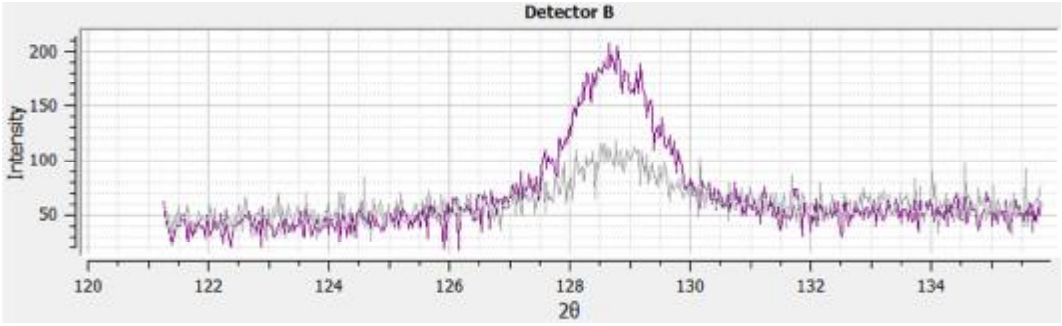


รูปที่ 4.10 ผลกราฟความชันของการวัดชิ้นงานทดสอบที่14 kA บริเวณ Core

รูปที่ 4.11-4.13 เป็นกราฟที่ได้จากการวัดความเค้นที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone-HAZ) ของชิ้นงาน 16 kA รูปที่ 4.11 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector A และรูปที่ 4.12 เป็นกราฟที่ได้จาก Detector B ซึ่งกระทำที่มุม-33.8° วัดครั้งที่3 แกน X เป็นมุมสะท้อนที่ 2θ แกน Y เป็นปริมาณความเข้มของรังสีที่ตรวจจับนับได้จากDetctor มีจุดยอดของความเข้นของการสะท้อนรังสีที่ 128.55° และ 128.54°เส้นสีเทาเป็นเส้นที่เครื่องตรวจวัดได้ที่มุม0° และใช้ค่ามุม 2θ ที่ตรงกับจุดยอดเป็นเส้นอ้างอิง คือ 128.74 และ128.67 ที่ Detector A และ B ตามลำดับ

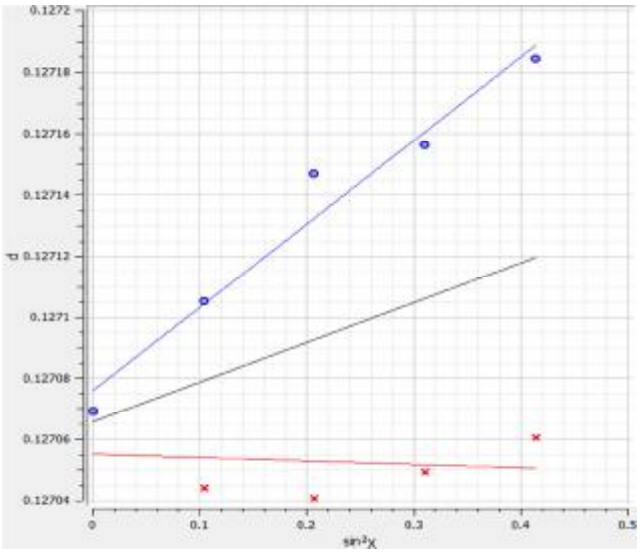


รูปที่ 4.11 ผลการวัดจาก Detector A 16 kA



รูปที่ 4.12 ผลการวัดจาก Detector B 16 kA

หลังจากที่เครื่องวัดทำการวัดทั้ง 5 มุม รวม 9 มุม เสร็จ เครื่องจะประมวลผลแล้วสร้างกราฟความชัน ตามรูปที่ 4.13 แกน X เป็นค่า $\sin^2 X$ โดยที่ X คือ มุมที่หัววัดทำมุมกับผิวหน้าชิ้นทดสอบ แกน Y เป็นค่า d Spacing จากรูปที่มุม 0° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1270627 มุม $\sin^2 33.8$ มีค่าเท่ากับ 0.309465 มุม +33.8° และมุม -33.8° d Spacing มีค่าเท่ากับ 0.1271563 และ 0.1270495 ตามลำดับ มีค่า d Spacing เฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.1271029 ความชันมีค่าเท่ากับ 0.000109 แล้วนำไปคำนวณหาความเค้น



รูปที่ 4.13 กราฟความชันของการวัดชิ้นงานทดสอบที่ 16 kA บริเวณกระทบร้อน (HAZ)

สรุปผลการวัดค่าความเค้นทั้งสามบริเวณของ 12 kA, 14 kA และ 16 kA แสดงในตารางที่ 4.2-4.4

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน 12 kA ด้วย XRD

วัดครั้งที่	บริเวณกลางบ่อหลอมละลาย, (MPa)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ), (MPa)	บริเวณโลหะฐาน, (MPa)
1	-187.7	52.6	134.7
2	-256	183.2	126.1
3	-244	137.4	153.2
4	-241.6	104	141.7
5	-198.4	164.6	113.8
ค่าเฉลี่ย	-225.54	128.36	133.9

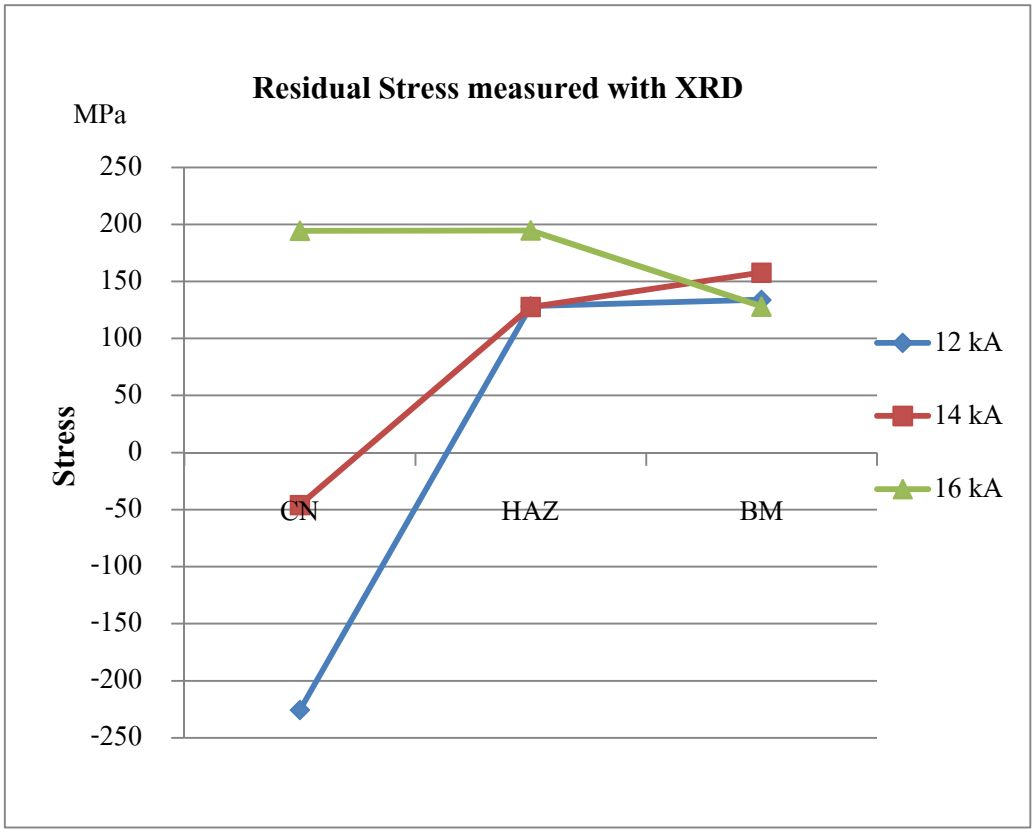
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน 14 kA ด้วย XRD

วัดครั้งที่	บริเวณกลางบ่อหลอมละลาย, (MPa)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ), (MPa)	บริเวณโลหะฐาน, (MPa)
1	-33.7	89.5	129.4
2	5.4	108.8	121.3
3	167.2	162.5	218.8
4	-411.7	167.6	154.4
5	43	109.8	165.1
ค่าเฉลี่ย	-45.96	127.64	157.8

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นภายในชิ้นงาน 16 kA ด้วย XRD

วัดครั้งที่	บริเวณกลางบ่อหลอมละลาย, (MPa)	บริเวณกระทบร้อน (HAZ), (MPa)	บริเวณโลหะฐาน, (MPa)
1	174.6	164.7	133
2	179.5	233.5	133.7
3	228.8	187.9	125.5
4	229.1	227.1	150.5
5	159.7	160.3	97.3
ค่าเฉลี่ย	194.34	194.7	128

เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.2-4.4 มาสร้างกราฟได้ตามรูปที่ 4.14 ชิ้นทดสอบกระแสเชื่อมที่ 12 kA และ 14 kA มีผลลการวัดค่าความเค้นตกค้างไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความเค้นแรงกดที่บริเวณกลางบ่อหลอมละลายและมีแนวโน้มไปทางความเค้นแรงดึงที่บริเวณระทบร้อนและต่อเนื่องไปจนถึงโลหะฐาน ส่วนชิ้นทดสอบกระแสเชื่อมที่ 16 kA มีความเค้นแรงดึงเท่านั้น ไม่ปรากฏความเค้นอัดบริเวณใดของชิ้นทดสอบ

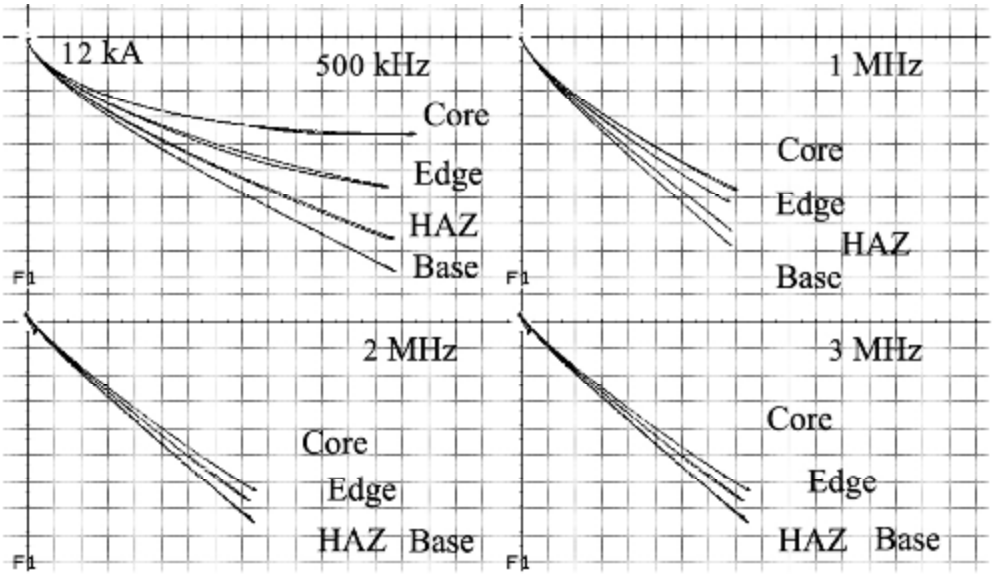


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบระดับค่าความเค้นของงานเชื่อมต้านทานชนิดจุด

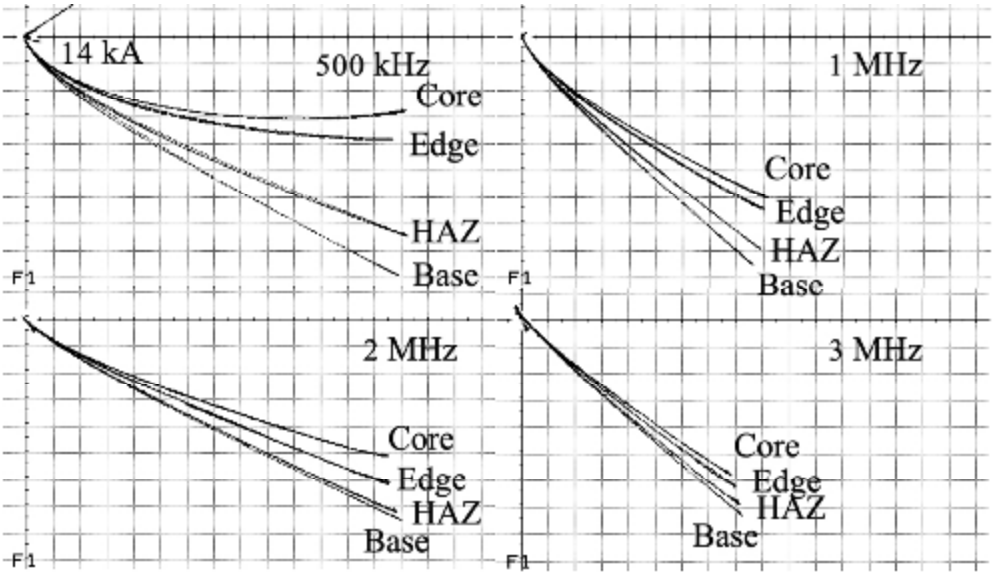
จากการสร้างแบบจำลองการสร้างความเค้นตกค้างด้วย FEM และการวัดชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างที่ถูกสร้างขึ้นด้วยการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบมีระดับค่าความเค้นตกค้างภายในที่แตกต่างกัน

4.3 ผลการวัดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน โดยวิธีกระแสไหลวน

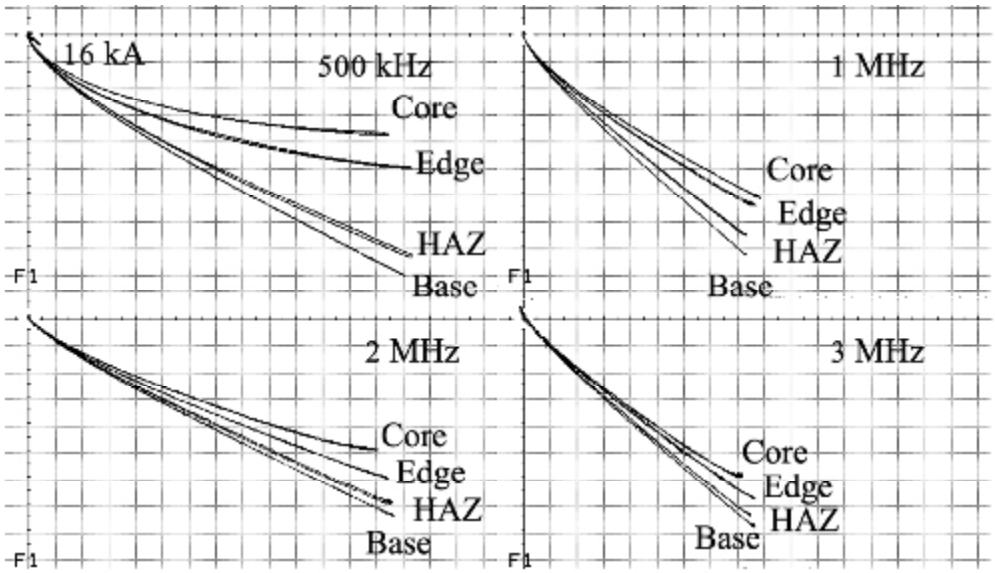
จากภาคผนวก ก. การคำนวณความถี่สำหรับการวัดความลึกจากผิวหน้าชิ้นงาน ในส่วนที่ทำการวัดบนตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นทดสอบงานเชื่อมแบบความต้านทานทั้ง3 ชิ้น คือ 12 kA 14 kA และ 16 kA ด้วยความถี่หัวตรวจสอบที่ 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, และ 3 MHz ผลการวัดความเค้นตำแน่งต่างๆ ของชิ้นงานถูกแสดงในรูปของเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ แกน X เป็น Resistance แกน Y เป็น Reactance ตามรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ12 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ



รูปที่ 4.16 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ14 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ผลการวัดชิ้นงานทดสอบ16 kA ที่ช่วงความถี่ต่างๆ

ค่าพิกัด X,Y และค่าอิมพีแดนซ์ถูกแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค. 1 จากการทดลองวัดพบว่าความถี่ทุกช่วงสามารถแยกแยะบริเวณต่างๆ ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะความถี่ ที่ 500 kHz และ 1 MHz ยกเว้น ความถี่ 2 MHz และ 3 MHz ที่วัดกับชิ้นงาน12 kA ไม่สามารถแยกชัดบริเวณ HAZ กับ Base ได้ ซึ่งเป็นผลมาจาก Standard Depth และแถบความเค้นตกค้างบริเวณทั้งสองมีช่วงที่แคบมาก

เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดค่าความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานซึ่งเป็นข้อมูลดิบมาวิเคราะห์ระบบการวัดด้วยANOVA ผลสรุปการวิเคราะห์ความสามารถระบบการวัดถูกแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสามารถระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ต่างๆ

ความถี่	%GR&R	ndc	เกณฑ์
500 kHz	35.77	3.68	ndc<5 , %GR&R>30%
1 MHz	22.48	7.95	ndc>5 , %GR&R<30%
2 MHz	57	2	ndc<5 , %GR&R>30%
3 MHz	37	3	ndc<5 , %GR&R>30%

พิจารณาผลจากตารางข้างบน ความถี่หัวตัวสอบที่ใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ความถี่ 1 MHz ด้วยเหตุผลที่ว่า มีค่า %GR&R อยู่ในช่วงร้อยละ 10-30 และมีค่า ndc (Number of Distinct

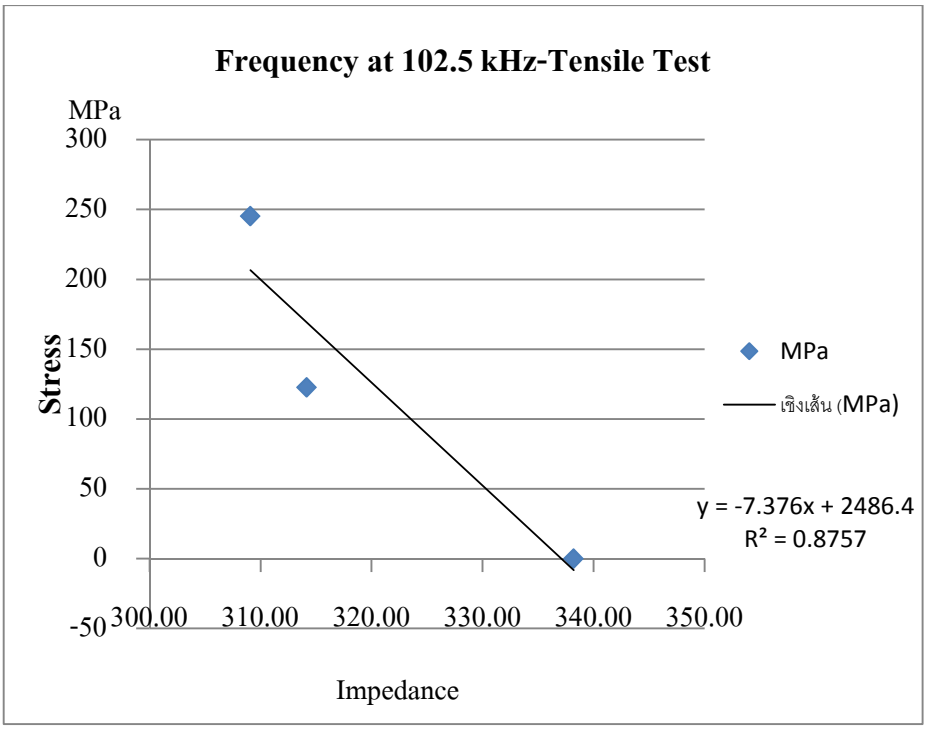
Categories) เท่ากับ 7.96 ซึ่งมากกว่า 5 หมายความว่าระบบการวัดที่ศึกษานี้มีความสามารถในการตรวจวัดและจำแนกความเค้นตกค้างที่มีความแตกต่างกันได้ประมาณ 7-8 ค่า ทั้งนี้ต้องศึกษาพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เพื่อลด %GR&R รองลงมาคือ ความถี่ 500 kHz แต่มีค่า %GR&R สูงกว่าที่กำหนด และมี ndc ต่ำกว่ากำหนดเล็กน้อย ต้องหาสาเหตุความผันแปรเพื่อลดหรือกำจัดทิ้ง ในทางตรงกันข้าม ความสามารถระบบการวัดที่ความถี่ 2 และ 3 MHz ไม่สามารถยอมรับได้ ระบบการวัดทั้งสองความถี่มีค่า %GR&R ที่สูงเกินไป และมีค่า ndc เท่ากับ 2 และ 3 นั่นคือ ความสามารถระบบการวัดสามารถชี้ค่าได้เพียงสองค่า คือ ต่ำ และสูง เท่านั้น ไม่เพียงพอต่อการวัดความเค้น

4.4 ผลการวัดความความเค้นภายในชิ้นงานทดสอบแรงดึงภายใต้ภาระแบบสถิต (Static Load Test)

