



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษาเบื้องต้นการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูงและความ
เค้นตกค้างจากการเชื่อมรางรถไฟ
Preliminary study of Defect location using Ultrasonic Testing
and Residual Stress in Welded Rail

นายนवल คุ้มทรัพย์

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษาเบื้องต้นการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูงและความ
เค้นตกค้างจากการเชื่อมรางรถไฟ
Preliminary study of Defect location using Ultrasonic Testing
and Residual Stress in Welded Rail

นาย นวพล คุ้มทรัพย์

ร.พ.
๑๖๑๗ ก
๒๐๐๙

๖๐๐๒๖๖๔๒๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**148483**
วันเดือนปี.....**30 ต.ค. 2560**

b.....**๑๐๘๗๐๙๖๖**
l.....

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การศึกษาเบื้องต้นการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูงและ
ความเค้นตกค้างจากการเชื่อมรางรถไฟ

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายนवल คุ่มทรัพย์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน ดร.พรศักดิ์ ทัศนราพันธ์

สถานประกอบการ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 โครงการย่อย โครงการที่ 1 การทำแท่งสอบเทียบมาตรฐานรางรถไฟเพื่อใช้ในการตรวจสอบความบกพร่องของรางรถไฟด้วยวิธีอัลตราโซนิก โดยแท่งมาตรฐานนี้ถูกทำมาจากหัวรางรถไฟ นอกจากนี้ได้จำลองรอยบกพร่องเทียบบนรางรถไฟเพื่อใช้ตรวจสอบการค้นหาตำแหน่งรอยบกพร่องโดยเครื่องอัลตราโซนิกที่ผ่านการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่ทำขึ้นมา ผลการตรวจสอบพบว่าเครื่องที่ผ่านการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานรางรถไฟสามารถค้นหารอยเทียบได้ถูกต้อง

โครงการที่ 2 การประเมินความเค้นตกค้างจากการเชื่อมในรางรถไฟ เป็นที่ทราบว่าความเค้นตกค้างเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายในรางรถไฟโดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อม ดังนั้นจึงจำเป็นต่อการศึกษา วิธีที่ใช้วัดค่าความเค้นตกค้างแบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่ วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น และวิธีสเตรนเกจ วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายที่วัดค่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแลตติซของโครงสร้างวัสดุโดยใช้รังสีเอ็กซ์ ซึ่งค่าความเค้นตกค้างสามารถหาค่าได้เมื่อระยะห่างระหว่างแลตติซ ส่วนวิธีสเตรนเกจใช้ในการคำนวณความเครียดที่ถูกปลดปล่อยออกมาหลังชิ้นงานถูกตัดและคำนวณเป็นค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ : แท่งสอบเทียบมาตรฐาน / วิธีอัลตราโซนิก / ความเค้นตกค้าง / เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น / สเตรนเกจ

Cooperative Title: Preliminary study of defect location and residual stress in welded rail using Ultrasonic testing and X-Ray Diffraction

Student intern name: Mr. Nawapol Khumsup

Faculty: Engineering

Department: Mechanical Engineering

Advisor name: Dr. Jittraporn Wongsan-gam

Mentor name: Dr. Pornsak Thasanaraphan

Company: Thailand Institute of Scientific and Technological Research

ABSTRACT

This project assigned from Thailand Institute of Scientific and Technological Research consist of 2 minor projects. In Project 1 the standard calibration block is developed. This standard block will be used to calibrate the ultrasonic machine that used to detect defects in railway. The standard calibration block is made from rail head. In addition, the artificial defects in rails are simulated to evaluate the accuracy of the tool after calibration.

In Project 2 the residual stress generated from welding process in railway rails is measured. It is know that the residual stress of the rail is one of the important factors in rail failure. Thus, it is necessary to study the residual stress measurement. the method of stress measurement can be divide into two methods. One is the X-Ray diffraction method and the other is the stress gauge method. The former uses the X-Ray to measure the change of the lattice spacing of the material's structure. The latter measures the strains released after cutting The railway rail then calculate the residual stress.

Keyword : Standard Calibration Block / Ultrasonic Testing / Residual Stress / X-Ray Diffraction/
Strain Gauge

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.จิตรภรณ์ วงศาภาม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ดร.พรศักดิ์ ทศนราพันธ์ เจ้าหน้าที่ และนักวิชาการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ในหน่วยงานศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ (ศพว.) ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจน ให้ยืมใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และช่วยเหลือด้านการปฏิบัติงาน สถานที่ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาค่าความเค้นตกค้าง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก และขอขอบคุณ นายศิขริน ศรีโชติ เจ้าหน้าที่ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่กรุณาให้ยืมใช้เครื่องมือ และช่วยเหลือด้านการทำงาน แก่ผู้ทำวิจัย งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จได้ ถ้าปราศจากแรงสนับสนุนจาก ผู้มีพระคุณ ญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นवल คุ่มทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย _____	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ _____	ii
กิตติกรรมประกาศ _____	iii
สารบัญ _____	iv
สารบัญตาราง _____	vi
สารบัญรูป _____	vii
บทที่ 1 บทนำ _____	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ _____	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย _____	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย _____	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย _____	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ _____	3
โครงการที่ 1 การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง _____	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง _____	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย _____	19
3.1 การสร้างแท่งมาตรฐานจากรางรถไฟ _____	19
3.2 การสร้างชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องเทียมขึ้นจากรางรถไฟ _____	20
3.3 การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง _____	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย _____	24
4.1 ผลจากการสอบเทียบกับของหัวตรวจสอบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้น _____	24
4.2 นำหัวตรวจสอบที่ทำการสอบเทียบมาตรวจสอบหาค่าตำแหน่งรอยบกพร่อง _____	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ _____	27
5.1 สรุปผลการวิจัย _____	27
5.2 ข้อเสนอแนะ _____	27