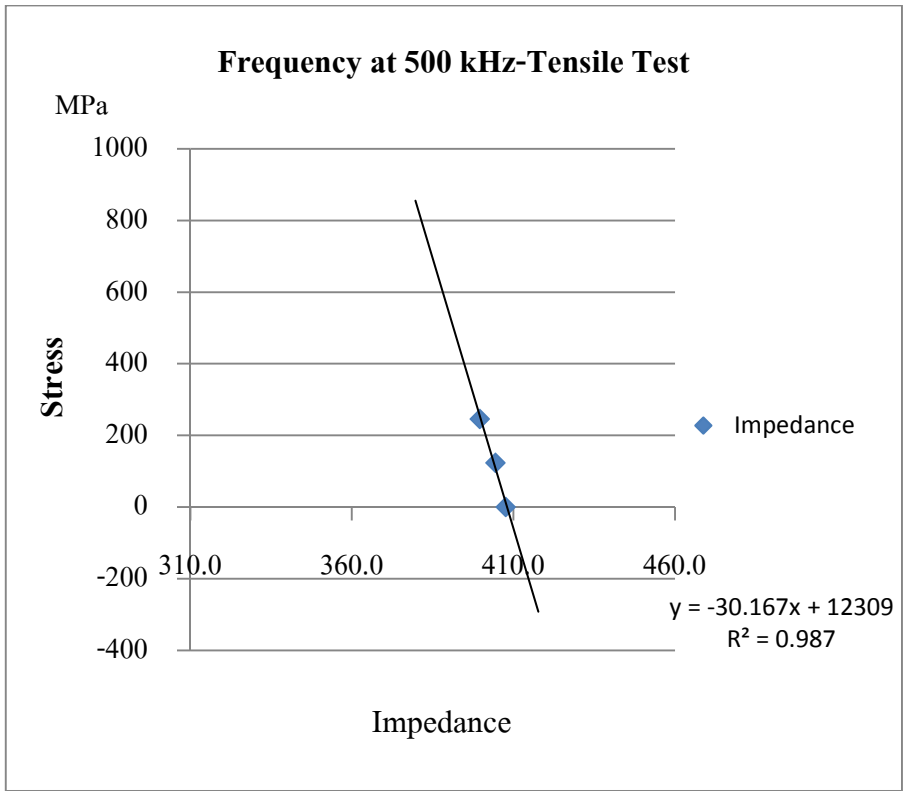
ชิ้นทดสอบแรงดึงภายใต้ภาระแบบสถิต(Static Load Test) วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรเพื่อหาจุดล้าตัวและจุดที่วัสดุชิ้นทดสอบรับแรงดึงได้สูงสุดโดยใช้แรงดึงแบบต่อเนื่อง(Dynamic Load Test) ค่าแรงดึงตั้งไว้ที่25,000 กิโลกรัมแรง ความเร็วในการดึง 20 มม./นาที จนกระทั่งชิ้นงานขาด ดังรูปที่ 4.18 แรงดึงสูงสุดที่จุดคราก วัดได้ 5400 kgf หรือ 264.8 MPa ค่าที่ได้นี้ทำให้ทราบว่าวัสดุที่นำมาทดสอบในงานวิจัยมีสมบัติตรงตามข้อกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุที่ถูกระบุไว้ในตารางที่ 3.1

รูปที่ 4.18 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจนขาดออกจากกัน

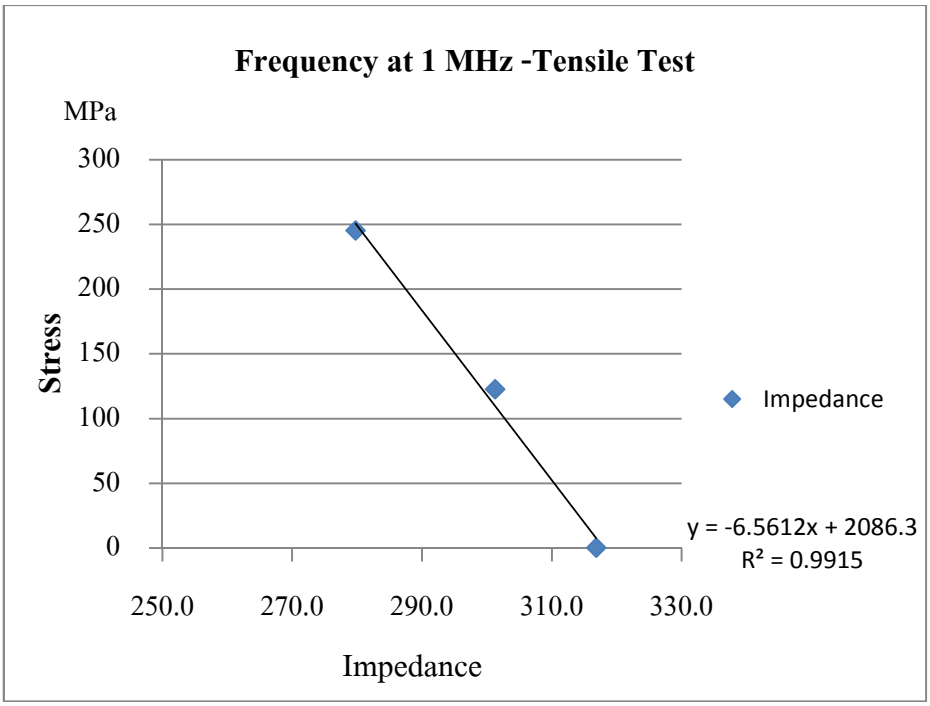
เมื่อทำการทดสอบแรงดึงและวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของหัวตรวจสอบความถี่ที่ 102.5 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz และ 3 MHz, เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง ค่าที่ได้จากการทดลองถูกแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.1 นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟให้แนวแกน X เป็นค่าอิมพีแดนซ์ และแนวแกน Y เป็นค่าความเค้นแรงดึงได้สมการเชิงเส้น นำมาใช้เป็น Calibration Curve ดังรูปที่ 4.19-4.23 ตามลำดับ



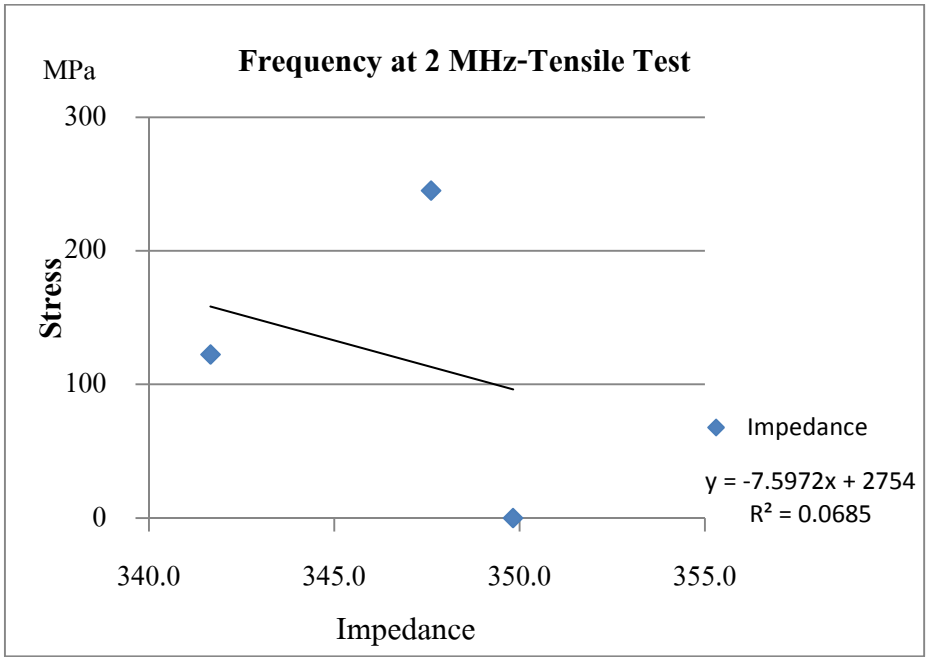
รูปที่ 4.19 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 102.5 kHz



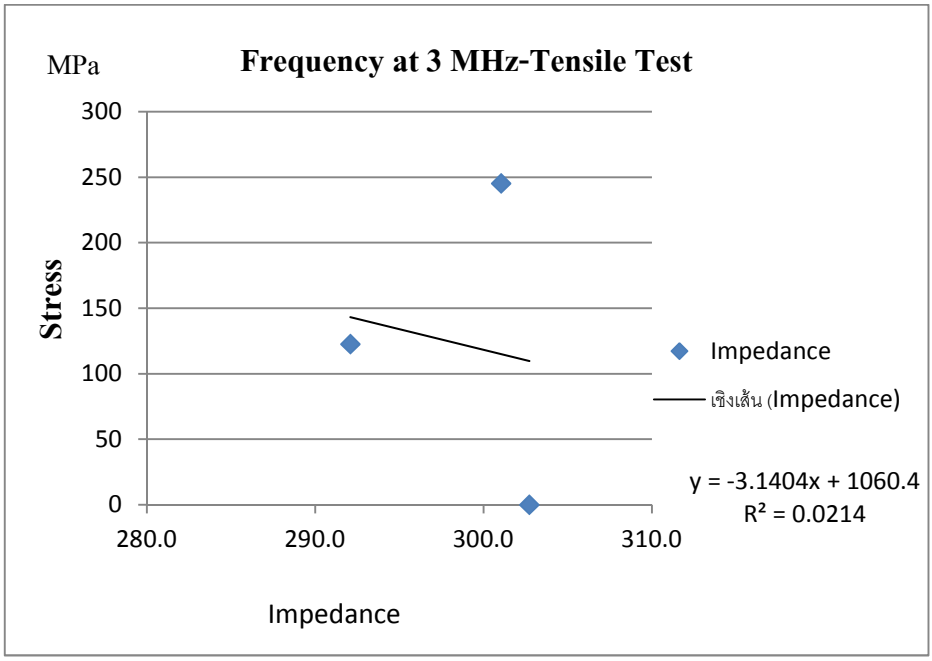
รูปที่ 4.20 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 500 kHz



รูปที่ 4.21 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 4.22 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 2 MHz

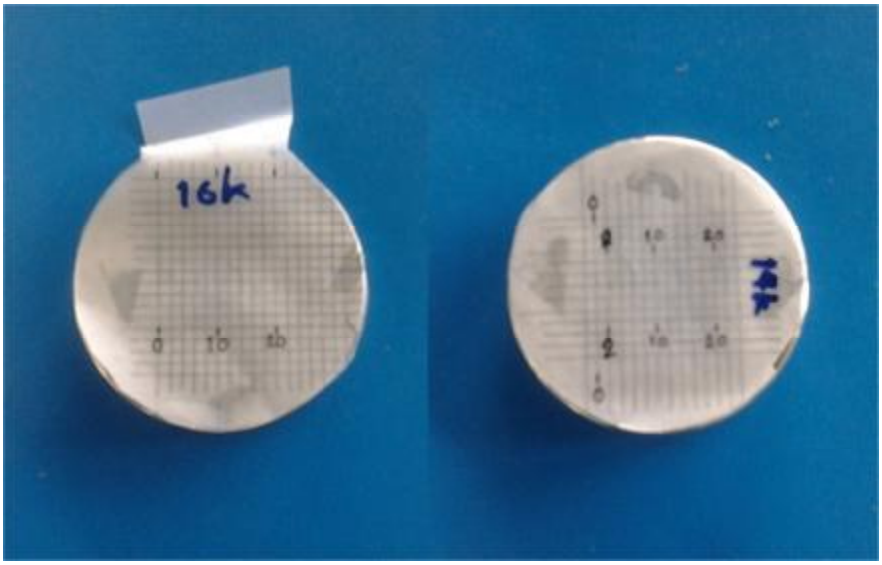


รูปที่ 4.23 Calibration Curve ของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 3 MHz

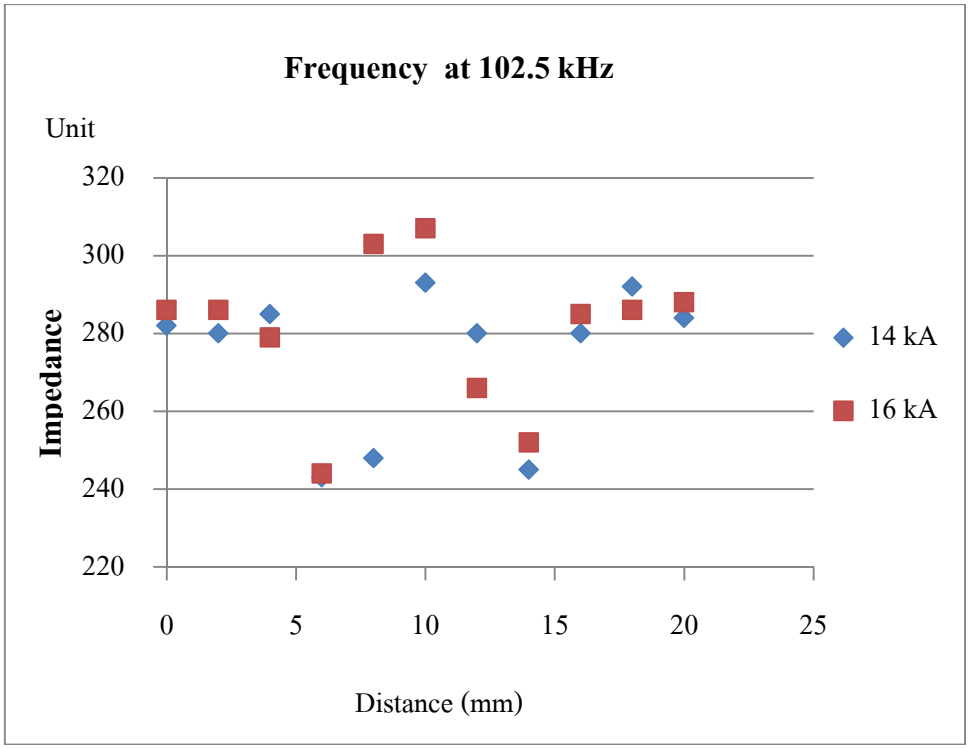
จากผลการทดลองเพื่อการสอบเทียบตามรูป 4.19 ถึง 4.23 แสดงกราฟสอบเทียบเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความความเค้นจากแรงดึงที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากตัวเครื่องมือวัดกระแสไหลวน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า R^2 มีเพียงความถี่ 102.5 kHz, 500 kHz และ 1 MHz เท่านั้นที่มีค่าเข้าใกล้1

จากการทดลองในหัวข้อ 4.3 และ 4.4 สรุปได้ว่า ความถี่หัวตรวจสอบที่ 2 และ 3 MHz ไม่เหมาะสมต่อการวัดค่าความเค้นตกค้าง

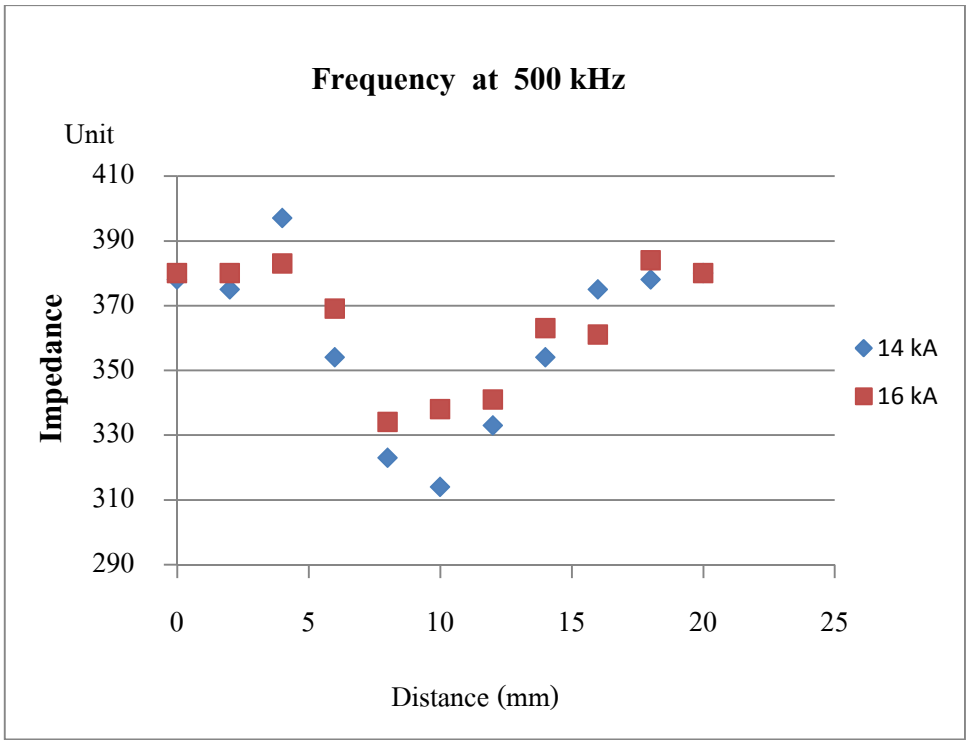
เมื่อทำการตีตารางช่องละ 2 มม. บนชิ้นทดสอบกระแส 14 kA และ 16 kA ตามรูปที่ 4.24 วัดค่าความเค้นตกค้างบนและสร้างกราฟอิมพีแดนซ์ จากรูปที่ 4.25-4.27 ความถี่หัวตรวจสอบวัดค่าความเค้นที่ 100 kHz ลักษณะรูปแบบของความเค้นมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระแสไหลวนที่วัดได้ในแนวลึกและบริเวณที่แคบกว่าเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 500 kHz และ 1 MHz ส่วนความถี่หัวตรวจสอบวัดค่าความเค้นที่ 500 kHz และ 1 MHz ลักษณะของการตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์ต่อความเค้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดอยู่บริเวณขอบโลหะฐานและบริเวณกระทบร้อน ในทางกลับกันค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดอยู่บริเวณบ่อหลอมละลาย ซึ่งมีอิทธิพลจากผลรวมของเฟอร์ไรท์และความเค้นภายในชิ้นงานทดสอบ



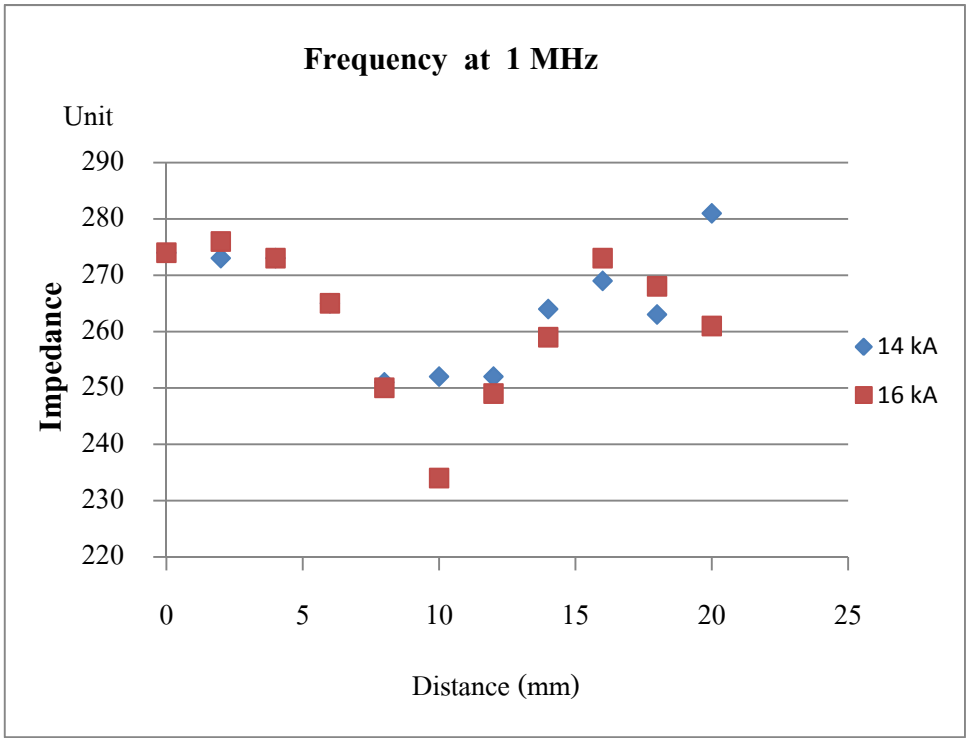
รูปที่ 4.24 การแบ่งตำแหน่งชิ้นงานวัดความเค้นของชิ้นงาน16 kA และ 14 kA



รูปที่ 4.25 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 102.5 kHz



รูปที่ 4.26 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 500 kHz

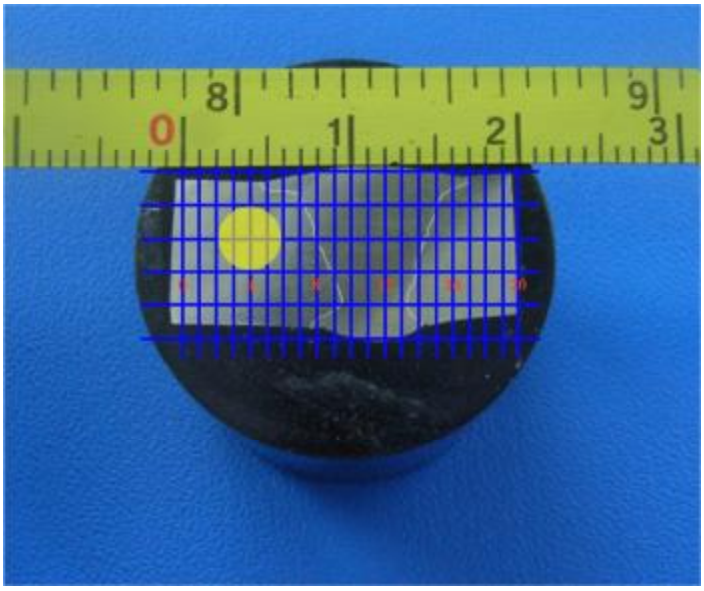


รูปที่ 4.27 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงาน14 kA 16 kA ที่ความถี่ 1 MHz

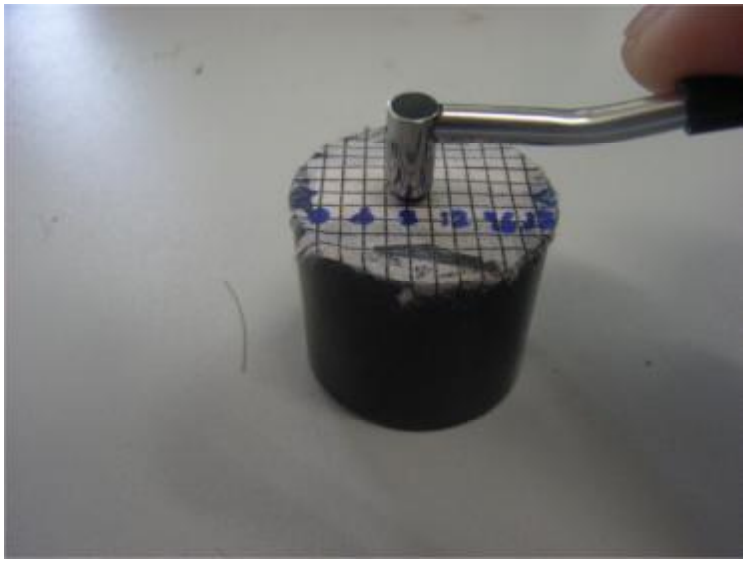
4.5 ผลการวัดค่าความเค้นตกค้างชิ้นงานต่อชนโดยการวัดด้วยกระแสไหลวน

จากการทดลองในหัวข้อ 4.3 และ 4.4 ทำให้ทราบว่า ความถี่หัวตรวจสอบที่ใช้งานได้ คือ102.5 kHz, 500 kHz และ 1 MHz เพื่อเพิ่มความมั่นใจในระบบการวัดด้วยกระแสไหลวนว่าสามารถใช้กับงานเชื่อมจริงได้ การเชื่อมต่อชนมีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง และมีตัวแปรการเชื่อมหลายตัว

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการนำชิ้นงานเชื่อมต่อชนมาวัดค่าความเค้นตกค้างมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความผันแปรและความสามารถของระบบการวัดด้วยกระแสไหลวน เครื่องมือที่ใช้ตามที่ระบุในหัวข้อ 3.3.3 และปรับค่าความถี่ที่ในช่วงที่กำหนดตามตารางที่ 3.3 ใช้ผู้ทำการวัด(Appraiser) จำนวน 2 คน วัดชิ้นงานชื่อมต่อชน 1 ตัวอย่าง แบ่งช่วงระยะการวัดห่างกันตำแหน่งละ1 มม. แต่ละตำแหน่งวัด 3 ครั้งบันทึกผล ตามรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 ภาพจำลองการวัดบริเวณต่างๆ บนชิ้นงาน



รูปที่ 4.29 การวัดความเค้นบริเวณต่างๆ บนชิ้นงาน

4.5.1 ความถี่หัวตรวจสอบ 102.5 kHz

ใช้เครื่องวัดกระแสไหลวนตามหัวข้อ3.3.3 ปรับตั้งค่าความถี่102.5 kHz ตามตารางที่ 3.3 ผลการวัดเป็นไปตาม ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 102.5 kHz

ระยะ	Appraiser# 1 (MPa)	Appraiser# 2 (MPa)	บริเวณ
2	54	68	ออสเทนนิติค
3	137	115	ออสเทนนิติค
4	133	239	ออสเทนนิติค
5	156	69	ออสเทนนิติค
6	79	161	ออสเทนนิติค
7	300	275	ออสเทนนิติค
8	-323	-139	ออสเทนนิติค
9	-742	-742	เฟอร์ไรท์
10	-838	-838	เฟอร์ไรท์
11	-767	-838	เฟอร์ไรท์
12	-767	-838	เฟอร์ไรท์
13	-782	-838	เฟอร์ไรท์
14	-431	-99	เฟอร์ไรท์
15	65	292	ออสเทนนิติค
16	84	313	ออสเทนนิติค
17	132	158	ออสเทนนิติค
18	170	166	ออสเทนนิติค

นำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.6 แทนในสมการเชิงเส้นของ 100 kHz คือ (-7.376x)+2486.4 และนำไปสร้างกราฟ จะได้กราฟเปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นตกค้างระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสอง ตามรูปที่ 4.30

4.5.2 ความถี่หัวตรวจสอบ 500 kHz

ใช้เครื่องวัดกระแสไหลวนตามหัวข้อ3.3.3 ปรับตั้งค่าความถี่500 kHz ตามตารางที่ 3.3 ผลการวัดเป็นไปตาม ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 500 kHz

ระยะ	Appraiser# 1 (MPa)	Appraiser# 2 (MPa)	บริเวณ
2	-572.309	-270.639	ออสเทนนิติค
3	-572.309	-421.474	ออสเทนนิติค
4	-602.476	-300.806	ออสเทนนิติค
5	-632.643	-270.639	ออสเทนนิติค
6	-572.309	-240.472	ออสเทนนิติค
7	181.866	151.699	ออสเทนนิติค
8	966.208	1237.711	ออสเทนนิติค
9	905.874	1267.878	เฟอร์ไรท์
10	1388.546	1660.049	เฟอร์ไรท์
11	1358.379	1780.717	เฟอร์ไรท์
12	1298.045	1660.049	เฟอร์ไรท์
13	1086.876	1328.212	เฟอร์ไรท์
14	936.041	1207.544	เฟอร์ไรท์
15	0.864	151.699	ออสเทนนิติค
16	-662.81	-330.973	ออสเทนนิติค
17	-753.311	-330.973	ออสเทนนิติค
18	-723.144	-29.303	ออสเทนนิติค

นำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.7 แทนในสมการเชิงเส้นของ 500 kHz คือ (-30.167x)+12309 และนำไปสร้างกราฟ จะได้กราฟเปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นตกค้างระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองตามรูปที่ 4.31

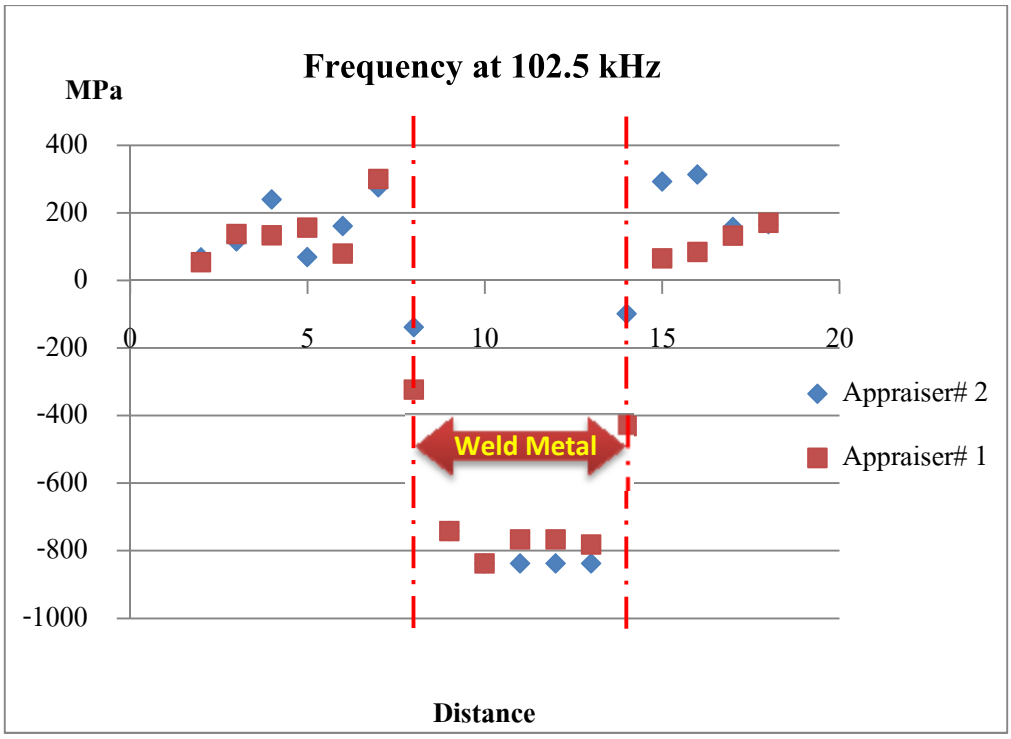
4.5.3 ความถี่หัวตรวจสอบ 1 MHz

ใช้เครื่องวัดกระแสไหลวนตามหัวข้อ3.3.3 ปรับตั้งค่าความถี่1 MkHz ตามตารางที่ 3.3 ผลการวัดเป็นไปตาม ตารางที่ 4.8

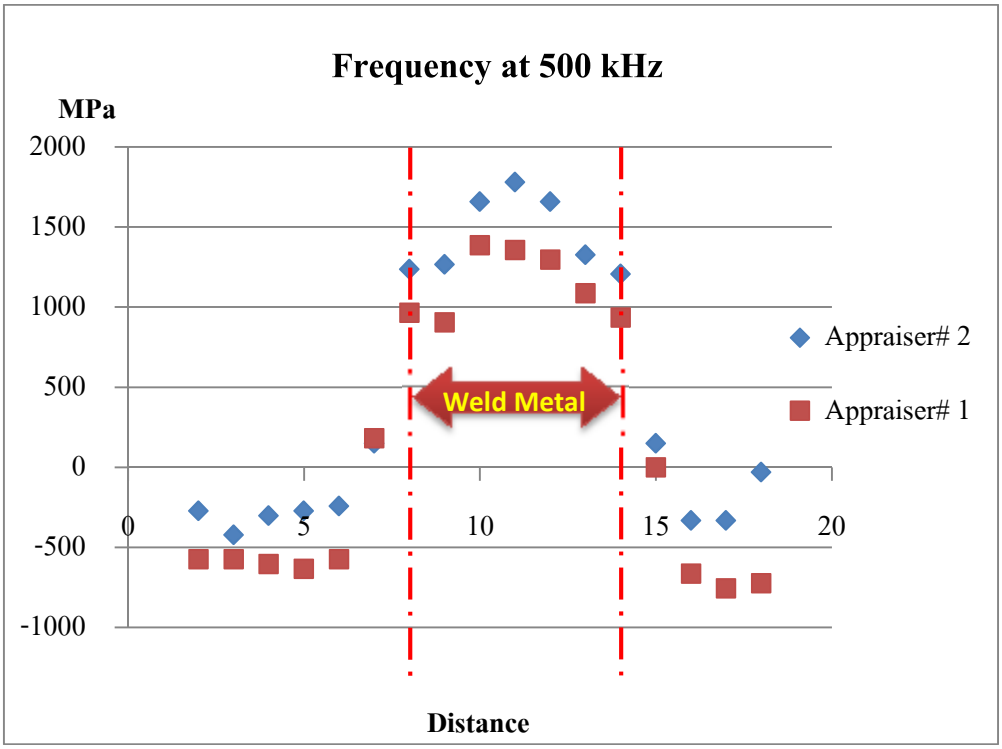
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการประเมินค่าความเค้นด้วยกระแสไหลวน 1 MHz

ระยะ	Appraiser# 1 (MPa)	Appraiser# 2 (MPa)	บริเวณ
2	26.08	72.01	ออสเทนนิติค
3	32.64	72.01	ออสเทนนิติค
4	26.08	65.45	ออสเทนนิติค
5	26.08	72.01	ออสเทนนิติค
6	72.01	91.70	ออสเทนนิติค
7	98.26	176.99	ออสเทนนิติค
8	288.53	321.34	ออสเทนนิติค
9	400.07	478.81	เฟอร์ไรท์
10	498.49	524.73	เฟอร์ไรท์
11	518.17	537.86	เฟอร์ไรท์
12	531.30	518.17	เฟอร์ไรท์
13	459.12	505.05	เฟอร์ไรท์
14	347.58	386.95	เฟอร์ไรท์
15	157.31	183.55	ออสเทนนิติค
16	58.89	72.01	ออสเทนนิติค
17	19.52	65.45	ออสเทนนิติค
18	78.57	117.94	ออสเทนนิติค

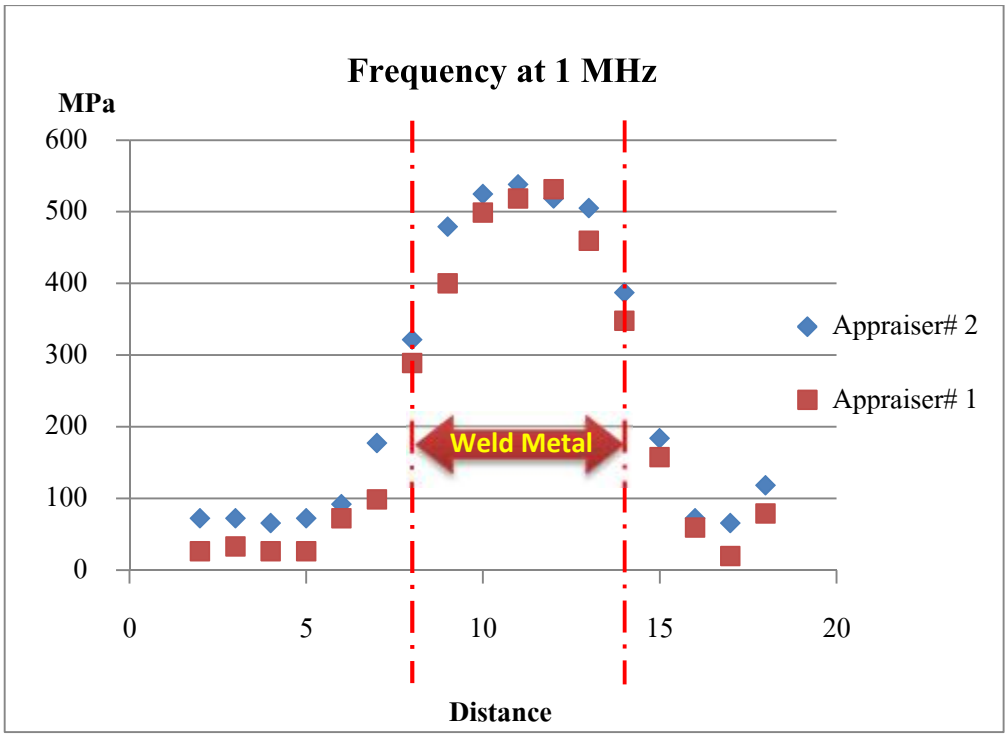
นำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.8 แทนในสมการเชิงเส้นของ 1 MHz คือ (-6.5612x)+2086.3 และนำไปสร้างกราฟ จะได้กราฟเปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นตกค้างระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสอง ตามรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่2.5 kHz



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่500 kHz



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบการวัดค่าความเค้นระหว่างผู้ทำการวัดทั้งสองที่MHz

จากรูปที่ 4.29 – 4.31 เห็นได้ลักษณะของกราฟมีความคล้ายกันมาก บางจุดเกือบจะซ้อนทับกัน แสดงให้เห็นได้ว่าระบบการวัดสามารถใช้วัดความเค้นตกค้างได้และในระบบการวัดมีความผันแปรอาจเกิดมาจากธรรมชาติ หรือจากการวัดซ้ำของผู้ทำการวัด หรือความแตกต่างของผู้วัดเอง จำเป็นต้องมีการแยกแยะสาเหตุของความผันแปรของข้อมูลการวัด

4.6 การประเมินผลคุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานโดยวิธีกระแสไหลวน

ความสามารถในการทำซ้ำเป็นความผันแปรของการวัดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการวัดหลายครั้ง บนชิ้นงานชิ้นเดียวกัน และเงื่อนไขในการวัดที่เหมือนกันของระบบการวัด เพื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งนั้นใกล้เคียงกันหรือไม่เป็นการตรวจเช็คประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด ส่วนความสามารถในการทำให้เกิดใหม่ เป็นความผันแปรของการวัด เมื่อทำการวัดหลายครั้ง บนชิ้นงานชิ้นเดียวกัน แต่เงื่อนไขในการวัดต่างกัน โดยการเปลี่ยนผู้ทำการวัด เพื่อพิจารณาค่าที่ชี้วัดออกมาว่ายังคงความน่าเชื่อถือได้หรือไม่ เป็นการตรวจประสิทธิภาพของคนวัด มีการเปรียบเทียบความผันแปรโดยรวมของกระบวนการ (Precision-to-Total Variation หรือ P/TV) เพื่อตรวจจับความผันแปรของกระบวนการ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้ผู้ทำการวัด (Appraiser) จำนวน 2 คน วัดชิ้นงานทั้ง 3 ตัวอย่าง
2. ปรับค่าความถี่ของกระแสที่จ่ายออกจากเครื่องมือวัดตั้งแต่ 500 kHz 1MHz
3. ให้ผู้ทำการวัดแต่ละคน วางหัวตรวจสอบตั้งฉากบนพื้นผิวชิ้นงานตรงตำแหน่งที่ระบุ เพื่อวัดค่าความต้านทานรวมของเครื่องมือวัด ตำแหน่งละ 3 ครั้ง โดยหยิบชิ้นงานและสุ่มวัดตำแหน่งต่างๆ จนครบ และบันทึกค่า (X,Y) บน Impedance Plane
4. คำนวณค่าเฉลี่ยและพิสัยสำหรับผู้ทำการวัดทั้ง 2 คน และทำการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการทำซ้ำ (ค่าความผันแปรของอุปกรณ์วัด Equipment Variation: EV)

$$EV = \sqrt{MS_{pool}} \tag{4.1}$$

เมื่อ d2 คือ แฟคเตอร์ปรับค่าไม่เอนเอียงในการประมาณค่า

5. วิเคราะห์ค่าความสามารถในการทำให้เกิดใหม่ (ค่าความผันแปรของผู้ทำการวัด Appraiser Variation: AV)

$$AV = 5.15\sqrt{\frac{MS_O - MS_P}{nr}} \tag{4.2}$$

เมื่อ n คือ จำนวนชิ้นงานที่ผู้ทำการวัดแต่ละคนวัด
r คือ จำนวนซ้ำที่ผู้ทำการวัดแต่ละคนทำการวัดแต่ละชิ้นงาน

ถ้าค่าที่ได้จากสมการที่ 4.4 มีค่าติดลบ แสดงว่าค่าความสามารถในการทำให้เกิดใหม่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความสามารถในการทำซ้ำจึงประมาณค่าให้ AV = 0

6. คำนวณความแม่นยำของระบบการวัดได้จากผลรวมของความผันแปรทั้งสอง ได้จาก

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \tag{4.3}$$

7. หาค่าความผันแปรของความแตกต่างของชิ้นงานได้จาก สมการที่ 4.4

$$PV = 5.15\sqrt{\frac{MS_P - MS_{OP}}{kr}} \tag{4.4}$$

8. ประเมินความผันแปรระหว่างชิ้นงานได้จากค่าความผันแปรโดยรวม (Total Variation, TV)

$$TV = \sqrt{(GR\&R)^2 + PV^2} \quad (4.5)$$

โดย $PV = 5.15\sigma_P$

เมื่อ $\sigma_P = R_P/d_2$ *

การประเมินค่าความแม่นยำร้อยละ GR&R หรือค่าความสามารถในการทำซ้ำและค่าความสามารถในการทำให้เกิดใหม่ด้วยกฎเกณฑ์ดังนี้[11]

ถ้าร้อยละGR&R < ร้อยละ10	สามารถยอมรับความสามารถระบบการวัดได้มีความน่าเชื่อถือสูง
ถ้าร้อยละ10 ≤ร้อยละGR&R ≤ ร้อยละ30	อาจยอมรับได้ โดยพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เช่น ค่าใช้จ่าย
ถ้าร้อยละGR&R >ร้อยละ 30	ไม่สามารถยอมรับความสามารถระบบการวัดได้ มีความจำเป็นต้องระบุหาสาเหตุความผันแปรเพื่อลดหรือกำจัดทิ้ง