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและตามขวางของวัสดุตัวกลางชนิดต่าง ๆ _____	9
4.1 แสดงตำแหน่งของรอยบกพร่องเทียมเปรียบเทียบกับระยะจริง _____	25



สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนตัวของคลื่นตามยาว	5
2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง	6
2.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผิว	7
2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่น (ก) แบบสมดุและ (ข) ไม่สมดุ	8
2.5 การผ่านเข้าและสะท้อนกลับของเสียงเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสองชนิด	11
2.6 การสะท้อนและการเปลี่ยนโมดของคลื่นเสียง	12
2.7 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงฉาก	13
2.8 โครงสร้างและชนิดของหัวตรวจสอบแบบเพียร์โซอิเล็กตริก	14
2.9 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงมุมเอียง	15
2.10 คลื่นเสียงมีการเปลี่ยนแปลงโมด	16
2.11 การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก	17
2.12 เทคนิคการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	17
3.1 แสดงแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้นหลังจากการตัดและเจียร	19
3.2 แสดงการเจาะรูตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard	20
3.3 แสดงเครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340	21
3.4 แสดงลักษณะและขนาดของหัวตรวจสอบที่ใช้ในการทดลอง	22
3.5 แสดงลักษณะของ Ultrasonic Couplant	22
3.6 แสดงการตรวจสอบกับรางที่ผ่านการสร้างรอยบกพร่องเทียมตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard	23
4.1 แสดงการสอบเทียบเพื่อหาความเร็วเสียงและความหนาจริงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น	24
6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	30
6.2 สเตรนเกจ (Strain Gage)	31
6.3 สเตรนเกจที่ทำมาจากฟอยล์โลหะ	33
6.4 แสดงการใช้งานของสเตรนเกจ	33
6.5 แสดงอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสี	34
6.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์	35
6.7 แสดงหัววัด (Detector) หมุนปรับ เพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มรังสี	36
7.1 แสดงรางที่ใช้ในการทดลอง	38

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน	39
7.3 แสดงลักษณะและขนาดของผลกระทบเนื่องจากความร้อนหลังการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วทาด้วยกรดไนตริก 10 %	40
7.4 แสดงตัวอย่างการด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมาจากเครื่อง XSTRESS รุ่น 3000	40
7.5 แสดงชนิดของสเตรนเกจขนาด 120 Ω ที่ใช้ในการทดลอง	41
7.6 แสดงภาพรวมของตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจของรางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง	42
7.7 แสดงสภาพหลังการตัดของรางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง	42
7.8 แสดงภาพรวมของตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจของรางแข็งเชื่อมกับรางอ่อนและรางอ่อนเชื่อมกับรางอ่อน	43
8.1 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความเค้นตกค้างด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมา	44
8.2 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางรางบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมา	45
8.3 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวรางบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมา	45
8.4 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางรางบริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมา	46
8.5 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวรางบริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์พลาสมา	46
8.6 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจ	47
8.7 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวของรางแข็งกับรางแข็งด้วยวิธีสเตรนเกจ	48
8.8 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางแข็งกับรางแข็งด้วยวิธีสเตรนเกจ	48
8.9 แสดงความเค้นตกค้างของรางแข็งเชื่อมรางอ่อนแนวตามยาวจากการวัดด้วยสเตรนเกจ	49
8.10 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวของรางแข็งกับรางอ่อนวิธีสเตรนเกจ	50
8.11 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางแข็งกับรางอ่อนด้วยวิธีสเตรนเกจ	51
8.12 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางอ่อนกับรางอ่อนวิธีสเตรนเกจ	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้นได้รับความนิยมและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic testing) [1],[2],[3] เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ภายในชิ้นงานก็เป็นหนึ่งในกระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเช่นกัน การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูงนี้ ทำให้ทราบตำแหน่งและขนาดของรอยบกพร่องโดยที่ ต้องทำการผ่าชิ้นงานเพื่อดูความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานแล้วยังสามารถนำไปใช้งานต่อได้อีกด้วย โดยก่อนทำการตรวจสอบทุกครั้งจะต้องมีการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานเพื่อตรวจสอบเช็คสภาพเครื่องให้มีความถูกต้องก่อนทำการวัดชิ้นงานจริง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำชิ้นงานแท่งสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration Block) [4],[5] ขึ้นจากรางรถไฟ เพื่อใช้สำหรับสอบเทียบแล้วนำไปตรวจสอบจุดบกพร่องในรางรถไฟโดยเฉพาะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ว่าแท่งตรวจสอบที่ทำขึ้นสามารถนำไปสอบเทียบและหาตำแหน่งของรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นบนรางรถไฟได้อย่างชัดเจน

การประเมินความเค้นตกค้าง (Residual Stress) [6],[7] โดยใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) [8],[9] ก็เป็นอีกหนึ่งรูปแบบของวิธีการตรวจสอบแบบทำลาย เป็นวิธีหนึ่งในหลายวิธีเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมเป็นการป้องกันความเสียหายหรือการพังทลายที่อาจเกิดขึ้นได้ก่อนเวลาอันควร เนื่องจากความบกพร่องหรือการรับภาระเกินอัตรากำหนดวัสดุ การหาค่าความเค้นตกค้างโดยใช้สเตรนเกจเป็นอีกหนึ่งวิธีที่เหมาะสมสามารถทำการตรวจสอบชิ้นงานได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายใดๆกับชิ้นงาน และสามารถทำการตรวจสอบซ้ำบริเวณเดิมได้ แต่ในงานวิจัยนี้ค่าความเค้นตกค้างมาจากความเค้นที่คลายตัวออกจากชิ้นงาน ด้วยวิธีการตัดชิ้นงาน การหาค่าความเค้นตกค้างมีวิธีที่ยอมรับได้และใช้กันอยู่ทั่วไปสองวิธีคือ การเจาะรูและใช้สเตรนเกจ (Hole Drilling & Strain Gauge) กับวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction) [10],[11] แต่งานวิจัยนี้จะใช้สเตรนเกจแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge) ในการวิเคราะห์ความเค้นนี้ผลของความเค้นตกค้างที่วัดได้จากวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันกับผลลัพธ์ที่ได้จากสเตรนเกจ