จากข้อมูลการทดลองและวิเคราะห์ความผันแปรด้วยANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น95% หรือ 5.15σ สรุปความสามารถของระบบการวัดตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสามารถระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนของความถี่ต่างๆ

ความถี่	%GR&R	ndc	เกณฑ์
100 kHz	22.820	6.271	ndc>5 , %GR&R<30%
500 kHz	28.537	4.735	ndc<5 , %GR&R<30%
1 MHz	16.6148	8.368	ndc>5 , %GR&R<30%

เมื่อพิจารณาจากตารางข้างบนพบว่า 1 MHz มีระบบการวัดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจาก ค่า ndc (Number of Distinct Categories) ซึ่งอุตสาหกรรมทั่วไปกำหนดให้ndc มีค่าประมาณ 5 ค่าขึ้นไป ระบบการวัดที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 8.4 หมายความว่า ระบบการวัดที่ศึกษาวิจัยมีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรและจำแนกค่าความเค้นตกค้างที่วัดได้ออกเป็นประเภทได้ประมาณ 8 ประเภท หรือค่าที่มีความแตกต่างกัน และประกอบการพิจารณาจากค่า Gauge R&R จากการประเมิน EV มีค่าเท่ากับ 110.84 MPa มีความหมายว่า ในการวัดซ้ำด้วยระบบวัดนี้จะได้ความผันแปร±55.42 MPa รอบค่าจริงของงาน เมื่อพิจารณา AV มีค่าเท่ากับ 131.64 MPa ชี้ว่า ในระบบการวัดนี้จะมีความผันแปรเนื่องจากความแตกต่างของพนักงานวัดเท่ากับ± 65.82 MPa รอบค่าจริงของงาน ความผันแปรของระบบการวัด สาเหตุส่วนใหญ่มาจากด้านความสามารถในการทำให้เกิดใหม่ของการวัดซึ่งส่งผลมาจากผู้ทำการวัด

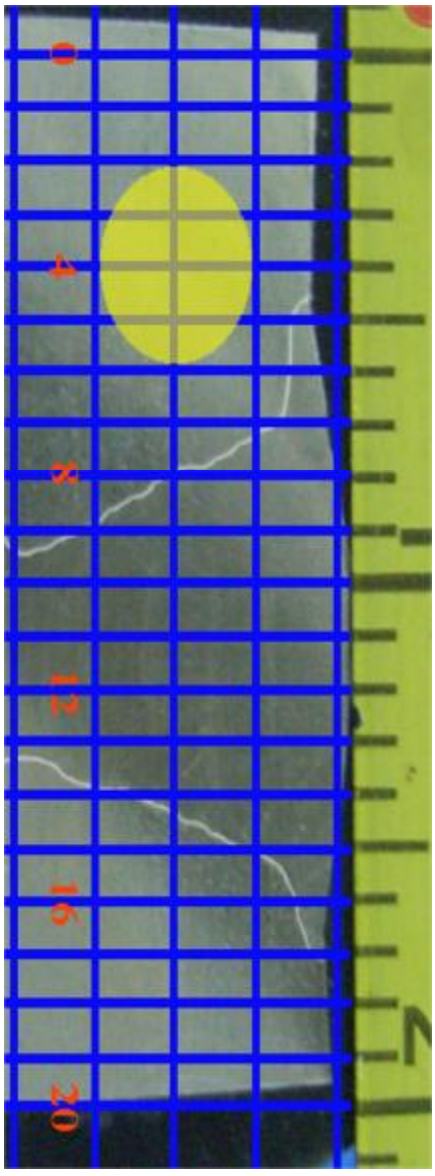
พิจารณาความสามารถระบบการวัดจากความผันแปรโดยรวมจากค่า GR&R ซึ่งมีค่าเท่ากับ 172.86 MPa แสดงว่า ระบบการวัดนี้จะมีความผันแปรโดยรวมเท่ากับ± 86.43 MPa ต่อจากนั้นพิจารณา% GR&R มีค่าร้อยละ 16.61 แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดนี้สามารถใช้ประมาณค่าความเค้นตกค้างได้

4.7 ความไม่แน่นอนของการวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธีกระแสไหลวน

จากหัวข้อ 4.6 ชี้ให้เห็นว่าระบบการวัดความเค้นตกค้างที่ความถี่1 MHz.ให้ผลดีที่สุด เพื่อให้มั่นใจในระบบการวัดยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงความไม่แน่นนอนในการวัดด้วย หากพิจารณาความไม่แน่นอนการวัดตามภาคผนวก ค ตาราง ค.11 รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ฉ ผลการวัดตามตารางที่ 4.10 จากตารางจะเห็นว่าตำแน่งที่ 9-14 เป็นตำแน่งบริเวณแนวเชื่อมลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเฟอร์ไรท์ โดยเฉพาะตำแหน่งที่ 9 เป็นรอยต่อบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าความนำไฟฟ้าตามสมการที่ 2.48 ทำให้เกิดความผันแปรในการวัดสูง ต้องทำการศึกษา

ต่อไป ระบบการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนด้วยความถี่หัวตรวจสอบ 1 MHz ภายใต้จุดคราก ± 58 MPa ที่ระดับความเชื่อมั่น95% โดยทำการวัดทั้งหมด102 ครั้ง

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 1 MHz

ชิ้นตัวอย่าง-ตำแหน่ง	ค่าประมาณของค่าจริง	SD	Variance	UA	แผนผังตำแหน่งของการตรวจวัดความเค้นตกค้างบนชิ้นงานต่อชน
2	43.70	24.59	466.43	10.04	
3	48.17	20.23	475.29	8.26	
4	41.24	24.65	649.29	10.06	
5	44.08	28.57	846.18	11.66	
6	77.56	19.31	2042.65	7.88	
7	134.27	46.81	8894.60	19.11	
8	302.03	22.15	7310.41	9.04	
9	436.82	68.50	3611.05	27.96	
10	506.81	17.69	298.80	7.22	
11	524.49	12.53	231.60	5.11	
12	521.58	18.64	1015.61	7.61	
13	481.10	30.06	4330.56	12.27	
14	365.66	25.06	10306.58	10.23	
15	174.92	14.71	4146.25	6.00	
16	55.88	20.08	500.59	8.20	
17	41.78	24.06	1358.46	9.82	
18	94.37	27.39	750.40	11.18	

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินค่าความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่สร้างขึ้นโดยวิธีการใช้กระแสไหลวน ความเค้นที่สร้างขึ้นถูกพิสูจน์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม COMSOL และทดลองวัดค่าความเค้นด้วยเทคนิควิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) สรุปผลดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยทดลอง

จากการทดลองศึกษางานวิจัย มุ่งเน้นเพื่อการประเมินค่าความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นการเพิ่มทางเลือกในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายและเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริง โดยองค์ประกอบของข้อมูลจากผลการทดลองการประเมินค่าความเค้นตกค้างโดยการใช้กระแสไหลวน ได้เป็นแนวทางดังต่อไปนี้

- การหาค่าความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบของโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล และการกำหนดขั้นตอนการประมวลผลต้องเหมาะสมกับชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะการทดลองแต่ละเงื่อนไข ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบมีค่าความเค้นตกค้างแตกต่างกัน

- การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดสามารถสร้างความเค้นที่แตกต่างกันบนชิ้นทดสอบได้ ผลของการวัดด้วยกระแสไหลวนค่าอิมพีแดนซ์แสดงให้เห็นถึงลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบ

- ค่าความเค้นตกค้างที่วัดจากเทคนิควิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันเป็นค่าความเค้นตกค้างที่ไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง แต่มีผลกระทบจากระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม และตรวจสอบได้เฉพาะผิวเท่านั้น การวัดด้วยวิธีนี้นี้แสดงให้เห็นว่า ชิ้นทดสอบมีค่าความเค้นแตกต่างกันจริง ในงานวิจัยนี้ การวัดด้วยวิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก อาจมีสาเหตุมาจากงานเชื่อมที่มีความเค้นอัดและความเค้นดึงอยู่ในบริเวณใกล้กัน

- เมื่อนำระบบการวัดด้วยกระแสไหลวนไปสอบเทียบกับเครื่องทดสอบแรงดึง ผลการทดลองสรุปได้ว่า ความถี่ที่ 0.1, 0.5 1 MHz เท่านั้นที่R2 มีค่าเข้าใกล้ 1 สามารถนำมาใช้ในการวัดค่าความเค้นตกค้างภายในชิ้นทดสอบได้

- การวัดด้วยวิธีการกระแสไหลวนเป็นการหาค่าความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าตามความเค้นที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ การใช้หัวตรวจสอบที่มีความไวในการตรวจวัด การวางแนวหัวตรวจสอบก็เป็นสิ่งสำคัญ หัวตรวจสอบต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าชิ้นงาน และสัมผัสผิวหน้าชิ้นงานเท่านั้น ไม่ควรออกแรงกดหัวตรวจสอบและพื้นหน้าผิวทดสอบต้องมีความเรียบเพื่อให้หัวตรวจสอบสัมผัสผิวหน้าชิ้นงานในแนวระนาบเสมอกันตลอดผิวหน้าและห่างจากขอบชิ้นทดสอบในระยะ 2 มม. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหัวตรวจสอบที่ใช้ซึ่งส่งผลต่อการแสดงตำแหน่งXY บนหน้าจอแสดงผล ตำแหน่งที่วัดต้องห่างจากขอบของชิ้นทดสอบ มีความจำเป็นต้องปรับความถี่ในการใช้งานเพื่อตรวจสอบให้มีความถูกต้องและแม่นยำ

- ค่าความเค้นที่พบในชิ้นทดสอบ ปรากฏในทำนองเดียวกัน กล่าวคือค่าอิมพิแดนซ์บริเวณโลหะฐานและบริเวณกระทบร้อนมีค่าค่าอิมพิแดนซ์น้อยกว่าค่าอิมพิแดนซ์บริเวณบ่อหลอมละลายซึ่งมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของเฟอร์ไรท์ ส่งผลให้ค่าความเบี่ยงเบนของการวัดสูง

- การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีกระแสไหลวนชิ้นทดสอบจะต้องมีค่านำไฟฟ้าเพราะอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อชิ้นทดสอบมีความเค้นตกค้างและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป จากที่ทำให้ทราบว่าความถี่ที่ใช้ในการวัดงานได้ดีที่สุด คือ 1 MHz สามารถแยกค่าของการวัดได้ประมาณ 8 ค่า ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty) แบบ U_{ISO} ของการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนเท่ากับ ± 58 MPa ที่ความเชื่อมั่น 95 %

จากงานวิจัยพบว่าสามารถนำวิธีการตรวจสอบนี้ไปใช้ตรวจสอบในงานอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ เช่น งานที่เกี่ยวกับกระบวนการรีดผิวขึ้นรูป การซ่อมบำรุงในงานเชื่อมหรือการประเมินค่าความเค้นตกค้างจากงานอื่นๆได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เป็นการแนะนำองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลองและแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยให้ดีขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อการทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้อง จากการประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวน โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- สภาพผิวของชิ้นทดสอบ ที่จะทำการประเมินค่าความเค้นตกค้างควรมีความราบเรียบของผิว ซึ่งส่งผลต่อการประเมินค่าความเค้นตกค้างบนชิ้นทดสอบ การประเมินค่าความเค้นกระทำได้ที่ความลึกไม่เกิน 1ซม.และศึกษาอิทธิพลของเฟอร์ไรท์ต่อค่าการนำไฟฟ้า

- เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านSkin depth ของการตรวจสอบกระแสไหลวน การกำหนดจุดตรวจสอบในแต่ละครั้งบนชิ้นทดสอบ ถ้าต้องการเก็บข้อมูลซ้ำ ควรใช้จุดตรวจสอบตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงจุดตรวจสอบที่ไม่อยู่ในตำแหน่งเดิมแม้เพียงเล็กน้อยของการวัดซ้ำ จะส่งผลต่อค่าความนำไฟฟ้า เนื่องจากพารามิเตอร์อื่นๆ ภายในชิ้นทดสอบทำให้การสนองตอบของสัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป

- การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ความถูกต้องแม่นยำหรือความคลาดเคลื่อนในการคำนวณขึ้นอยู่กับการประพฤติกรรมของลักษณะปัญหาที่เหมาะสม ในการปฏิบัติงานจริงยังมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่น คนหรือเครื่องมือ หรือ สภาวะแวดล้อมอื่นๆที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

1. ชนะ กสิภาร์, 2528, **ความแข็งแรงของวัสดุ**, ชวนพิมพ์, กรุงเทพ, หน้า 1-2.

2. สิริศักดิ์ ปโยธรสิริ,2549, **กลศาสตร์วัสดุ**, ว. เพ็ชรสกุล, นนทบุรี, หน้า 57-58.

3. P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadesia, 2001, "Residual Stress Part 1- Measurement Techniques", **Materials Sci**, Vol. 17, pp. 355-365.

4. พจนาฎ สุวรรณมณี, 2546, **เซ็นเซอร์และทรานดิวเซอร์เบื้องต้น**, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 241-243.

5. พณพล ปั้นเงิน,2548, **การประเมินค่าความเค้นตกค้างโดยการใช้คลื่นความถี่สูง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า36-38

6. เมธาวี ลาชมภู, 2546, **การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้างกับสมบัติการนำไฟฟ้าของลวด ED. Wire**, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า197-212.

7. ภักดี ดำเนินผล, 2552, **การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลเหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนนิติค เกรด AISI 304**, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า11-14

8. ประจักษ์ อ่างบุญตา, 2547, **การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเหนียวด้วยอะคูสติกอิมัชชั่น**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า16-21

9. ฟูจิอิ ซาโตะ, 2539, **การทดสอบแบบไม่ทำลาย**, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่ น), กรุงเทพฯ, หน้า 197-212.

10. HOCKING, 2009, "Shielded Surface Probes 2", **Eddy Current Probes & Accessories,** pp. 6-17

11. กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ,**การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) (ประมวลผลด้วย MINITAB)**, สมาคมส่งเสริม(ไทย-ญี่ปุ่ น) กรุงเทพฯ หน้า 92-140

12. สมนึก บุญพาไสว, 2545, **การวัดและเครื่องมือวัด = Measurement and Instrumentation**, สำนักพิมพ์ท้อป กรุงเทพฯ, หน้า 272 – 305

13. ธนชาติ แกว่นธัญกรณ์, 2551, **การศึกษาความเค้นตกค้าง ในรอยเชื่อมต่อแบบ ที เค วาย**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า10-44.

14. Hillmann, S., Heuer, H., Baron, H.-U., Bamberg, J. , Yashan, A. and N. Meyendorfa, 2009, Near-Surface Residual Stress-Profiling With High Frequency Eddy Current Conductivity Measurment, **Proceedings of the 35th Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,** 20–25 July (2008), pp. 1349-1355.

15. Luming, L., 2003, Magnetic fields abnormality caused by welding residual stress**, Journal of Magnetism and Magnetic Material,** pp. 385-391.

16. Zergoug, M., Kamel, G., and N. Boucherou, 2008, Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method, **The Journal of American Science**, pp. 1-6

17. Khan, S.H., Ali, F., Nusair Khan, A., Iqbal, M.A., 2008, Eddy Current Detection of Changes in Stainless Steel after Cold Reduction, **Computational Materials Science**, pp. 623-628.

18. Sariel J., 2006, Residual Stress Distribution in GTA Spot Welding Ti6AI4V Disks**, International Centre for Diffraction Data**, pp. 195-200.

19. ฉิชาภัทร ช่วยชูหนู, 2555, **การวิเคราะห์การไหลของอากาศและการกระจายความร้อนภายในตู้อบเด็ก โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า127

20. WONGPANYA, P., 2009, Welding Residual Stresses in Two Competing Single V-Butt Joints, **Journal of Metals, Materials and Minerals**, Vol.19 No.1 pp. 67-75.

21. Higgins, R., A., 1998, **Engineering Metallurgy Part I Applied Physical Metallurgy**, p. 341.

22. Smith, W., F. 1993, Foundations of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill, pp. 715-716.

23. Kalpakjian, S., Manufacturing Process for Engineering Materials, ADDISON WESLEY, pp. 62-63, 792-793.

24. Hellier, C., J., 2001, Handbook of Nondestructive Evaluation, Mc Graw Hill, pp 8-1-8-51

25. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553, **ทองแดงและทองแดงเจือสำหรับจุดประสงค์ทั่วไปทางไฟฟ้า: เส้น และแท่ง**, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, หน้า9

26. Plaut, R. L.,2007, **A Short Review on Wrought Austenitic Stainless Steels at High Temperatures: Processing, Microstructure, Properties and Performance**, Materials Researcg, Vol.10, pp. 453-460

27. Lyttle, A.K., Anderson, G.D., Frick, D.H., McGrew, J. Meyer, W.D., Miller, A.R. and Telford, R.T., 1991, "Physics of Welding", **American Welding Society**, Welding Hand Book, 8th ed., Vol. 1, p. 35.

28. Dent, P., Bohr, C.J., Gasser, G.R., Gerken, M.J., Hallum, L.D., Lee, W.J., Mccauley, B.R., Orts, H.D., Oyler, W.G., Shieh, T.W. and Wu, C.K., 1992, "Spot, Seam, and Projection Welding", **American Welding Society**, Welding Hand Book, 8th ed., Vol. 2, pp. 532-578.

29. Messler, Robert W., 1999, **Principles of welding**, John Wiley & Sons, Inc., pp. 127-178

ภาคผนวก ก

การคำนวณความถี่สำหรับการวัดความลึกชิ้นงาน

การคำนวณความถี่สำหรับการวัดความลึกชิ้นงาน

A. Test Frequency for Eddy Current

From Formula, Electrical Conductivity (%IACS)

$$\sigma_{\%IACS} = \frac{172.41}{\rho}$$

ρ = Electrical Resistivity (μΩ-cm), SUS 304 = 72 μΩ-cm

$\therefore \sigma_{\%IACS}$ = 2.39

Thickness of Specimen (t) = 10 mm

3δ (Standard Depth) = t = 10 mm
1δ = 10/3 mm

$\therefore \delta$ = 3.3 mm

From Formula, Standard Depth of Penetration (%IACS)

$$\delta = \frac{661}{\sqrt{f\mu_r\sigma}}$$

$$\delta^2 = \frac{661^2}{f\mu_r\sigma}$$

$$f = \frac{436921}{\delta^2\mu_r\sigma}$$

μ_r Magnetic Permeability = 1.008

$$f = \frac{436921}{3.3^2 x 1.008 x 2.39}$$

$$= 16.65 \text{ kHz}$$

ใช้ 3δ เทียบกับความหนาที่ต้องการจะวัด และคำนวณตามที่กล่าวมาจะได้ค่าความถี่ตามตารางข้างล่างนี้

t	**Test Freq. (kHz)**
1 mm	1665.39
2 mm	408.0627989
4 mm	102.0156997
6 mm	45.34031098
8 mm	25.50392493
10 mm	16.32251195

ภาคผนวก ข

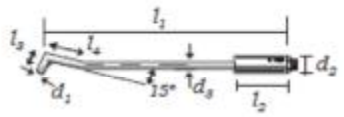
คุณลักษณะของหัวตรวจสอบ

Shielded Surface Probes 2

Application
Absolute probes for general purpose inspection.

Features
Double shielded probes with a stainless steel shaft.
Available with a 45° crank or a 15° crank with a 90° tip. Micro connector.

❸ 15° Crank, 90° Tip with Metal Handle



d_2	l_1	l_2	l_3	l_4	200kHz *Fe & NFe*	500kHz *Fe & NFe*	2MHz *NFe*	6MHz *NFe*
6.35	51	30	min	15	304P12	305P12	306P12	307P12
6.35	51	30	6.5	15	304P22	305P22	306P22	307P22
6.35	51	30	13	15	304P32	305P32	306P32	307P32
6.35	51	30	19	15	304P42	305P42	306P42	307P42
6.35	51	30	25	15	304P52	305P52	306P52	307P52
6.35	76	30	min	25	304P13	305P13	306P13	307P13
6.35	76	30	6.5	25	304P23	305P23	306P23	307P23
6.35	76	30	13	25	304P33	305P33	306P33	307P33
6.35	76	30	19	25	304P43	305P43	306P43	307P43
6.35	76	30	25	25	304P53	305P53	306P53	307P53
L (µH)					120	47	8.2	1.3
d_1					4.45	4.45	3.30	2.34
d_3					3.3	3.3	3.3	3.3
l_3 min					5	5	2.7	1.7
d_1* min					3.3	3.3	2.34	–
Price					**CE**	**CE**	**CE**	**DA**

*add F to the end of the probe number (eg 204P12F). Price DA.

❹ 15° Crank, 90° tip with Delrin Handle

d_2	l_1	l_2	l_3	l_4	200kHz *Fe & NFe*	500kHz *Fe & NFe*	2MHz *NFe*	6MHz *NFe*
9.5	114	86	min	15	312P14	313P14	314P14	315P14
9.5	114	86	6.5	15	312P24	313P24	314P24	315P24
9.5	114	86	13	15	312P34	313P34	314P34	315P34
9.5	114	86	19	15	312P44	313P44	314P44	315P44
9.5	114	86	25	15	312P54	313P54	314P54	315P54
9.5	152	86	min	25	312P16	313P16	314P16	315P16
9.5	152	86	6.5	25	312P26	313P26	314P26	315P26
9.5	152	86	13	25	312P36	313P36	314P36	315P36
9.5	152	86	19	25	312P46	313P46	314P46	315P46
9.5	152	86	25	25	312P56	313P56	314P56	315P56
9.5	203	86	min	25	312P18	313P18	314P18	315P18
9.5	203	86	6.5	25	312P28	313P28	314P28	315P28
9.5	203	86	13	25	312P38	313P38	314P38	315P38
9.5	203	86	19	25	312P48	313P48	314P48	315P48
9.5	203	86	25	25	312P58	313P58	314P58	315P58
L (µH)					120	47	8.2	1.3
d_1					4.45	4.45	3.30	2.34
d_3					3.3	3.3	3.3	3.3
l_3 min					5	5	2.7	1.7
d_1* min					3.3	3.3	2.34	–
Price					**CE**	**CE**	**CE**	**DA**

*add F to the end of the probe number (eg 204P12F). Price DA.

HOCKiNG

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ค. 1 ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งแปลงจากพิกัดX, Y ของการวัดชิ้นงานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

ความถี่(kHz)	กระแส (kA)	ตำแหน่ง	พิกัด					
			X#1	Y#1	X#2	Y#2	X#3	Y#3
500	12	C	378	-105	376	-107	381	-109
		E	341	-155	359	-135	368	-154
		H	340	-216	357	-215	355	-200
	14	C	351	-77	367	-97	348	-107
		E	359	-130	360	-154	359	-160
		H	366	-198	365	-198	367	-203
	16	C	358	-67	351	-94	360	-93
		E	375	-116	369	-133	369	-127
		H	367	-187	357	-199	365	-207
1 MHz	12	C	227	-151	231	-157	230	-157
		E	220	-182	217	-178	217	-179
		H	225	-209	215	-217	215	-217
	14	C	228	-143	231	-158	237	-157
		E	221	-153	227	-167	225	-165
		H	219	-217	217	-220	225	-210
	16	C	229	-159	230	-158	229	-155
		E	236	-173	231	-178	236	-174
		H	228	-203	229	-208	231	-205
2 MHz	12	C	347	-131	341	-130	347	-130
		E	330	-160	327	-159	341	-161
		H	342	-178	346	-178	346	-178
	14	C	340	-125	347	-126	348	-127
		E	351	-133	341	-130	341	-122
		H	340	-160	341	-147	347	-153

ความถี่(kHz)	กระแส (kA)	ตำแหน่ง	พิกัด					
			X#1	Y#1	X#2	Y#2	X#3	Y#3
	16	C	321	-122	327	-116	338	-122
		E	340	-145	341	-140	346	-139
		H	348	-179	350	-169	349	-165
3 MHz	12	C	220	-165	223	-160	220	-158
		E	217	-169	217	-160	216	-162
		H	211	-185	210	-175	209	-178
	14	C	210	-152	218	-148	215	-147
		E	215	-159	215	-150	215	-151
		H	211	-173	211	-150	214	-163
	16	C	197	-148	211	-150	215	-152
		E	212	-166	220	-170	220	-173
		H	212	-182	225	-189	221	-185

ตารางที่ ค. 1 ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งแปลงจากพิกัดX, Y ของการวัดชิ้นงานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (ต่อ)

ความถี่ (kHz)	กระแส (kA)	ตำแหน่ง	Impedance			
			วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
500	12	C	392.31	390.93	396.29	393.2
		E	374.57	383.54	398.92	385.7
		H	402.81	416.74	407.46	409.0
	14	C	359.35	379.60	364.08	367.7
		E	381.81	391.56	393.04	388.8
		H	416.12	415.25	419.40	416.9
	16	C	364.22	363.37	371.82	366.5
		E	392.53	392.24	390.24	391.7
		H	411.90	408.72	419.61	413.4
1 MHz	12	C	272.64	279.30	278.48	276.8
		E	285.52	280.67	281.30	282.5
		H	307.09	305.47	305.47	306.0
	14	C	269.13	279.87	284.29	277.8
		E	268.79	281.81	279.02	276.5
		H	308.30	309.01	307.77	308.4
	16	C	278.79	279.04	276.52	278.1
		E	292.62	291.62	293.21	292.5
		H	305.28	309.36	308.85	307.8
2 MHz	12	C	370.90	364.94	370.55	368.8
		E	366.74	363.61	377.10	369.1
		H	385.55	389.10	389.10	387.9
	14	C	362.25	369.17	370.45	367.3
		E	375.35	364.94	362.17	367.5
		H	375.77	371.34	379.23	375.4
	16	C	343.40	346.97	359.34	349.9

ความถี่ (kHz)	กระแส (kA)	ตำแหน่ง	Impedance			
			วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
		E	369.63	368.62	372.88	370.4
		H	391.34	388.67	386.04	388.7
3 MHz	12	C	275.00	274.46	270.86	273.4
		E	275.05	269.61	270.00	271.6
		H	280.62	273.36	274.53	276.2
	14	C	259.24	263.49	260.45	261.1
		E	267.41	262.15	262.73	264.1
		H	272.86	258.88	269.01	266.9
	16	C	246.40	258.88	263.30	256.2
		E	269.26	278.03	279.87	275.7
		H	279.41	293.85	288.21	287.2

ตารางที่ ค. 2 ค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นทดสอบแรงดึงภายใต้ความเค้นแรงดึง

ครั้งที่	แรงดึง (kgf)	ค่าความเค้น (MPa)	ค่าอิมพีแดนซ์			
			วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
ความถี่หัวตรวจสอบ 102.5 kHz						
1	0	0	335.38	341.12	338.10	338.20
2	2500	122.58	311.01	316.40	315.04	314.15
3	5000	245.17	314.23	306.24	306.80	309.09
ความถี่หัวตรวจสอบ 500 kHz						
1	0	0	406.61	407.44	409.09	407.71
2	2500	122.58	406.61	408.83	398.06	404.50
3	5000	245.17	396.92	405.77	396.38	399.69
ความถี่หัวตรวจสอบ 1 MHz						
1	0	0	316.81	314.73	318.94	316.83
2	2500	122.58	299.82	303.45	300.54	301.27
3	5000	245.17	278.60	281.43	279.31	279.78
ความถี่หัวตรวจสอบ 2 MHz						
1	0	0	344.48	352.14	352.85	349.82
2	2500	122.58	341.06	339.03	344.89	341.66
3	5000	245.17	359.25	347.25	336.34	347.61
ความถี่หัวตรวจสอบ 3 MHz						
1	0	0	303.71	308.62	295.84	302.73
2	2500	122.58	294.28	296.29	285.73	292.10
3	5000	245.17	292.83	318.23	292.10	301.05

ตารางที่ ค. 3 ค่าความเค้นจากการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นทดสอบแรงดึง

ครั้งที่	แรงดึง (kgf)	ค่าความเค้น (MPa)	ค่าความเค้น (MPa)			
			วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
ความถี่หัวตรวจสอบ 102.5 kHz						
1	0	0	12.67	-29.72	-7.40	-8.15
2	2500	122.58	192.42	152.63	162.67	169.24
3	5000	245.17	168.63	227.61	223.41	206.55
ความถี่หัวตรวจสอบ 500 kHz						
1	0	0	42.90	17.66	-32.11	9.48
2	2500	122.58	42.90	-24.10	300.79	106.53
3	5000	245.17	335.13	68.11	351.52	251.59
ความถี่หัวตรวจสอบ 1 MHz						
1	0	0	7.6315	21.3141	-6.3525	7.53
2	2500	122.58	119.1433	95.3136	114.3892	109.62
3	5000	245.17	258.3492	239.7680	253.7039	250.61
ความถี่หัวตรวจสอบ 2 MHz						
1	0	0	136.88865	78.70667	73.35083	96.32
2	2500	122.58	162.87584	178.3251	133.80293	158.33
3	5000	245.17	24.669553	115.88939	198.75318	113.10
ความถี่หัวตรวจสอบ 3 MHz						
1	0	0	1672.1835	1648.1332	1645.9193	1655.41
2	2500	122.58	1682.9256	1689.3118	1670.908	1681.05
3	5000	245.17	1625.7963	1663.5032	1697.756	1662.35

ตารางที่ ค. 4 ค่าความผันแปรของอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นทดสอบแรงดึงภายใต้ความเค้นแรงดึง

ความถี่หัวตรวจสอบ	แรงดึง (kgf)	SD (MPa)	ความผันแปร SD^2	ความไม่แน่นอนชนิด A (MPa)
102.5 kHz	0	21.21	449.69	12.24
	2500	20.69	428.07	11.95
	5000	32.90	1082.70	19.00
500 kHz	0	38.16	1456.44	22.03
	2500	171.54	29425.63	99.04
	5000	159.11	25315.41	91.86
1 MHz	0	13.83	191.37	7.99
	2500	12.61	159.06	7.28
	5000	9.67	93.51	5.58

ตารางที่ ค. 5 ค่าความไม่แน่นอนของอิมพีแดนซ์ของการวัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระแสไหลวนที่ความถี่ 1 MHz

ตัวอย่าง	ชื่อ	กระแสเชื่อม	ตำแหน่ง	ผู้วัด	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3
1	Spot Weld	12	BM	1	305.47	294.91	300.59
2	Spot Weld	14	BM	1	317.53	318.23	314.68
3	Spot Weld	16	BM	1	316.81	319.62	319.62
4	Spot Weld	12	BM	2	316.81	314.70	316.10
5	Spot Weld	14	BM	2	313.98	318.21	316.81
6	Spot Weld	16	BM	2	316.10	316.81	309.01
7	TS Specimen	N/A	BM	1	316.81	314.73	318.94
8	TS Specimen	N/A	BM	1	316.81	315.40	316.80

Max	=	319.6154
Min	=	294.9051
Range	=	24.71032
AVG	=	314.1176
SD	=	6.431024
Variance (σ)	=	41.35807

$$U_{AE}\frac{SD}{\sqrt{n}} = 0.306$$

$$E = 3\sigma = 124.074$$

หมายเหตุ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด A มีค่าน้อยมากคือ -306/1000 MPa

ตารางที่ ค. 6 ค่าอิมพีแดนซ์เฉลี่ยของ 100 kHz ที่วัดได้จากชิ้นงานเชื่อมต่อชน

Part	ผู้ทำการวัดคนที่ 1AV. 1			ผู้ทำการวัดคนที่2 AV. 2			AVG	
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	Imp.# AV. 1	Imp.# AV. 2
2	329.71	329.61	329.71	326.83	335.00	321.51	329	327
3	311.61	327.15	316.71	319.58	326.46	318.14	318	321
4	316.32	320.26	320.26	314.62	311.85	287.60	318	304
5	318.14	315.36	313.98	315.13	329.71	338.34	315	327
6	324.46	323.41	331.16	315.27	310.41	320.00	326	315
7	289.35	303.00	296.66	295.45	304.79	299.07	296	299
8	372.77	388.74	380.76	343.84	368.78	354.81	380	355
9	440.65	450.64	421.68	433.66	428.67	450.64	437	437
10	450.64	450.64	450.64	450.64	450.64	450.64	450	450
11	450.64	450.64	421.68	450.64	450.64	450.64	440	450
12	450.64	450.64	421.68	450.64	450.64	450.64	440	450
13	450.64	427.67	450.64	450.64	450.64	450.64	442	450
14	408.71	392.73	384.75	346.83	354.81	349.82	395	350
15	336.86	313.92	333.86	295.49	298.54	298.33	328	297
16	324.04	332.00	320.78	286.84	299.79	297.25	325	294
17	334.61	300.96	322.01	316.03	316.89	314.01	319	315
18	294.63	341.59	305.56	316.83	309.26	301.01	313	309

ตารางที่ ค.7 ค่าอิมพีแดนซ์เฉลี่ยของ 500 kHz ที่วัดได้จากชิ้นงานเชื่อมต่อชน

Part	ผู้ทำการวัดคนที่ 1AV. 1			ผู้ทำการวัดคนที่2 AV. 2			AVG	
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	Imp.# AV. 1	Imp.# AV. 2
2	430.57	421.95	431.24	421.07	410.30	420.76	427.00	417.00
3	431.84	424.19	425.06	426.59	416.47	423.87	427.00	422.00
4	422.22	431.37	430.89	421.25	413.89	418.87	428.00	418.00
5	429.61	434.41	425.14	415.42	419.24	418.63	429.00	417.00
6	429.70	424.35	427.38	419.99	413.35	416.64	427.00	416.00
7	402.55	403.98	402.09	400.26	404.28	406.13	402.00	403.00
8	382.56	377.57	369.22	372.07	374.23	356.17	376.00	367.00
9	377.76	378.53	377.76	365.44	369.39	364.17	378.00	366.00
10	365.79	358.80	361.80	354.81	353.81	350.82	362.00	353.00
11	364.79	360.80	364.79	349.82	348.83	350.82	363.00	349.00
12	367.78	364.79	364.79	355.81	351.82	353.81	365.00	353.00
13	366.79	371.78	377.64	361.80	363.79	368.49	372.00	364.00
14	370.00	381.90	380.99	369.27	370.41	366.15	377.00	368.00
15	403.35	411.13	409.83	397.92	408.79	403.42	408.00	403.00
16	429.00	432.08	430.35	423.24	422.43	414.06	430.00	419.00
17	435.24	432.12	433.00	415.65	424.08	418.63	433.00	419.00
18	432.91	433.36	432.02	410.99	409.30	406.97	432.00	409.00

ตารางที่ ค. 8 ค่าอิมพีแดนซ์เฉลี่ยของ 1 MHz ที่วัดได้จากชิ้นงานเชื่อมต่อชน

Part	ผู้ทำการวัดคนที่ 1 AV. 1			ผู้ทำการวัดคนที่ 2 AV. 2			AVG	
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	Imp.# AV. 1	Imp.# AV. 2
2	314.21	314.95	314.95	307.21	308.62	307.95	314.00	307.00
3	312.12	314.95	312.80	307.95	307.35	308.62	313.00	307.00
4	312.86	312.86	317.67	309.36	310.77	306.61	314.00	308.00
5	312.75	315.57	315.63	310.65	308.56	304.38	314.00	307.00
6	307.83	307.77	307.15	302.76	302.17	309.24	307.00	304.00
7	304.70	302.19	304.80	289.18	297.64	292.21	303.00	293.00
8	275.28	273.89	275.43	270.44	269.06	267.55	274.00	269.00
9	253.30	256.98	261.64	248.05	232.16	256.26	257.00	245.00
10	244.75	243.02	241.05	238.38	238.90	238.29	242.00	238.00
11	239.72	240.19	238.73	235.77	235.76	238.05	239.00	236.00
12	236.93	240.47	234.79	237.31	238.55	242.84	237.00	239.00
13	245.39	248.89	250.24	242.33	237.72	243.33	248.00	241.00
14	262.46	267.05	266.43	259.14	257.78	260.60	265.00	259.00
15	300.25	292.84	291.29	289.75	294.11	287.85	294.00	290.00
16	313.54	312.93	302.91	295.74	302.23	307.95	309.00	301.00
17	312.80	317.10	315.63	309.87	310.77	305.68	315.00	308.00
18	306.11	304.04	310.34	299.63	301.88	299.55	306.00	300.00

ตารางที่ ค. 9 ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 100 kHz

ชิ้นตัวอย่าง		**ผู้วัดคนที่ 1 Mpa**			**ผู้วัดคนที่ 2 MPa**			**ค่าประมาณของค่าจริง**
ลำดับ	ตำแหน่ง	**R1**	**R2**	**R3**	**R1**	**R2**	**R3**	
1	2	54.49	55.18	54.49	75.72	15.41	114.93	61.70
2	3	187.96	73.32	150.34	129.16	78.42	139.83	126.51
3	4	153.24	124.18	124.18	165.78	186.16	365.06	186.43
4	5	139.83	160.33	170.47	162.02	54.49	-9.17	112.99
5	6	93.15	100.94	43.77	160.95	196.82	126.07	120.28
6	7	352.13	251.47	298.20	307.13	238.26	280.47	287.94
7	8	-263.18	-380.96	-322.06	-49.75	-233.73	-130.70	-230.06
8	9	-763.86	-837.52	-623.94	-712.31	-675.49	-837.52	-741.77
9	10	-837.52	-837.52	-837.52	-837.52	-837.52	-837.52	-837.52
10	11	-837.52	-837.52	-623.94	-837.52	-837.52	-837.52	-801.92
11	12	-837.52	-837.52	-623.94	-837.52	-837.52	-837.52	-801.92
12	13	-837.52	-668.12	-837.52	-837.52	-837.52	-837.52	-809.28
13	14	-528.21	-410.41	-351.51	-71.83	-130.70	-93.90	-264.43
14	15	1.75	170.94	23.82	306.87	284.35	285.93	178.94
15	16	96.28	37.56	120.35	370.67	275.17	293.85	198.98
16	17	18.30	266.53	111.26	155.39	149.01	170.23	145.12
17	18	313.24	-33.18	232.62	149.46	205.30	266.11	188.93

ตารางที่ ค. 10 ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 500 kHz

ชิ้นตัวอย่าง		**ผู้วัดคนที่ 1 Mpa**			**ผู้วัดคนที่ 2 MPa**			**ค่าประมาณของค่าจริง**
ลำดับ	ตำแหน่ง	**R1**	**R2**	**R3**	**R1**	**R2**	**R3**	
1	2	-680.09	-419.97	-700.11	-393.46	-68.52	-384.10	-441.04
2	3	-718.46	-487.39	-513.93	-559.90	-254.71	-477.89	-502.05
3	4	-428.23	-704.03	-689.65	-398.76	-176.82	-326.98	-454.08
4	5	-651.05	-795.91	-516.23	-222.95	-338.21	-319.77	-474.02
5	6	-653.69	-492.51	-583.64	-360.85	-160.63	-259.64	-418.49
6	7	165.33	122.09	179.24	234.28	113.02	57.19	145.19
7	8	768.24	918.77	1170.72	1084.77	1019.53	1564.46	1087.75
8	9	913.02	889.92	913.02	1284.66	1165.57	1323.20	1081.57
9	10	1274.27	1484.97	1394.67	1605.37	1635.47	1725.76	1520.08
10	11	1304.37	1424.77	1304.37	1755.85	1785.95	1725.76	1550.18
11	12	1214.06	1304.37	1304.37	1575.27	1695.66	1635.47	1454.87
12	13	1244.17	1093.65	916.69	1394.67	1334.47	1192.76	1196.07
13	14	1147.29	788.13	815.65	1169.37	1134.78	1263.22	1053.07
14	15	141.11	-93.56	-54.39	305.04	-22.92	139.13	69.07
15	16	-632.68	-725.41	-673.47	-458.77	-434.37	-181.92	-517.77
16	17	-820.89	-726.77	-753.45	-229.92	-484.16	-319.77	-555.83
17	18	-750.63	-764.31	-723.84	-89.38	-38.30	31.92	-389.09

ตารางที่ ค. 11 ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 1 MHz

ชิ้นตัวอย่าง		**ผู้วัดคนที่ 1 Mpa**			**ผู้วัดคนที่ 2 MPa**			**ผลรวม**
ลำดับ	ตำแหน่ง	**R1**	**R2**	**R3**	**R1**	**R2**	**R3**	
1	2	24.68	19.86	19.86	70.63	61.36	65.78	262.17
2	3	38.40	19.86	33.95	65.78	69.69	61.36	289.05
3	4	33.56	33.56	2.02	56.51	47.24	74.58	247.46
4	5	34.31	15.77	15.41	48.05	61.77	89.17	264.48
5	6	66.59	66.93	71.04	99.83	103.68	57.32	465.38
6	7	87.10	103.60	86.48	188.94	170.43	169.08	805.64
7	8	280.11	289.24	279.17	311.89	320.96	330.84	1812.20
8	9	424.35	400.17	369.60	458.79	563.08	404.93	2620.92
9	10	480.43	491.82	504.72	522.24	518.82	522.85	3040.88
10	11	513.46	510.38	519.94	539.36	539.40	524.39	3146.93
11	12	531.72	508.53	545.81	529.29	521.13	493.00	3129.48
12	13	476.22	453.30	444.41	496.31	526.60	489.77	2886.61
13	14	364.26	334.12	338.20	386.02	394.94	376.44	2193.98
14	15	170.01	164.93	175.09	185.20	156.62	197.65	1049.51
15	16	29.13	33.12	61.36	66.93	78.96	65.78	335.28
16	17	33.95	20.23	15.41	53.17	47.24	80.68	250.69
17	18	77.84	91.43	50.06	120.38	105.62	120.91	566.24

ตารางที่ ค. 11 ค่าความเค้นที่ได้จากการแปลงอิมพีแดนซ์ของความถี่ 1 MHz (ต่อ)

ชิ้นตัวอย่าง		ค่าประมาณ	SD	Variance	UA
ลำดับ	ตำแหน่ง	ของค่าจริง			
1	2	43.70	24.59	466.43	10.04
2	3	48.17	20.23	475.29	8.26
3	4	41.24	24.65	649.29	10.06
4	5	44.08	28.57	846.18	11.66
5	6	77.56	19.31	2042.65	7.88
6	7	134.27	46.81	8894.60	19.11
7	8	302.03	22.15	7310.41	9.04
8	9	436.82	68.50	3611.05	27.96
9	10	506.81	17.69	298.80	7.22
10	11	524.49	12.53	231.60	5.11
11	12	521.58	18.64	1015.61	7.61
12	13	481.10	30.06	4330.56	12.27
13	14	365.66	25.06	10306.58	10.23
14	15	174.92	14.71	4146.25	6.00
15	16	55.88	20.08	500.59	8.20
16	17	41.78	24.06	1358.46	9.82
17	18	94.37	27.39	750.40	11.18

ภาคผนวก ง
ค่าการคำนวณความเค้นโดยวิธี FEM ด้วย COMSOL

ง. ข้อมูลจากการคำนวณ FEM

ง. 1 กระแสเชื่อม 12 kA ความลึก 3 มม.