การทดสอบที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) ทั้งสิ้นซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบต่างๆอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการทดสอบเกี่ยวกับวิธีนี้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ ชิ้นงานที่นำมาทดสอบแล้วไม่ถูกทำลายและสามารถนำกลับไปใช้งานต่อได้ถ้าตรวจสอบแล้วไม่มีความเสียหายแต่อย่างใด ซึ่งวิธีที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้มีทั้งการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง ติดตั้งสเตรนเกจ และวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน ล้วนเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างแท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบจากรางรถไฟเพื่อใช้สอบเทียบกับเครื่องมือที่จะทำการตรวจหารอยบกพร่องของรางรถไฟ
2. แท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้นสามารถตรวจสอบรอยบกพร่องบนงานจริงได้
3. เพื่อประเมินค่าความเค้นตกค้างชิ้นงานทดสอบบริเวณรอยเชื่อมราง
4. วิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากสเตรนเกจและวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. รางที่ใช้ทำแท่งสอบเทียบมาตรฐานกับทำรอยบกพร่องเทียมเป็นรางอ่อนที่มีค่าความแข็งที่ 260 HB
2. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบรอยบกพร่องคือ Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 ขนาดหัวตรวจสอบที่ใช้มีความถี่คือ 2 MHz และ 4 MHz โดยทำมุม 45 องศาเหมือนกัน
3. รอยเชื่อมรางรถไฟเป็นแบบแฟรชบัดด์ (Flash Butt) โดยใช้รางแข็งที่มีค่าความแข็งที่ 350 HB และรางอ่อนที่มีค่าความแข็งที่ 260 HB โดยแบ่งการเชื่อมเป็น 3 แบบ ได้แก่ รางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง รางแข็งเชื่อมกับรางอ่อนและรางอ่อนเชื่อมกับรางอ่อน เป็นรางแบบ UIC 60
4. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเค้นตกค้างได้แก่ เครื่องที่ใช้เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction) คือ XSTRESS 3000 สเตรนเกจเป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge Strain Gauge) อ่านค่าทิศทางเดียว มีค่าความต้านทานที่ 120 Ω แล้วต่อเข้ากับเครื่องแปลงสัญญาณออกมาเป็นตัวเลขคือ Quantum X

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีของคลื่นความถี่สูงและการเกิดความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟ วิธีใช้สเตรนเกจ และวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น
2. ศึกษาทฤษฎี อุปกรณ์ และขีดจำกัดการใช้งาน รวมทั้งรางที่จะทำการตรวจสอบและประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยการติดตั้งสเตรนเกจ
3. ศึกษาหาความสัมพันธ์ของคลื่นความถี่สูงที่นำมาใช้และความเค้นตกค้างที่เกิดบริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟจากแบบจำลองและงานวิจัยที่เคยมีมาก่อน
4. ออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องและประเมินความเค้นตกค้างด้วยวิธีติดตั้งสเตรนเกจและวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น
5. ทำการทดลองตรวจสอบรอยบกพร่องเทียมบนรางและหาความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อมรางแล้วบันทึกผลการทดลอง
6. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลของทั้ง 2 การทดลอง
7. สรุปผล และจัดทำรายงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำแท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบไปใช้ตรวจสอบหารอยบกพร่องในงานเกี่ยวกับรางรถไฟอื่น ๆ ได้
2. เป็นแบบจำลองในการนำไปทำแท่งมาตรฐานแบบหรือชนิดอื่น ๆ ได้
3. สามารถใช้สเตรนเกจประเมินค่าความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟได้
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ และปรับปรุงการตรวจสอบความเค้นตกค้างโดย ใช้วิธี เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน และสเตรนเกจให้มีความเหมาะสมและถูกต้องมากยิ่งขึ้น





โครงการที่ 1 การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1. คุณสมบัติและชนิดของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงความถี่สูงหรือที่เรียกว่าอัลตราโซนิก เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่มากกว่า 20 กิโลเฮิรท์ ขึ้นไปการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยทั่วไปใช้ค่าความถี่ระหว่าง 0.5-20 เม็กกะเฮิรท์ [10] คลื่นเสียงอัลตราโซนิกโดยทั่วไปหมายถึง “คลื่นเสียงมีความถี่สูงซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน” เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ไปในลักษณะของคลื่น โดยกระจายไปรอบ ๆ จุดกำเนิด การเคลื่อนที่ของจุดต่างๆบนคลื่น และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อความเร็วของคลื่นเสียง

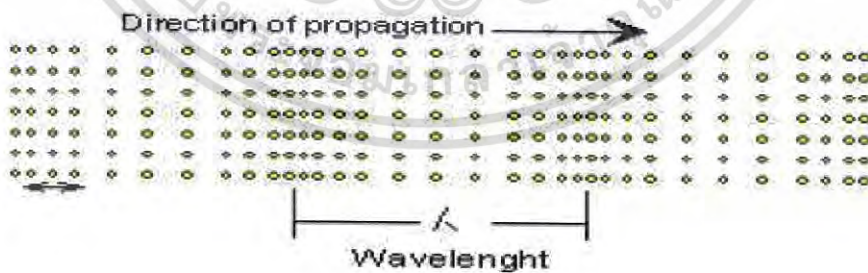
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วการเดินทางของคลื่นเสียงมีดังนี้