% Coordinates

Distance	**MPa**
0.025	0.24949162
0.025526317	0.14793384
0.026052631	0.13205945
0.026578948	-0.105778195
0.027105264	-0.36124203
0.027631579	-0.93534625
0.028157895	-1.7413814
0.02868421	-1.943485
0.029210526	-2.433268
0.029736843	-2.4392452
0.03026316	-2.4297707
0.030789474	-2.2249024
0.03131579	-2.0468767
0.031842105	-1.7961926
0.03236842	-1.554917
0.032894738	-1.326742
0.033421054	-1.1867038
0.033947367	-0.92790294
0.034473684	-0.7637804
0.035	-0.5842746

ง. 2 กระแสเชื่อม 14 kA ความลึก 3 มม.

% Coordinates

Distance	**MPa**
0.025	-0.5208546
0.025368422	-0.63095933
0.025736842	-0.65035325
0.026105264	-0.64732045
0.026473684	-0.8117716
0.026842106	-0.93778276
0.027210526	-1.1943634
0.027578948	-1.5891087
0.02794737	-1.983854
0.02831579	-2.2564552
0.028684212	-2.6064448
0.029052632	-2.9564328
0.029421054	-3.121048
0.029789474	-3.0491252
0.030157896	-3.026168
0.030526318	-2.8601067
0.030894738	-2.7121043
0.031263158	-2.564102
0.03163158	-2.4135163
0.032	-2.1638336

ง. 3 กระแสเชื่อม 16 kA ความลึก 3 มม.

% Coordinates		
Distance		**MPa**
0.025	-	1.496064
0.025689656		-1.6556563
0.026034484		-1.5734943
0.026724137		-1.8563833
0.027068965		-1.9578732
0.02775862		-2.681562
0.028103448		-3.5299082
0.028448276		-3.2400582
0.028793104		-3.5505164
0.029137932		-3.8609748
0.02948276		-3.9677377
0.029827587		-3.8288343
0.030172413		-3.7888405
0.030862069		-3.403805
0.031551726		-3.0593839
0.032241378		-2.5693455
0.032931034		-2.117118
0.03327586		-2.208689
0.03362069		-1.8118682
0.033965517		-1.530987
0.034655172		-1.2782155
0.035		-0.9895531

ภาคผนวก จ
การวิเคราะห์ระบบการวัด

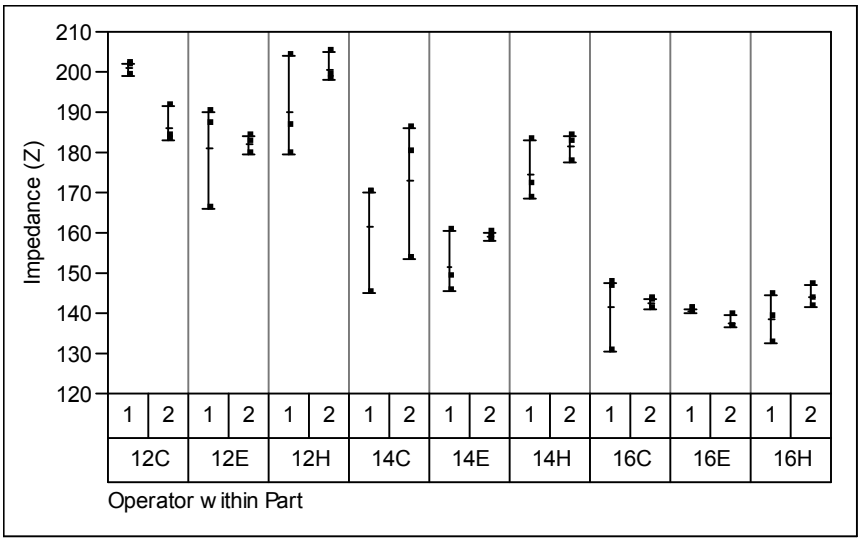
จ. งานเชื่อมความต้านทานแบบจุด

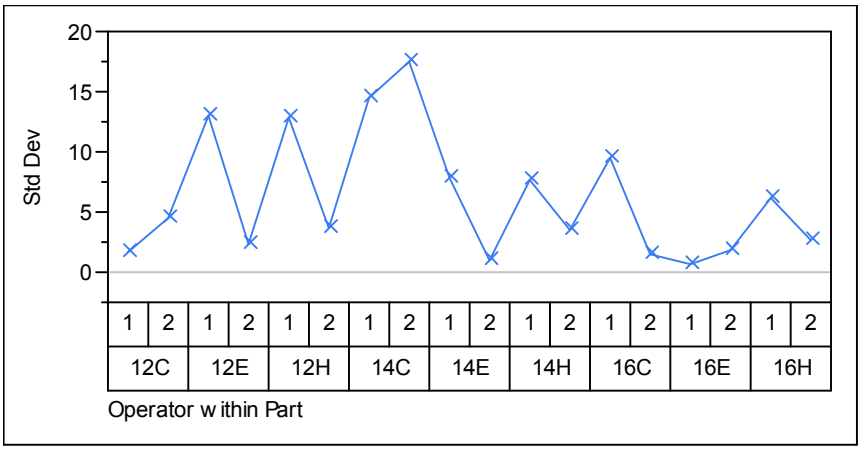
จ. 1งานเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

จ. 1.1 500 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	3.82411234
Operator	1.00244353

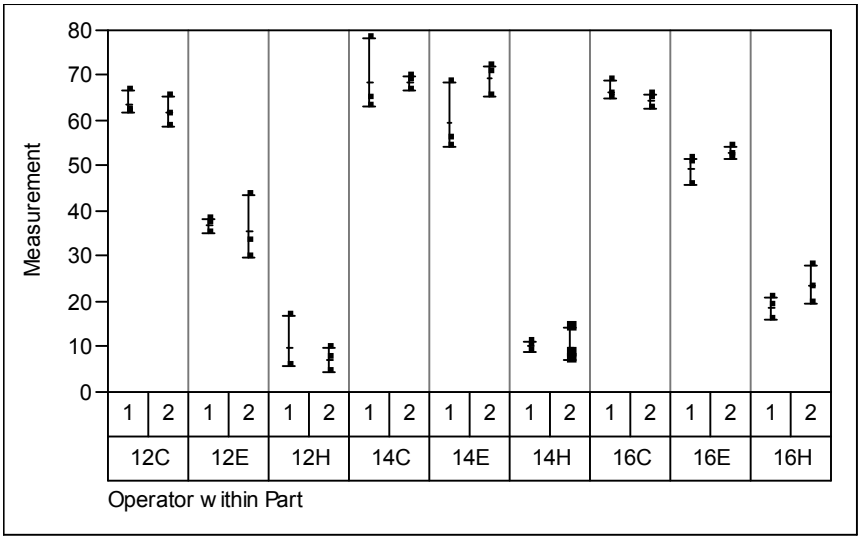
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	43.29345	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	6.03	Appraiser Variation
Operator		6.03	
Gauge R&R	(RR)	43.708	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	114.08	Part Variation
Total Variation	(TV)	122.17460	Total Variation

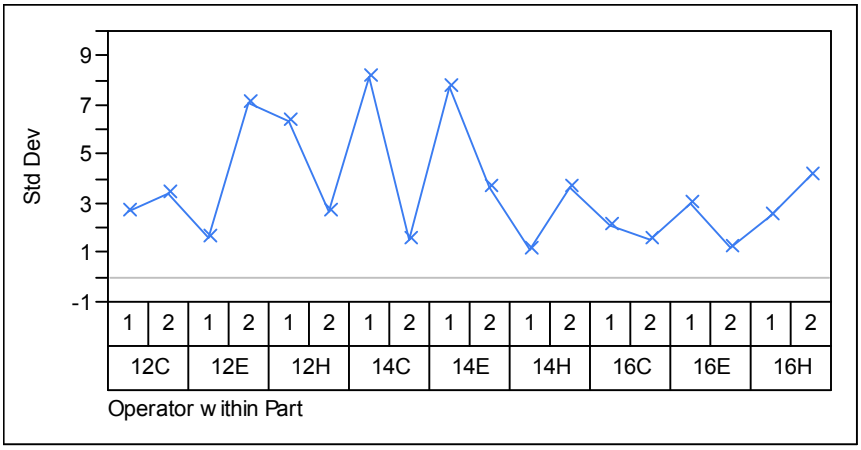
5.15	k
35.7763	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.38313	Precision to Part Variation = RR/PV
3.68017	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 1.2 1 MHz

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	8.04988851
Operator	1

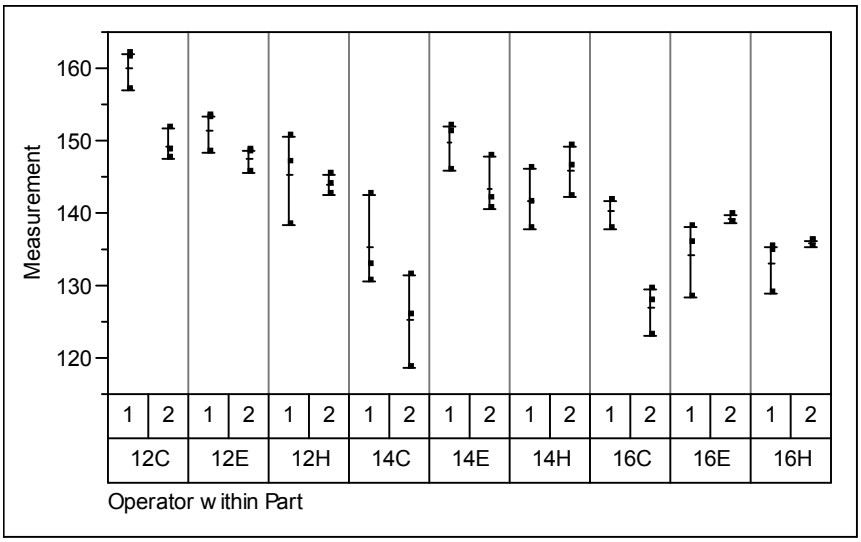
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	22.46371	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	1	Appraiser Variation
Part		1	
Gauge R&R	(RR)	22.482251	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	126.8	Part Variation
Total Variation	(TV)	128.84924	Total Variation

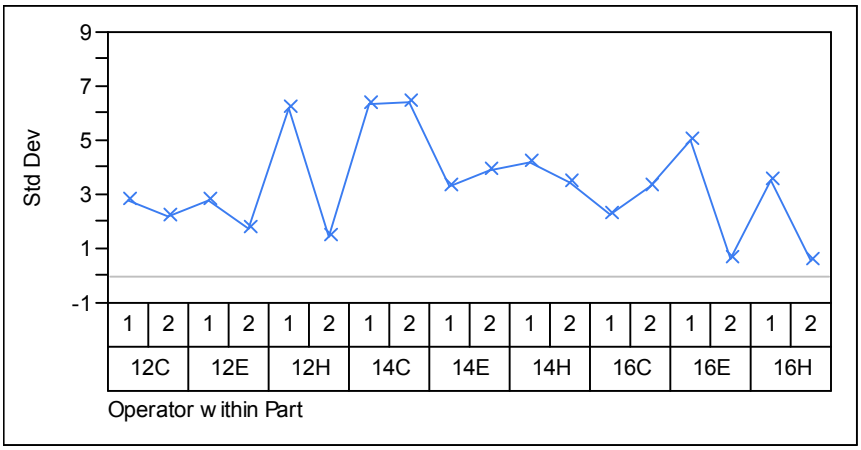
5.15	k
17.449744	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.17730	Precision to Part Variation = RR/PV
7.95241	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 1.2 2 MHz

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	Ratio
Part	2.26462305
Operator	1.06937234

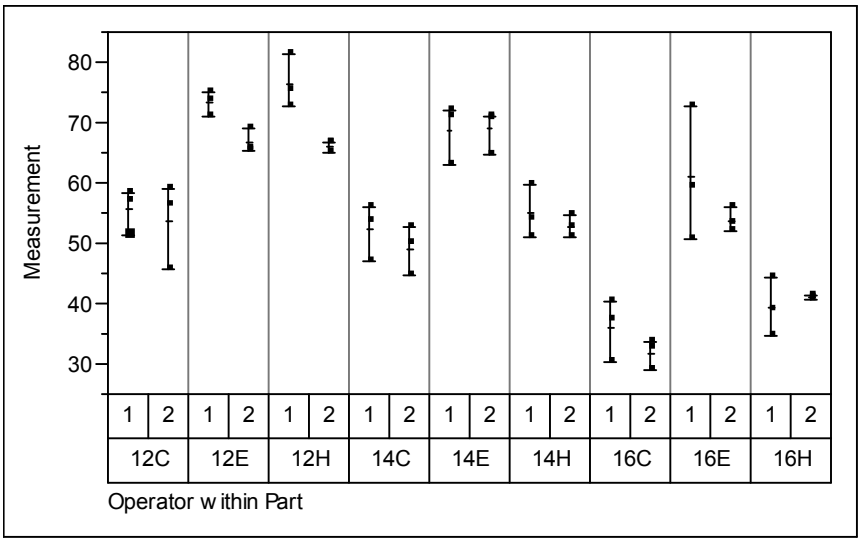
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	25.465502	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	12.94	Appraiser Variation
Part		12.94	
Gauge R&R	(RR)	28.55968	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	41.04	Part Variation
Total Variation	(TV)	50.002409	Total Variation

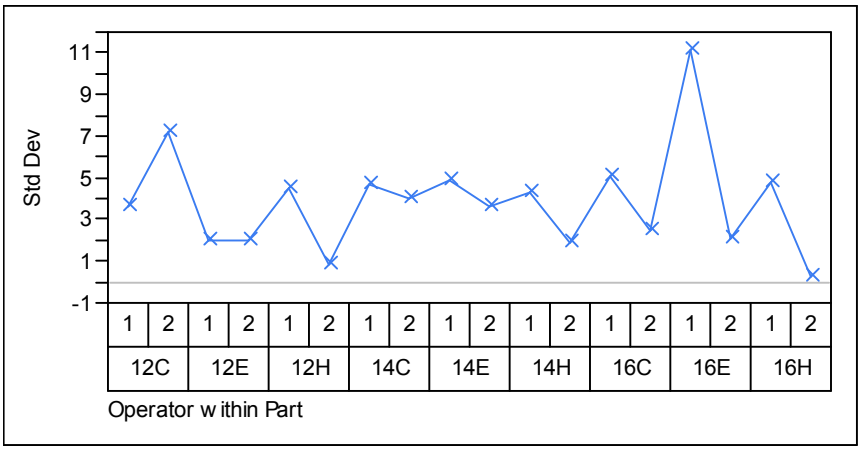
5.15	k
57.119356	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.69590	Precision to Part Variation = RR/PV
2.02616	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 1.2 3 MHz

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	Ratio
Part	3.64389629
Operator	1.0329789

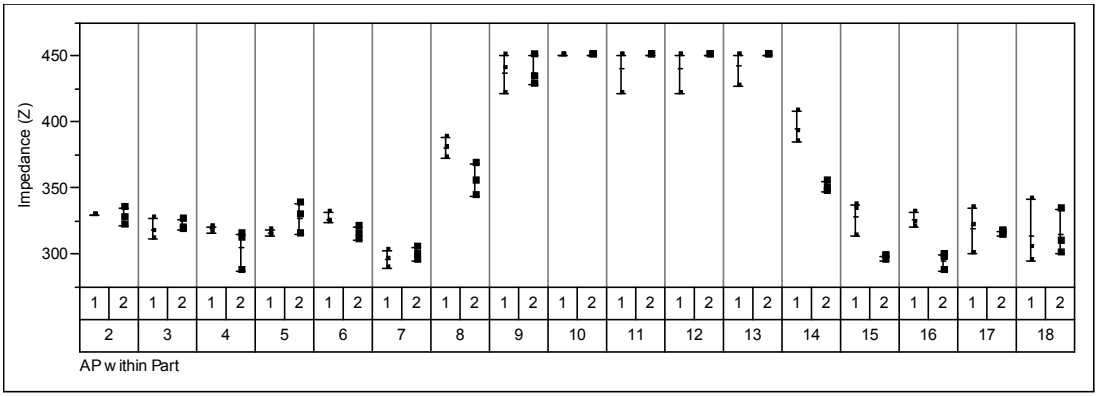
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	23.556490
Reproducibility	(AV)	12.93
Operator		12.93
Gauge R&R	(RR)	28.86610
Part Variation	(PV)	66.58
Total Variation	(TV)	71.799731

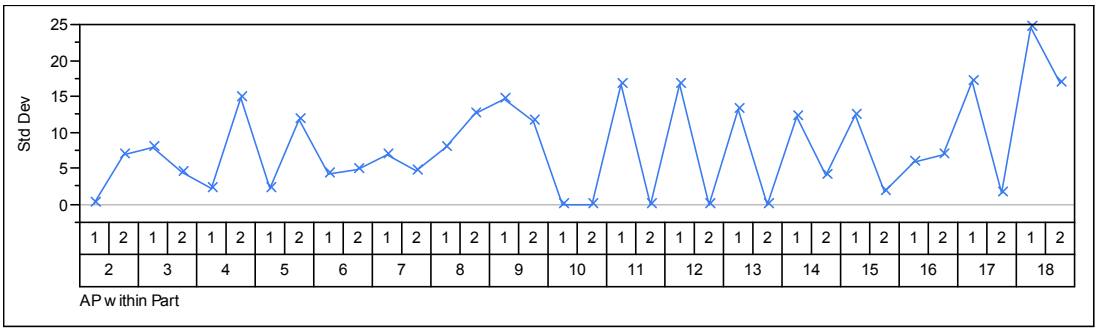
จ. 2งานเชื่อมต่อชน

จ. 2.1 ความถี่ 102.5 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	6.28893643
AP	1.00546473

Gauge R&R

Measurement Source	**Variation (5.15*StdDev)**

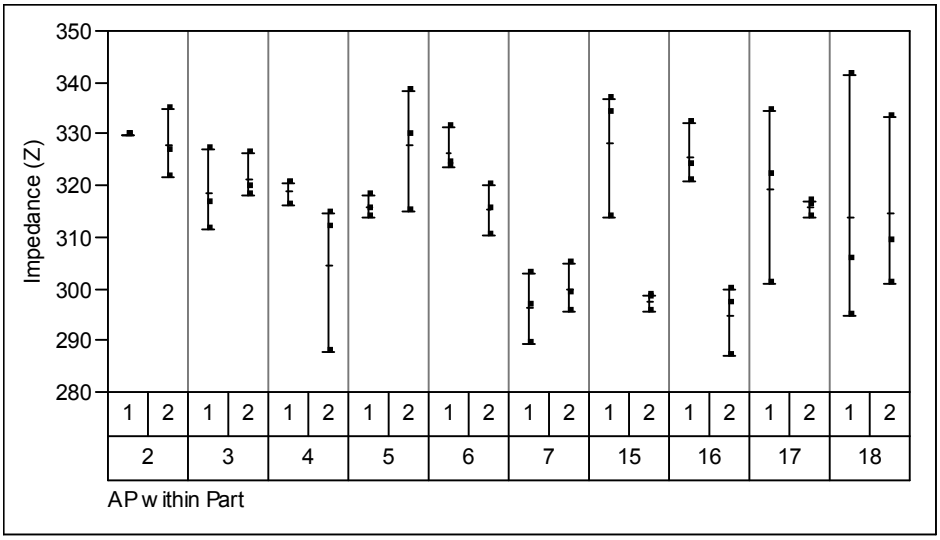
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	65.84101	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	23.20584	Appraiser Variation
Operator		23.20584	
Gauge R&R	(RR)	69.807919	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	306.49539	Part Variation
Total Variation	(TV)	314.34531	Total Variation

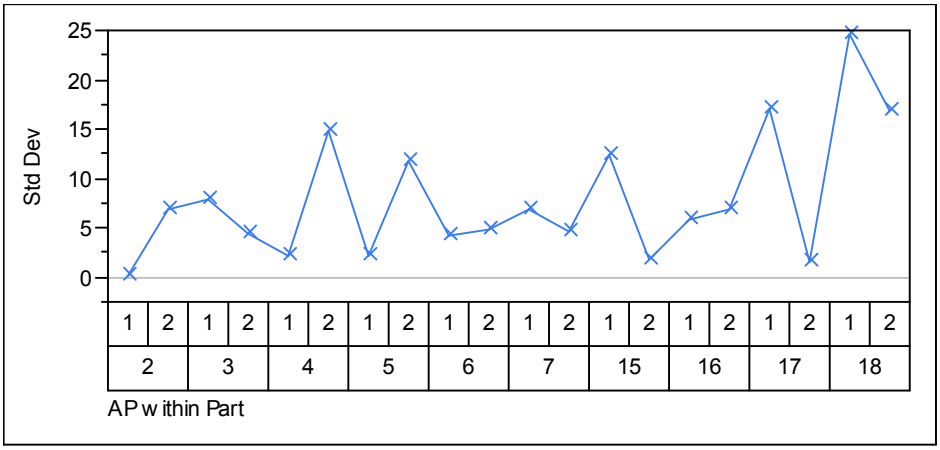
5.15	k
22.207775	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.22777	Precision to Part Variation = RR/PV
6.19057	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

จ. 2.2 ความถี่ 102.5 kHz ตัดตัวอย่างบริเวณเฟอร์ไรท์ออก

Variability Gauge

Variability Chart for Impedance (Z)





Discrimination Ratio

Source	Ratio
Part	1.25035957
AP	1.11459056

Gauge R&R

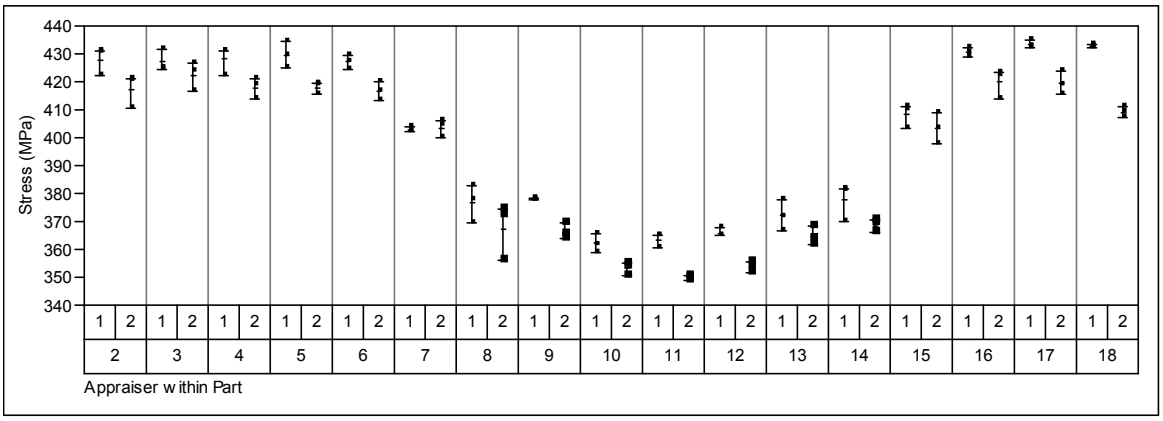
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	60.895562
Reproducibility	(AV)	24.416977
Part		24.416977
Gauge R&R	(RR)	65.613614
Part Variation	(PV)	34.821888
Total Variation	(TV)	74.276659

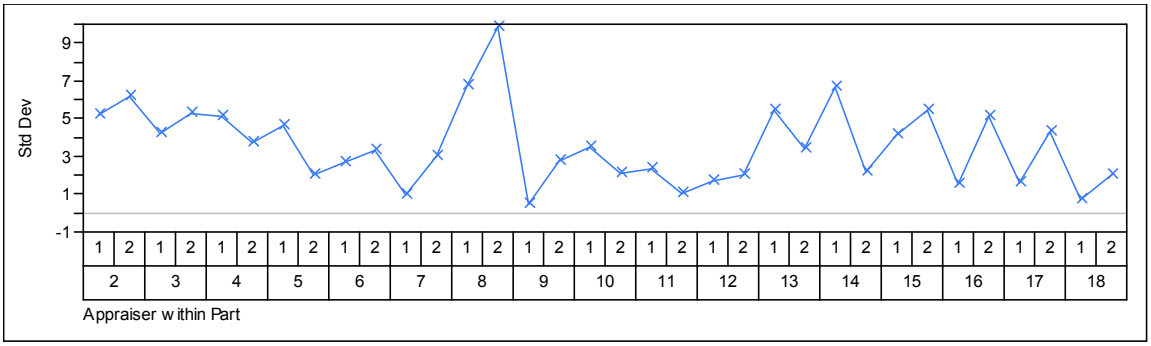
5.15	k
88.33282	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
1.88437	Precision to Part Variation = RR/PV
0.74826	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.3 500 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (Impedance)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	4.85396965
Appraiser	1.05935406

Gauge R&R

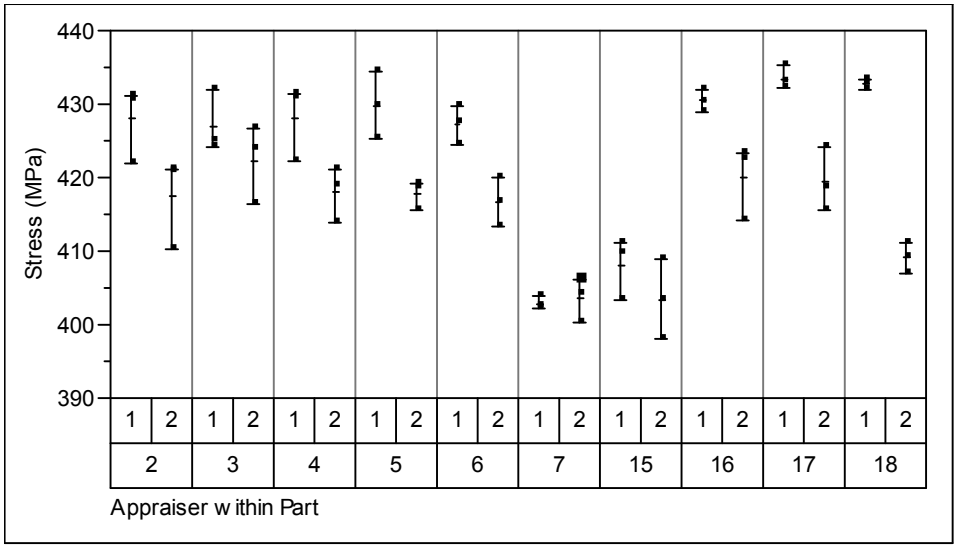
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	23.57567
Reproducibility	(AV)	36.64857
Operator		36.64857
Gauge R&R	(RR)	43.57671
Part Variation	(PV)	146.3588
Total Variation	(TV)	152.70832

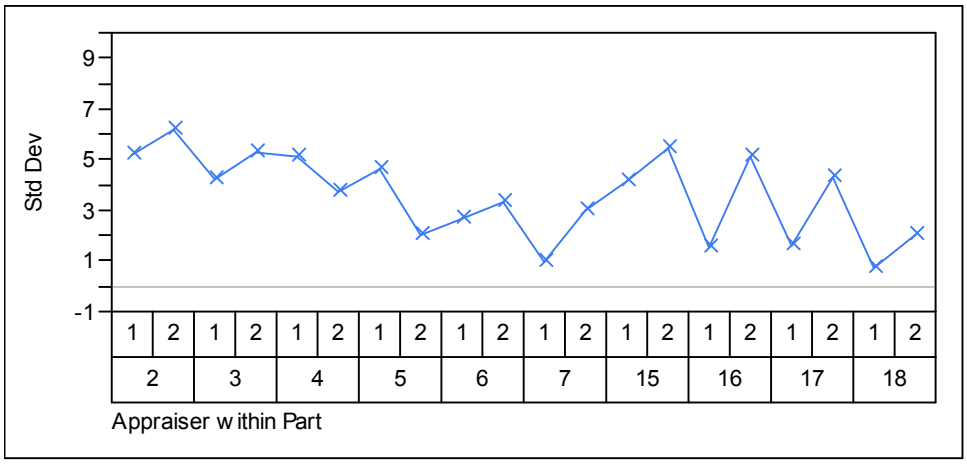
5.15	k
28.53591	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.29774	Precision to Part Variation = RR/PV
4.73569	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

จ. 2.4 500 kHz ตัดตัวอย่างบริเวณเฟอร์ไรท์ออก

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (Impedance)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	1.65498782
Appraiser	1.45768265

Gauge R&R

Measurement Source	**Variation (5.1*StdDev)**

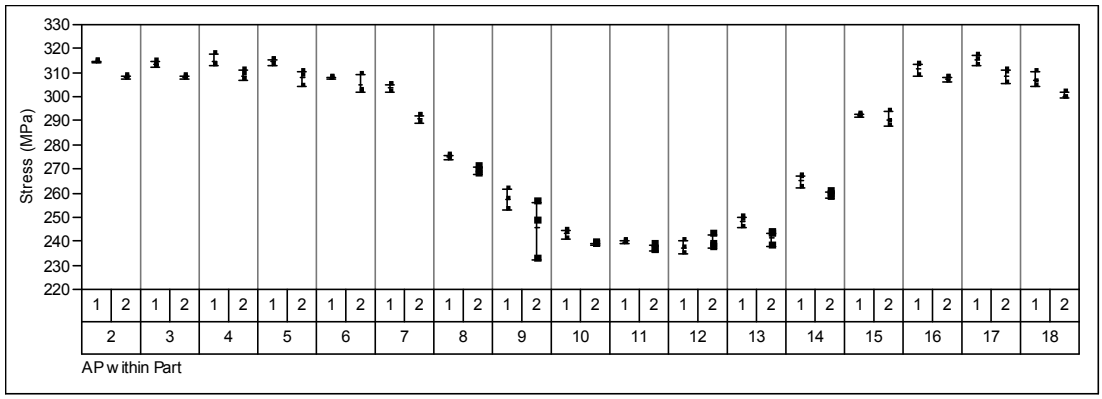
Measurement Source		**Variation (5.1*StdDev)**
Repeatability	(EV)	24.976707
Reproducibility	(AV)	35.828193
Operator		35.828193
Gauge R&R	(RR)	43.674881
Part Variation	(PV)	40.725330
Total Variation	(TV)	59.716395

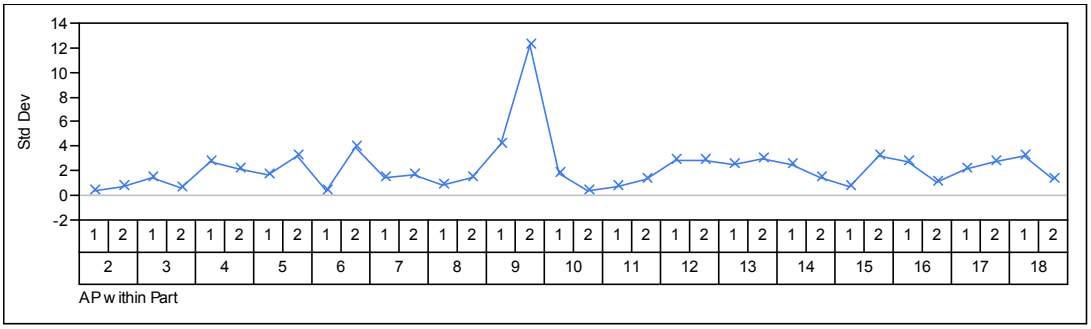
5.1	k
73.13717	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
1.31461	Precision to Part Variation = RR/PV
1	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.5 1 MHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (Impedance)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	8.45285851
AP	1.01639079

Gauge R&R

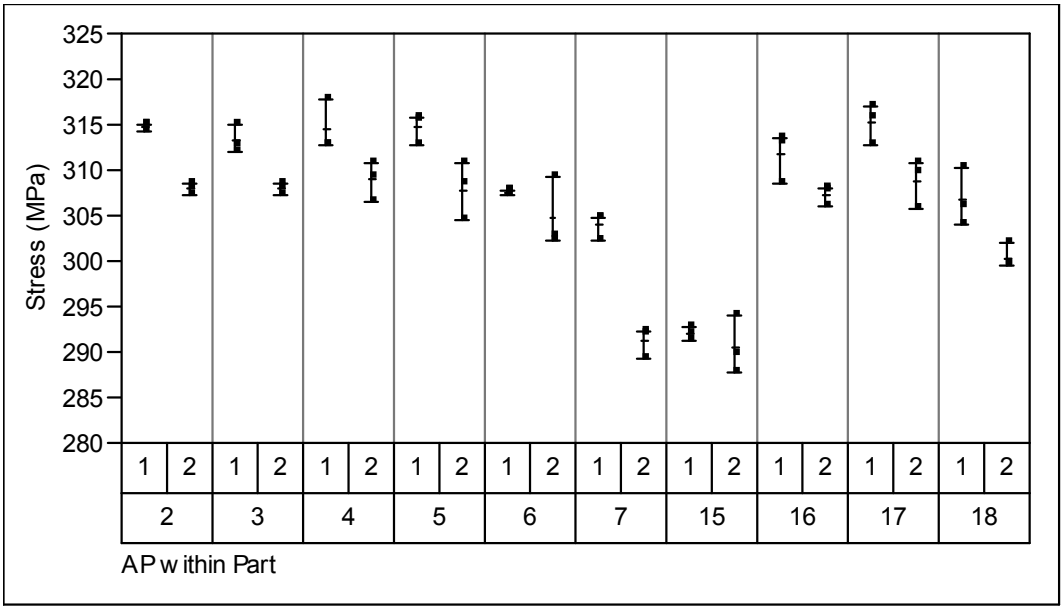
Measurement Source		**Variation (5.1*StdDev)**
Repeatability	(EV)	16.72841
Reproducibility	(AV)	20.02164
Operator		20.02164
Gauge R&R	(RR)	26.09034
Part Variation	(PV)	154.84877
Total Variation	(TV)	157.03135

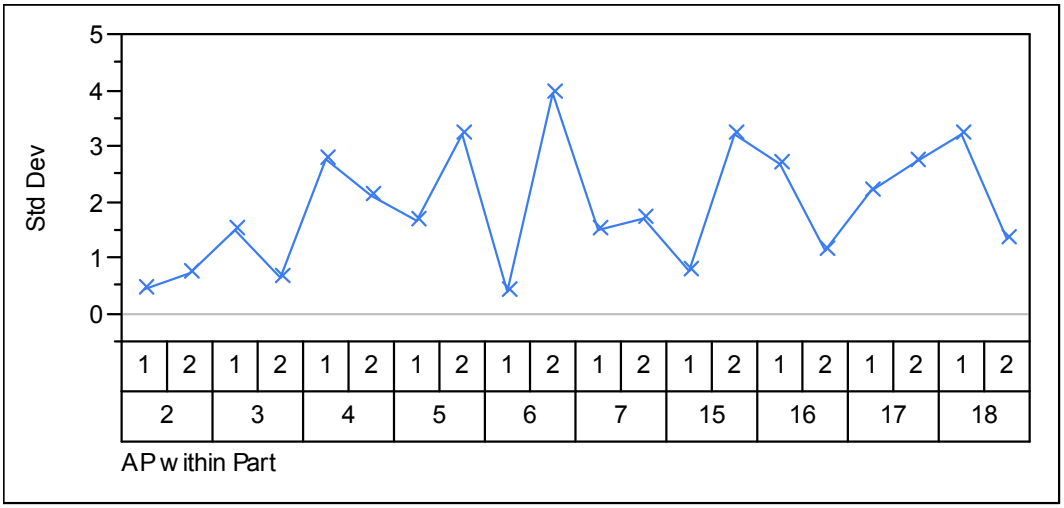
5.1	k
17.08508	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.16849	Precision to Part Variation = RR/PV
8.36849	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

จ. 2.6 1 MHz ตัดตัวอย่างบริเวณเฟอร์ไรท์ออก

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (Impedance)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	2.27445455
AP	1.2740192

Gauge R&R

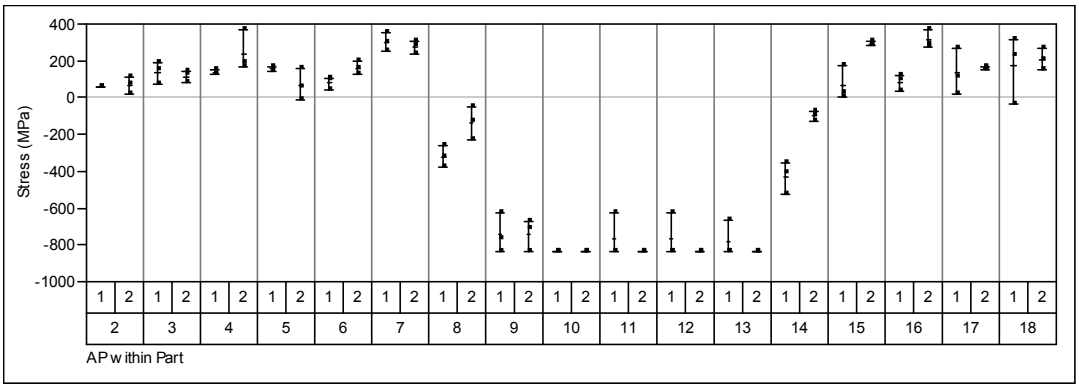
Measurement Source		**Variation (5.1*StdDev)**
Repeatability	(EV)	12.736926
Reproducibility	(AV)	21.115522
Operator		21.115522
Gauge R&R	(RR)	24.659573
Part Variation	(PV)	35.620681
Total Variation	(TV)	43.323521

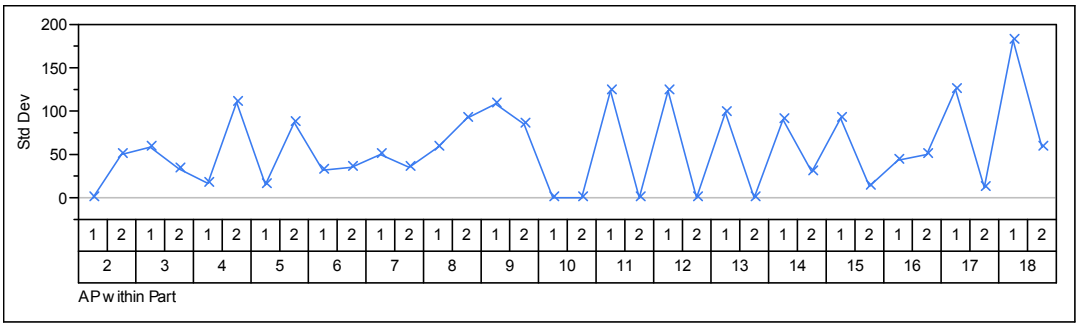
5.1	k
41.29448	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
2.32831	Precision to Part Variation = RR/PV
0	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.7 100 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	6.36901745
AP	1.00609239

Gauge R&R

Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	476.2887
Reproducibility	(AV)	181.029
Operator		181.029
Gauge R&R	(RR)	509.53157
Part Variation	(PV)	2266.2526

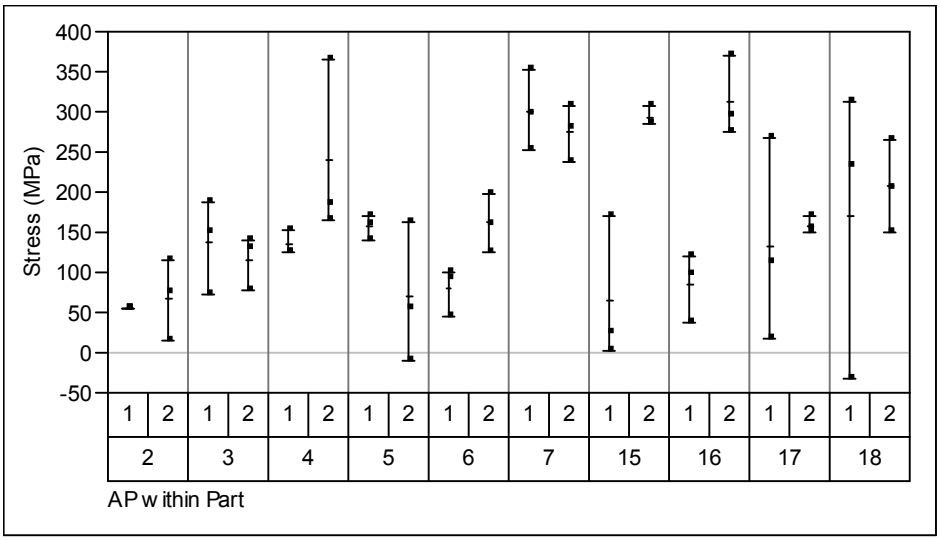
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**		
Total Variation	(TV)	2322.8266	Total Variation	V(Within) + V(Part) + V(AP)