1. ชนิดของวัสดุมีผลต่อการส่งถ่ายพลังงานคลื่นเสียง

2. ลักษณะ ทิศทางการไหลของเกรนหรือตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง

คลื่นเสียงแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ คลื่นตามยาว คลื่นตามขวาง คลื่นผิว และคลื่นแผ่น

- คลื่นตามยาว (Compressional or Longitudinal Wave , VL=1) สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นก๊าซ ของเหลวหรือของแข็งได้ การเคลื่อนตัวของคลื่นจะเคลื่อนตัวไปในแนวเดียวกับการสั่นสะเทือน ของโมเลกุลของตัวกลางที่มีการอัดตัวและขยายตัวในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนตัวของคลื่นตามยาว

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 18

- คลื่นตามขวาง (Transverse of Shear Wave, $V_R = 0.5V_L$) การเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางทุกๆจุดบนคลื่นที่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลาง คลื่นตามขวางจะมีอยู่เฉพาะในของแข็ง เนื่องจากมีความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shearing Force)

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -k^2 c^2 \frac{\partial^4 \varepsilon}{\partial x^4} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ ξ = ส่วนที่ยื่นออกของแท่งโลหะจากรูปทรงปกติ (มม.)

K = รัศมีความโค้งของหน้าตัดของแท่งโลหะ (มม.)

C = ความเร็วคลื่นเสียง (เมตรต่อวินาที)

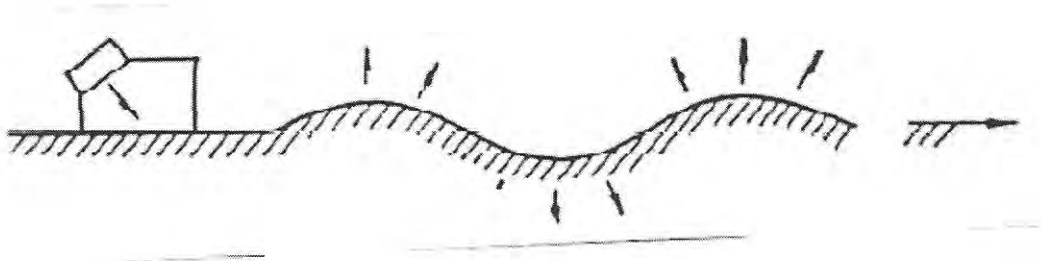
คลื่นตามขวางจะไม่ปรากฏในตัวกลางที่เป็นของเหลว หรือก๊าซ ในการตรวจสอบจึงสามารถใช้คลื่นตามขวาง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 0.5 เท่าของคลื่นตามยาว ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง

ที่มา : นาย พณพล บั้นเงิน, 2548 : 19

- คลื่นผิว (Surface Wave of Rayleigh Wave, $V_S = 0.9V_R$) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในเนื้อของแข็งบริเวณผิว เกิดขึ้นเนื่องจากการที่คลื่นตามยาวจากแหล่งกำเนิดเดินทางมาถึงผิวบนของตัวกลาง และเปลี่ยนเป็นคลื่นตามขวางเดินทางไปบนผิวของตัวกลาง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งคลื่น ผิวหรือคลื่นเรเลย์จะเคลื่อนที่เฉพาะบริเวณผิวชิ้นงาน มีความเร็วเท่ากับ 0.9 เท่าของคลื่นตามขวาง



ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นที่ผิว

ที่มา : นาย พณพล บัณฑิต, 2548 : 19

คลื่นผิว มี 2 ชนิดที่น่าสนใจนำมาใช้ในงานตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกคือ คลื่นแผ่น (Plate Wave) หรือคลื่นแลมบ์ (Lamb Wave) และคลื่นเรเลย์ (Rayleigh Wave) การเคลื่อนตัวของอนุภาคในคลื่นแลมบ์ ตามปกติจะเป็นการแพร่กระจายในทิศทางของพื้นผิว ส่วนคลื่นเรเลย์ เป็นการเคลื่อนที่ร่วมกันหรือเสริมกันกับคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง ซึ่งอนุภาคการเคลื่อนที่จะเป็นวงรี ซึ่งความเร็วของคลื่นผิวหาได้จากสมการที่ 2.2

$$C_R = K_R C_S$$

สมการที่ 2.2

K_R = ค่าคงที่ (ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง)
อัตราส่วนปัวซอง ความสัมพันธ์ระหว่าง C_B , C_S และ C_R คือ

$$\frac{C_R^6}{C_S^6} - \frac{8C_R^4}{C_S^4} + C_R^2 \left(\frac{24}{C_S^2} - \frac{16^2}{C_B^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{C_S^2}{C_B^2} \right) = 0$$

สมการที่ 2.3

C_R = อนุภาคเฉพาะสำหรับค่าน้อยกว่า C_S ผลของความถี่ของการแพร่กระจายของความเร็วคลื่นขึ้นอยู่กับ ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความหนาของวัสดุ

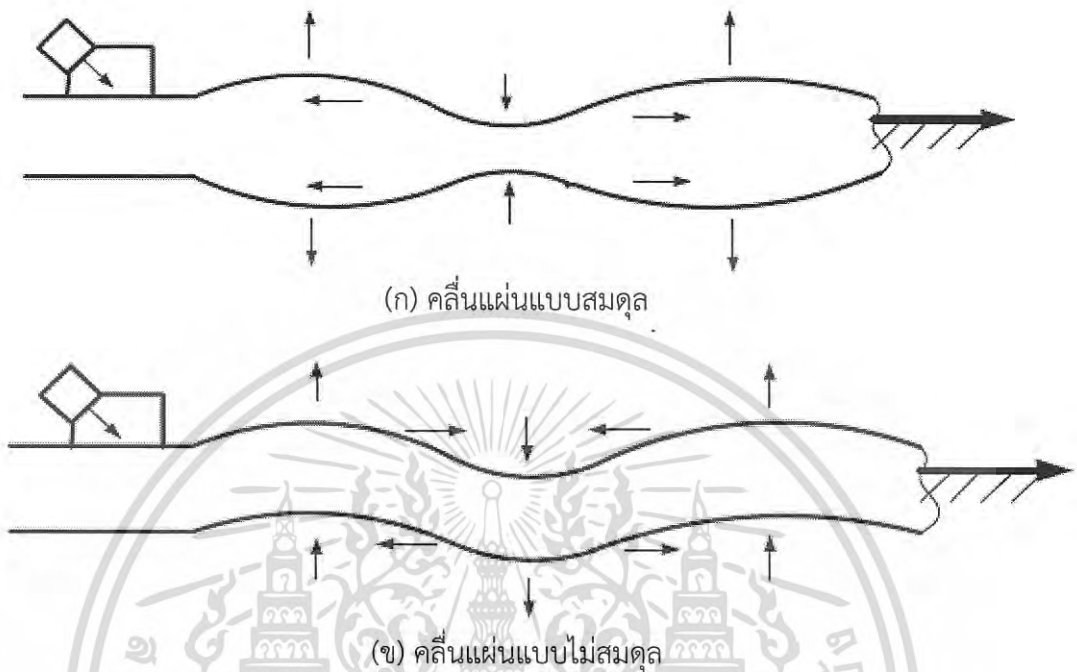
- คลื่นแผ่น (Plate Wave or Lamb Wave) เกิดขึ้นในวัตถุที่มีความหนาเท่ากับความยาว

คลื่นโดยเกิดที่ผิวบนและผิวล่าง แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ คลื่นแผ่นแบบสมดุ (Plate Wave Symmetry Mode) และคลื่นแผ่นแบบไม่สมดุ (Anti-Symmetry Mode) ความเค้นที่เกิดในแผ่นที่

เกิดการโค้งงอจะมีความซับซ้อนมากกว่าความเค้นที่เกิดในแท่งโลหะ เพราะว่าแต่ละเอลิเมนต์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เพิ่มขึ้นในแผ่นภายใต้ความเค้นอาจจะทำให้วัตถุถูกบังคับในทุกทิศทาง โดย ความเร็วจะเปลี่ยนตาม โมดความถี่ของความหนาของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นแบบสมมูล (ก) และไม่สมมูล (ข)

ที่มา : นาย พณพล ปั่นเงิน, 2548 : 20

- ความเร็วของคลื่นเสียง (Wave Velocity) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของคลื่นแต่ละชนิด ซึ่งกระทำต่อมวลของวัสดุและเปลี่ยนแปลงจาก พลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือน โดยเสียงจะแผ่กระจายไปรอบ ๆ จุดกำเนิดในลักษณะของคลื่น วัสดุตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านแต่ละชนิดจะมีความเร็วที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและชนิดของคลื่นเสียง ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v = f \times \lambda$$

สมการที่ 2.4

เมื่อ v คือ ความเร็วคลื่นเสียง (เมตรต่อวินาที)

λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

f คือ ความถี่ (รอบต่อวินาที หรือ เฮิรท์)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและตามขวางของวัสดุตัวกลางชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	คลื่นตามยาว ความเร็ว (m/s)	คลื่นตามขวาง ความเร็ว (m/s)
เหล็กกล้า	5,920	2,925
เหล็กหล่อ	4,500	2,500
ทองแดง	4,660	2,260
นิกเกิล	5,630	2,960
อลูมิเนียม	6,300	3,100
ทองเหลือง	4,430	2120
ดีบุก	3,320	1,670
ตะกั่ว	2,160	700
สังกะสี	4,170	2,410
น้ำ (20°C)	1,480	-
อากาศ	330	-

ที่มา : นาย อาทิตย์ จันทร์ขาว, 2550 : 10

2.1.2 การลดทอนพลังงาน (Attenuation) ของอัลตราโซนิก

การวัดความเร็วของเสียงมีวิธีการ 3 วิธีที่น่าสนใจดังนี้

1. การกำหนดความยาวของคลื่นต่อเนื่องที่รู้ค่าคงที่
2. หาเวลาการแพร่กระจายของคลื่นที่เดินทางโดยเรารู้ระยะทาง
3. กำหนดมุมของการสะท้อนของแนวคลื่นเสียงที่ตกกระทบบนผิวระหว่างตัวกลาง 2

ชนิด

การวัดความเร็วของเสียงและการลดทอนพลังงาน คือความสัมพันธ์กับสมการพื้นฐาน สำหรับการหาการแพร่กระจายคลื่นเสียงในทิศทาง X ในตัวกลาง ดังสมการที่ 2.5

$$A = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.5

เมื่อ A = แอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ x

A_0 = แอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่จุดเริ่มต้น ($x = 0$)

α = สัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงาน หน่วยของ α คือ เนเปอร์ (Neper) / หน่วย

ระยะทาง

การวัดค่าการลดทอนพลังงานโดยทั่วไปวัดเป็นจำนวน เดซิเบล (Decibel) ระหว่างสัญญาณแรกต่อสัญญาณที่ติดกัน จากสมการ 2 สามารถแปลงหน่วย เนเปอร์ / ระยะทาง กลับไปเป็นหน่วย เดซิเบล / ความยาว ดังสมการที่ 2.6

$$\alpha = \frac{0.1151}{x} U_2$$

สมการที่ 2.6

เมื่อ V = ความเร็วคลื่นเสียง

U_2 = เดซิเบล / วินาที

การเดินทางของเสียงในตัวกลางระหว่างจุด 2 จุดจะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scattering) หรือขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่าการลดทอนพลังงานโดยคู่สัญญาณแอมพลิจูด (Amplitude) จากเครื่องมือตรวจสอบอัลตราโซนิก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของแอมพลิจูดกับระยะทาง ดังสมการที่ 2.7

$$\text{Attenuation} = \frac{\Delta \text{Amplitude}}{\Delta \text{Distance}}$$

สมการที่ 2.7

2.1.3 การดูดกลืน (Absorption or Damping)