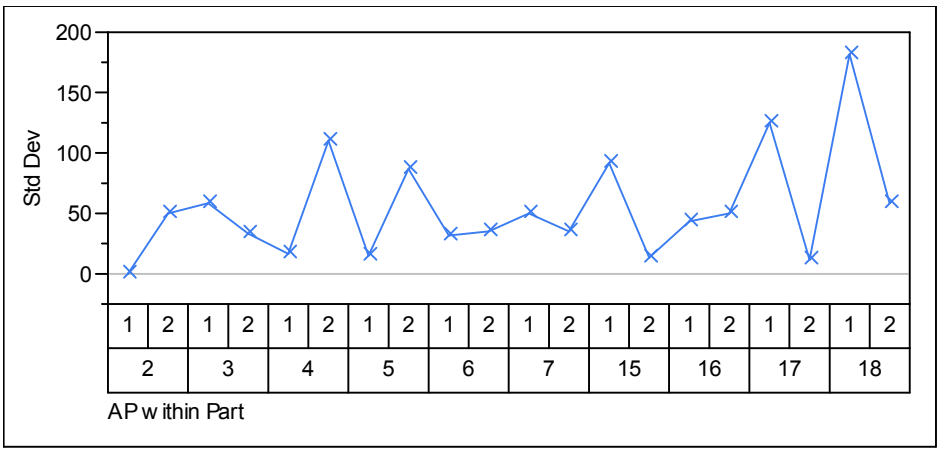
5.15	k
22.820024	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.22483	Precision to Part Variation = RR/PV
6.27128	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.8 100 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	1.27661493
AP	1.14198452

Gauge R&R

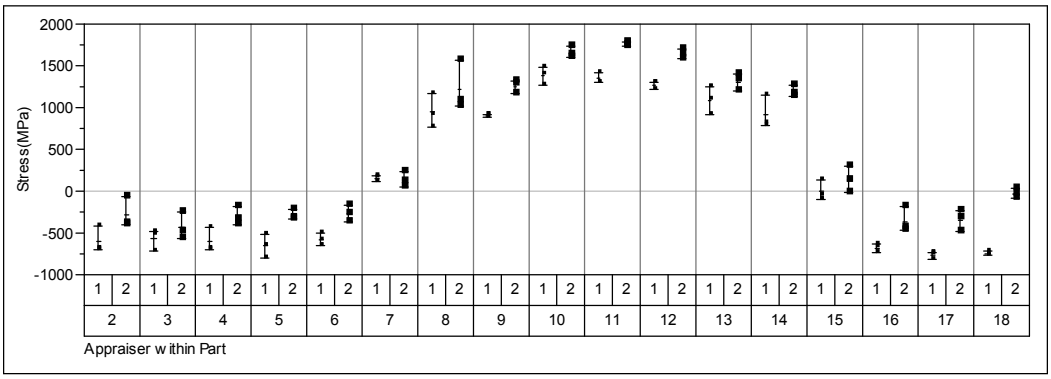
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	431.29880
Reproducibility	(AV)	197.64606
Operator		197.64606
Gauge R&R	(RR)	474.43146
Part Variation	(PV)	266.21871
Total Variation	(TV)	544.01749

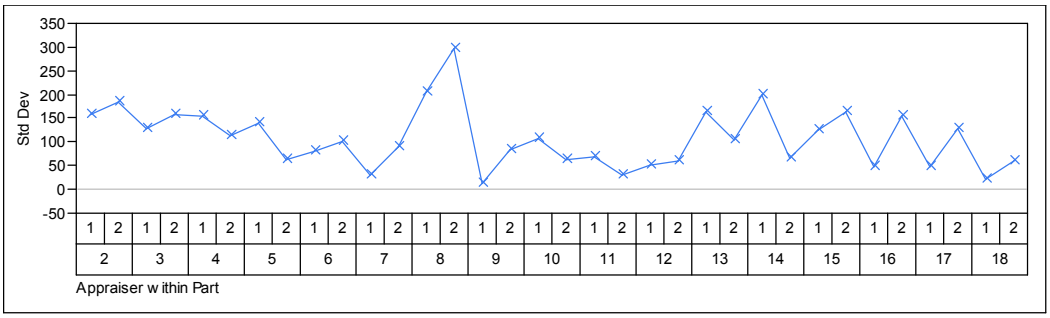
5.15	k
87.20846	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
1.78210	Precision to Part Variation = RR/PV
0.79120	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.9 500 kHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	4.85372006
Appraiser	1.05935956

Gauge R&R

Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**
Repeatability	(EV)	711.2555
Reproducibility	(AV)	1105.6363
Operator		4415.2229
Gauge R&R	(RR)	1314.654
Part Variation	(PV)	4415.2229
Total Variation	(TV)	4606.7895

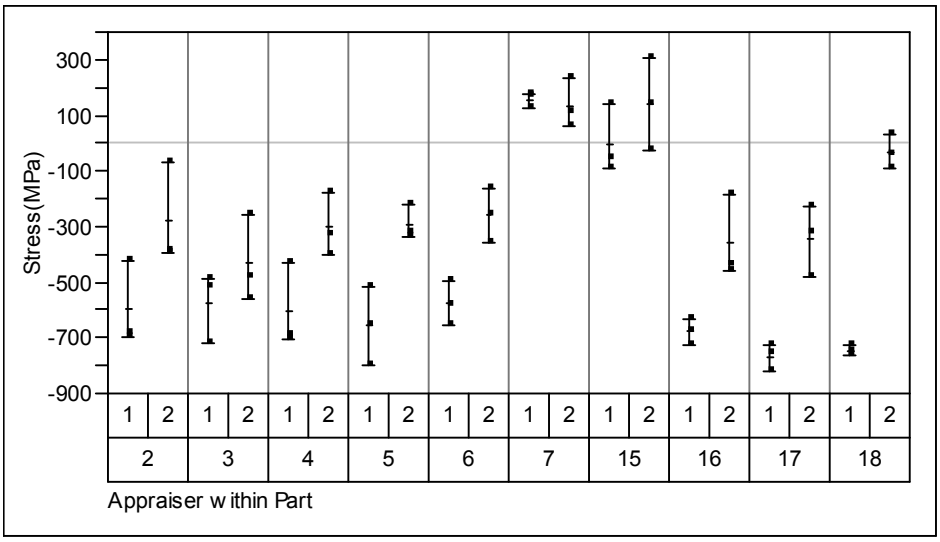
Measurement Source	**Variation (5.15*StdDev)**
5.15	k
28.53732	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.29775	Precision to Part Variation = RR/PV
4.73544	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

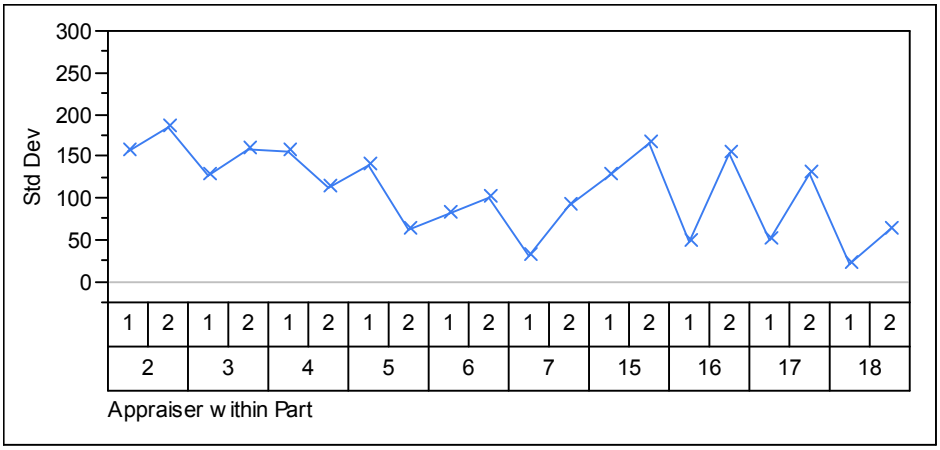
Using last column 'Appraiser' for Part.

จ. 2.10 500 kHz ตัดตัวอย่างบริเวณเฟอร์ไรท์ออก

Variability Gauge

Variability Chart for Stress (MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	1.65495704
Appraiser	1.45771236

Gauge R&R

Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	760.8834	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	1091.4968	Appraiser Variation

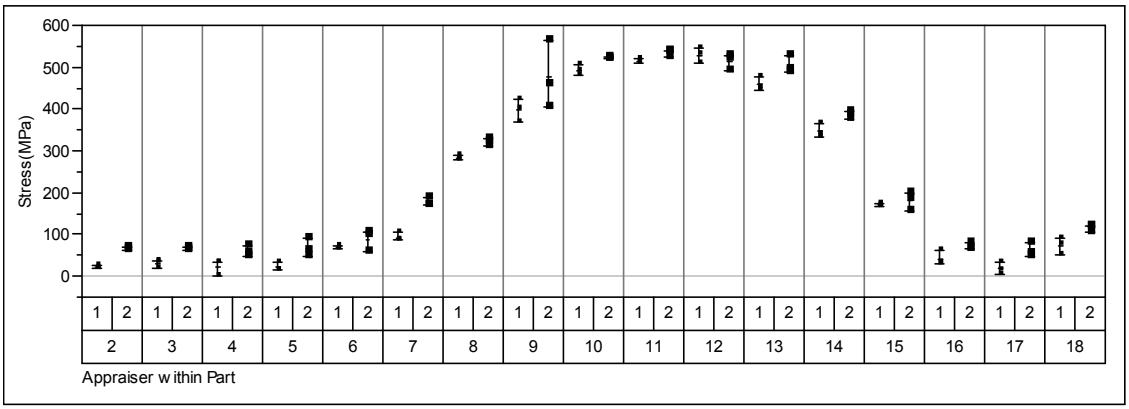
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Operator		1091.4968	
Gauge R&R	(RR)	1455.3774	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	1240.6369	Part Variation
Total Variation	(TV)	1819.2000	Total Variation

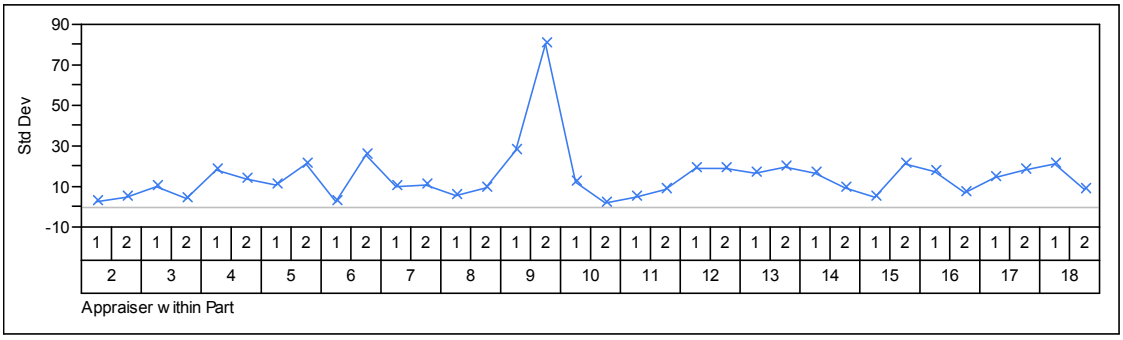
5.15	k
73.138166	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
1.07246	Precision to Part Variation = RR/PV
1.31474	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ข. 2.11 1 MHz

Variability Gauge

Variability Chart for Stress(MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	8.45282459
Appraiser	1.01638905

Gauge R&R

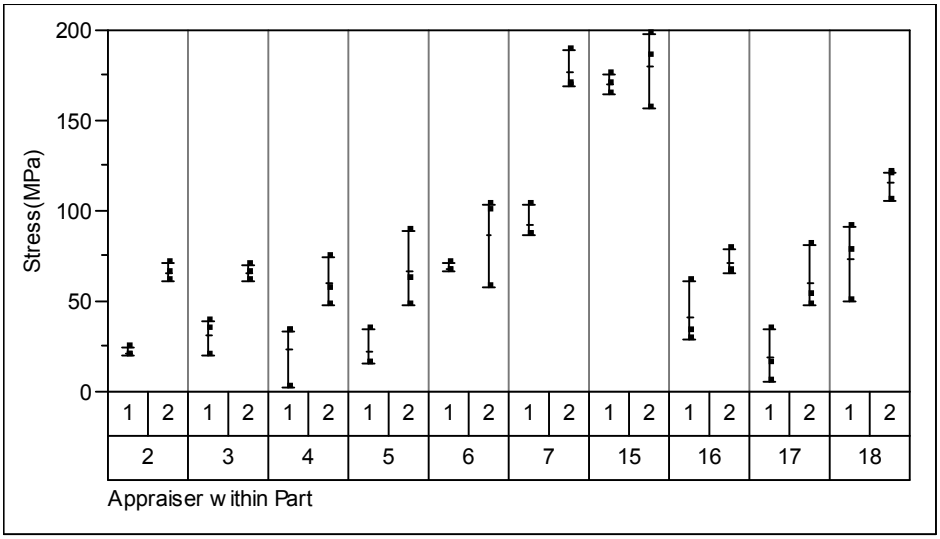
Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	110.8443	Equipment Variation
Reproducibility	(AV)	132.6473	Appraiser Variation
Operator		132.6473	
Gauge R&R	(RR)	172.86343	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	1025.9578	Part Variation
Total Variation	(TV)	1040.4187	Total Variation

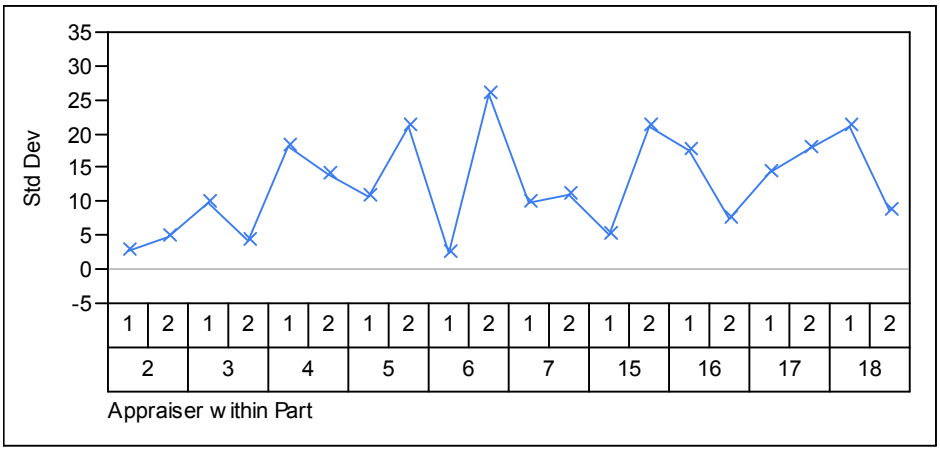
5.15	k
16.61479	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.16849	Precision to Part Variation = RR/PV
8.36846	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

จ. 2.12 1 MHz ตัดตัวอย่างบริเวณเฟอร์ไรท์ออก

Variability Gauge

Variability Chart for Stress(MPa)





Discrimination Ratio

Source	**Ratio**
Part	2.27497312
Appraiser	1.27389538

Gauge R&R

Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Repeatability	(EV)	84.37608	Equipment Variation

Measurement Source		**Variation (5.15*StdDev)**	
Reproducibility	(AV)	139.87923	Appraiser Variation
Operator		139.87923	
Gauge R&R	(RR)	163.35704	Measurement Variation
Part Variation	(PV)	236.03545	Part Variation
Total Variation	(TV)	287.05097	Total Variation

5.15	k
56.908722	% Gauge R&R = 100*(RR/TV)
0.69209	Precision to Part Variation = RR/PV
2.03732	Number of Distinct Categories = 1.41(PV/RR)

ภาคผนวก ฉ
การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดความเค้นตกค้าง

ฉ. การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดความเค้นตกค้าง

วัตถุประสงค์ของการคำนวณขั้นตอนนี้เพื่อประมาณค่าความไม่แน่นอนเฉพาะตัวเครื่องมือวัดกระแสไหลวน โดยใช้แนวทางทางสถิติที่ถูกต้อง (Valid approaches) อย่างสมเหตุสมผล

ฉ. 1 การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องมือวัด

1. จากตารางที่ ตารางที่ ค. 2 ความถี่ทีดีที่สุดสำหรับการวัด คือความถี่ 1 MHz มีค่า

   SD = 13.83 MPa ความไม่แน่นอนมาตฐานชนิด A = 7.99 MPa

2. ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด B

   a. ความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดกระแสไหลวนจากการวัดซ้ำ

   จากตารางที่ ค. 4

$$U_{B1} = \frac{U_{AE}}{2} = \frac{0.306}{2} = 0.153$$

   b. ความไม่แน่นอนของความเที่ยงตรงของเครื่องทดสอบแรงดึง ±0.1%

$$U_{B2} = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.0289\ MPa$$

3. ผลรวมของความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

$$U_C = \sqrt{7.99^2 + 0.0289^2}$$

U_c = 7.99 MPa

ความไม่แน่นอนรวมทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

$U = KU_C$

ค่า K = 2 ที่ความเชื่อมั่น 95 %

U = 2 x 7.99 MPa

U_{AE} = 16 MPa

ฉ. 2การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดความเค้นตกค้าง

1. จากตารางที่ ตารางที่ ค. 9 ค่า SD สูงที่สุดอยู่ที่ลำดับ8 ตำแหน่งที่ 9 บริเวณ รอยต่อของบ่อลอมละลาย และบรอเวณกระทบร้อน มีค่าเท่ากับ

   SD = 68.5 MPa ความไม่แน่นอนมาตฐานชนิด A = 28 MPa

2. ความไม่แน่นอนชนิด B

   ความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัด

$$U_{Bm1} = \frac{U_{AE}}{2} = \frac{16}{2} = 8 \quad \text{MPa}$$

3. ผลรวมของความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

$$U_C = \sqrt{28^2 + 8^2}$$

U_c = 29 MPa

ความไม่แน่นอนรวมทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่น95 %

$U = KU_C$

ค่า K = 2 ที่ควมเชื่อมั่น95 %

U = 2 x 29 MPa

U_{AE} = 58 MPa

ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty) แบบ U_{ISO} ของการวัดความเค้นตกค้างด้วยกระแสไหลวนเท่ากับ ± 58 MPa ที่ความเชื่อมั่น95 %

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล นายรัฐพงศ์ สังวรวิตร

วัน เดือน ปีเกิด 4 พฤศจิกายน 2514

ประวัติการศึกษา

ระดับอาชีวศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างโลหะ
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ พ.ศ. 2534

ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร พ.ศ. 2536

ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2556

ประวัติการทำงาน ตำแหน่งวิศวกรโครงการ
บริษัท โซคอนเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด2536-2538

ตำแหน่งวิศวกรควบคุมคุณภาพ
บริษัทโอมิคเทคนิแค็ลเซอร์วิส จำกัด2538-ปัจจุบัน

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Pueng-On, I., Sungworavit, R. and Jomdecha, Ch., 2013, “A Study on Residual Stress Profile of Resistance Spot Welding in Stainless Steel Grade 304”, **International Conference on Materials Processing Technology 2013**, pp. 177-181.

Sungworavit, R., Jomdecha, Ch., Pueng-On, I. and Lenwari, W., 2013, “Eddy Current measurement for Residual Stress Estimation in Stainless Steel Grade 304”, **International Conference on Materials Processing Technology 2013**, pp. 182-187.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่..23.....เดือน.....กรกฎาคม..... พ.ศ.... 2557.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....รัฐพงศ์ สังวรวิตร.....รหัสประจำตัว..... 52430402.....
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ระดับ ❍ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ◉ ปริญญาโท ❍ ปริญญาเอก
หลักสูตร..วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.... สาขาวิชา..มาตรวิทยาทางอุตสาหรรม.....คณะ....วิศวกรรมศาสตร์.....
อยู่บ้านเลขที่5/1174หมู่.... 10...ตรอก/ซอย.. 10.. หมู่บ้านประชาชื่น.....ถนน..สามัคคี....ตำบล/แขวง...บางตลาด ....
อำเภอ/เขต..ปากเกร็ด.....จังหวัด...นนทบุรี.....รหัสไปรษณีย์..... 11000.....
เป็น "ผู้โอน"ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี **รศ.ดร.สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา** ตำแหน่ง **รองคณบดีฝ่ายวิจัยและวิชาการ** คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง.....การประเมินค่าความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 โดยใช้กระแสไหลวน.....

ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ..ผศ. ดร.วันจักรี เล่นวารี.....อาจารย์ที่ปรึกษา และ/หรือ .....ผศ. ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าวรวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือ

ทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นายรัฐพงศ์ สังวรวิตร)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

รองคณบดีฝ่ายวิจัยและวิชาการ

ปฏิบัติการแทนคณบดี

ลงชื่อ.....พยาน

(ผศ. ดร.วันจักรี เล่นวารี)

ลงชื่อ.....พยาน

(ผศ. ดร.เดี่ยว กุลพิรักษ์)