การเดินทางคลื่นเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งที่ยืดหยุ่น พลังงานที่ผ่านเข้าไปจะยังคงที่ การแพร่ขยายของคลื่นในตัวกลางจะไม่ทรงพลังงาน (Conservation) คือพลังงานทางกลจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากความร้อนยืดหยุ่น (Thermoelastic) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

การเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวและผลจากการเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Dislocation) ทำให้ความสูงของคลื่นลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) กับระยะทางจากแหล่งกำเนิดเสียง การสูญเสียพลังงานสัมพันธ์กับ ชนิดและรูปร่างของวัสดุ นอกจากนี้ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการสูญเสียพลังงานคือความถี่ของคลื่นเสียง ซึ่งพบว่าคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง ๆ อัตราการ

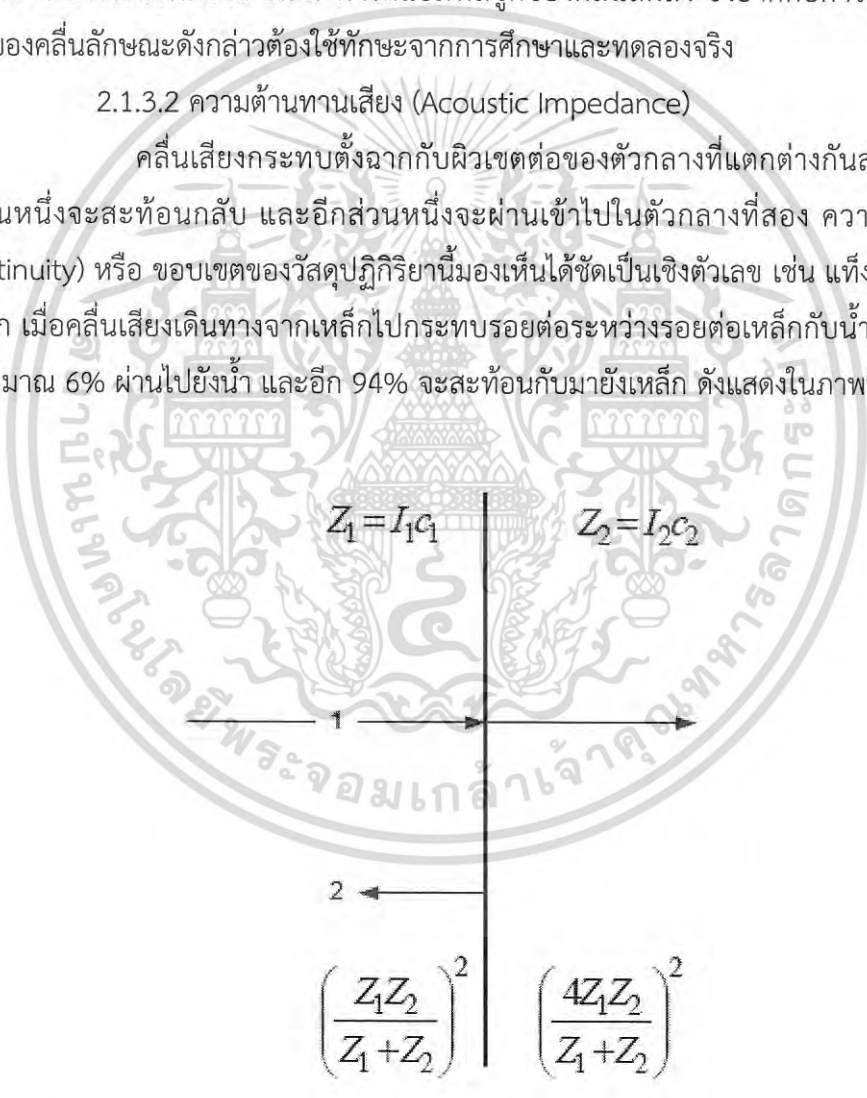
สูญเสียพลังงาน (Attenuation Rate) จะสูงตามด้วย ดังนั้นควรเลือกความถี่ของหัวตรวจสอบให้เหมาะสม

2.1.3.1 การกระเจิงและการแยกตัว (Scattering and Diffraction)

การเคลื่อนตัวของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีสภาพทางเรขาคณิตที่ไม่ต่อเนื่องหรือความไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) เช่น ขอบเกรน (Grain Boundary) และสิ่งแปลกปลอม ทำให้คลื่นเกิดการสะท้อนไป ทุกทิศทางและพลังงานของคลื่นเหล่านั้นจะแผ่ขยายไปอยู่ตามที่ว่างหรือรวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่าการ กระเจิง (Scattered) สำหรับคลื่นที่เดินทางไปเจอ ขอบ มุมหรือร่อง พลังงานคลื่นจะเกิดการเบี่ยงเบนโค้งงอ และแยกตัว (Diffracted) ลงไปในบริเวณรอยแยกเหล่านั้น การกระเจิงและการแยกตัวของคลื่น ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลง ซึ่งยากต่อการคำนวณ การลดทอนของคลื่นลักษณะดังกล่าวต้องใช้ทักษะจากการศึกษาและทดลองจริง

2.1.3.2 ความต้านทานเสียง (Acoustic Impedance)

คลื่นเสียงกระทบตั้งฉากกับผิวเขตต่อของตัวกลางที่แตกต่างกันสองชนิดคลื่นเสียงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) หรือ ขอบเขตของวัสดุปฏิกริยานี้มองเห็นได้ชัดเป็นเชิงตัวเลข เช่น แท็งก์บรรจุน้ำทำจากเหล็ก เมื่อคลื่นเสียงเดินทางจากเหล็กไปกระทบรอยต่อระหว่างรอยต่อเหล็กกับน้ำพลังงานของคลื่นประมาณ 6% ผ่านไปยังน้ำ และอีก 94% จะสะท้อนกับมายังเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การผ่านเข้าและสะท้อนกลับของเสียงเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสองชนิด

ที่มา : นาย พณพล บั้นเงิน, 2548 : 23

เมื่อ Z คือ ความต้านทานเสียง (กิโลกรัม / ตารางเมตร วินาที)

I คือ ความหนาแน่น (กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร)

C คือ ความเร็วเสียง (เมตร / วินาที)

การสะท้อนเป็นคุณสมบัติที่อธิบายปรากฏการณ์ เนื่องจากการสูญเสียของพลังงานคลื่นเสียงในวัสดุได้เช่น การเกิดแผ่นดินไหว

2.1.3.3 การหักเหและการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลื่น (Refraction and Mode Conversion of Wave)

คลื่นเสียงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่างกัน ถ้าเสียงไม่ตกกระทบตั้งฉากกับผิวเขตแดน สังเกตดูคลื่นตามยาวตกกระทบเป็นมุม θ_1 กับเส้นปกติ จากกฎการสะท้อน คลื่นที่ตกกระทบจะเกิดการสะท้อน และเกิดการหักเหของคลื่นส่งผลให้ความเร็วและความยาวของคลื่นเสียงเปลี่ยนไปซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อน โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนขณะเดียวกันเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลื่น (Mode Conversion) เป็นคลื่นตามขวางสะท้อนเป็นมุม θ_2 ได้ตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การสะท้อนและการเปลี่ยนโหมดของคลื่นเสียง

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 24

การคำนวณออกแบบหามุมตกกระทบ (θ_1) ที่ทำให้คลื่นตามขวางวิ่งขนานไปกับผิว ($\theta_2 = 0$) หาได้จากสมการที่ 2.8

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

สมการที่ 2.8

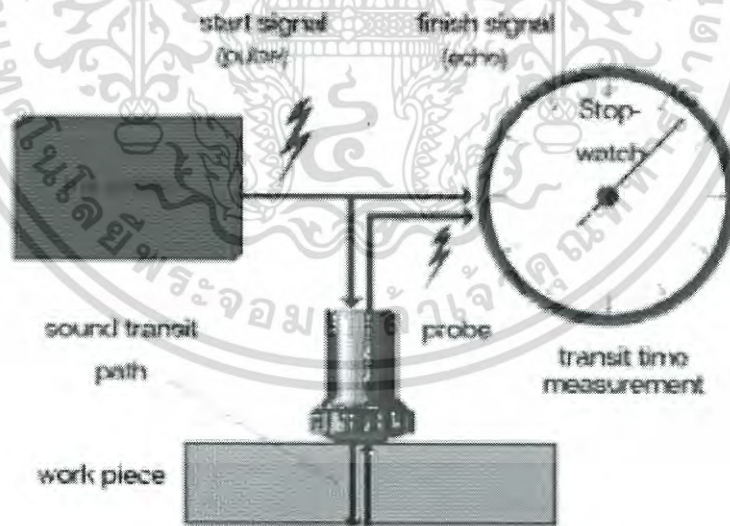
- เมื่อ $\sin \theta_1$ คือมุมตกกระทบของคลื่นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง 1
- $\sin \theta_2$ คือมุมสะท้อนของคลื่นในตัวกลางที่เป็นชั้นทดสอบ
- v_1 เป็นค่าความเร็วของคลื่นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง
- v_2 เป็นค่าความเร็วของคลื่นในตัวกลางที่เป็นชั้นทดสอบ

2.1.4 อุปกรณ์พื้นฐานใช้ตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก

การประเมินค่าความเค้นตกค้างโดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่างๆที่สำคัญดังนี้

2.1.4.1 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงฉาก (Normal Beam Contact Type)

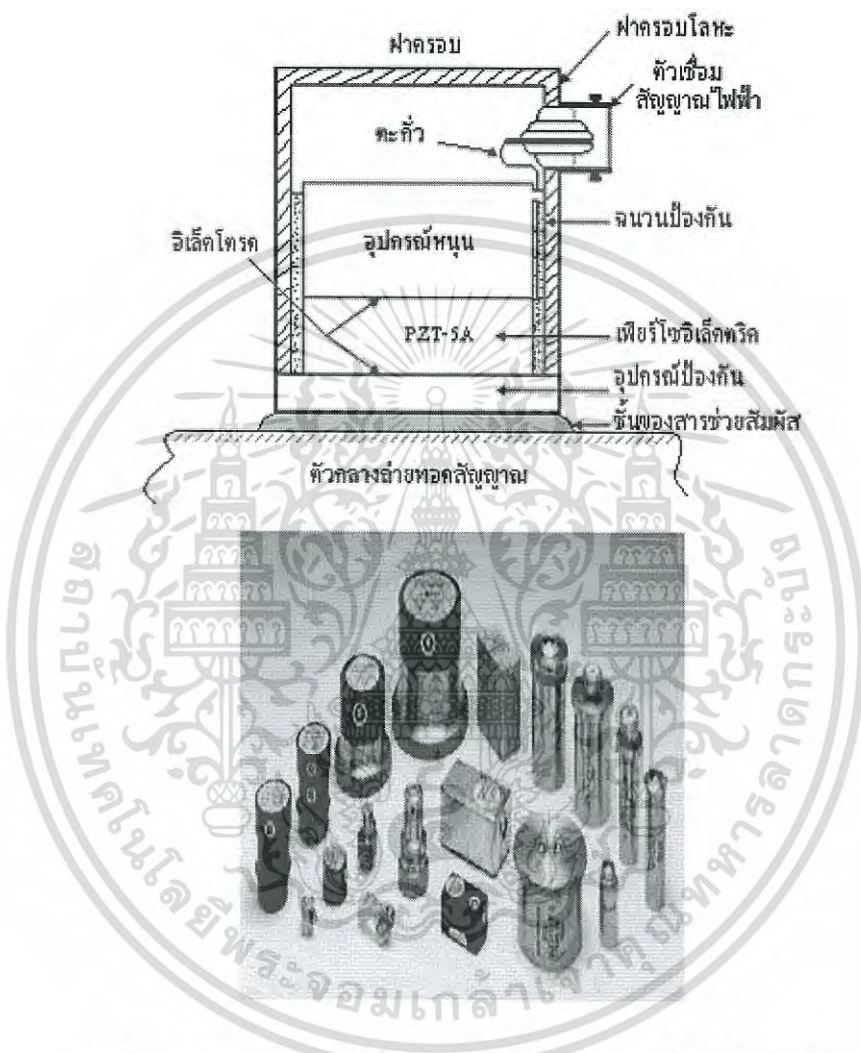
หัวตรวจสอบหรือโพรบ (Probe) ที่ใช้ในการตรวจสอบส่วนใหญ่จะใช้หัวรับสัญญาณแบบ เพียร์โซอิเล็กทริก ชนิดสัมผัสโดยตรงกับผิวหน้าของชิ้นงานโดยปกติคลื่นตามยาวจะทะลุผ่านผิวหน้าชั้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงฉาก

ที่มา : นาย พณพล บั้นเงิน, 2548 : 25

หัวตรวจสอบนี้ใช้ ทรานส์ดิวเซอร์เดียวเป็นทั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณคลื่นเสียงโดยใช้ปฏิกิริยาเพียร์โซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct Piezoelectric Transducer) โดยใช้ผลึกชนิดเดียวกันกับควอทซ์ (Quartz) เช่น ผลึกเทียมหรือ โพลาริซิงเตอร์เซรามิกโดยให้ได้รับสนามไฟฟ้าความเข้มสูงกับเพียร์โซอิเล็กทริก ทรานส์ดิวเซอร์ เมื่อผลึกควอทซ์เกิดการสั่นสะเทือนก็จะเกิดประจุไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างและชนิดของหัวตรวจสอบแบบเพียร์โซอิเล็กทริก

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 25

ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แบบเพียร์โซอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้า ไปเป็นพลังงานทางกลและกลับกัน ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกได้ การตรวจสอบแบบสัมผัสโดยตรงจะต้องมีของเหลวเป็นตัวประสาน (Coupling Media) เพื่อจะได้สามารถส่งพลังงานเสียงมากที่สุด

2.1.4.2 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงมุมเอียง (Angle Beam Contact

Type Probe)

คลื่นเสียงที่แทรกผ่านในหัวตรวจสอบมุมเอียง (Angle Probe) เมื่อถูกส่งผ่านเข้าไปในชั้นทดสอบจะเปลี่ยนรูปโดยทำมุมต่างๆกับผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ หัวตรวจสอบมุมเอียงนี้จะมีลิ้มสามเหลี่ยม (Shoe) ทำด้วยอะคริลิก (Acrylic) ที่ผิวด้านหนึ่งจะมีตัวทรานซิวเซอร์ซึ่งส่งคลื่นอัลตราโซนิคติดอยู่ เมื่อคลื่นอัลตราโซนิคถูกส่งออกจากหัวส่งส่วนที่เป็นคลื่นตามยาวจะเคลื่อนที่ไปในลิ้มสามเหลี่ยมแล้วหักเหเข้าสู่วัสดุตรงผิวสัมผัสกับชิ้นวัสดุมุมตกกระทบที่ถูกเลือกใช้นี้จะมากกว่ามุมวิกฤตที่ 1 (First Critical Angle) คือมุมตกกระทบที่ทำให้มุมเบี่ยงเบนของคลื่นตามยาวมีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังนั้นคลื่นที่เคลื่อนเข้าไปในเนื้อวัสดุจะมีเฉพาะคลื่นผิวที่เกิดขึ้นตอนคลื่นหักเหเท่านั้นดังภาพที่

2.9



ภาพที่ 2.9 หัวตรวจสอบชนิดสัมผัสแบบลำเสียงมุมเอียง

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 26

2.1.4.3 การคำนวณหามุมซู่เพื่อส่งคลื่นแนวทำมุม

จากหลักการพื้นฐานที่กล่าวว่า เมื่อคลื่นเสียงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งและคลื่นเสียงตกกระทบ (Incident Wave) เป็นแนวทำมุมกับเส้นปกติคลื่นเสียงจะหักเห (Refraction) โดยการหักเหจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความเร็วของเสียงในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน นอกจากนั้นแล้วคลื่นเสียงจะมีการเปลี่ยนแปลงโมด ซึ่งจะมีทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางเกิดขึ้นในตัวกลางที่สอง (ในกรณีที่เป็นของเหลวจะไม่มีคลื่นตามขวางเกิดขึ้น) และในกรณีที่คลื่นตกกระทบ

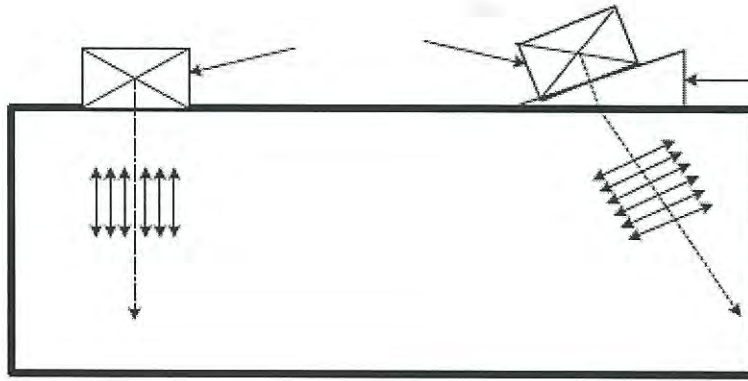
ตกกระทบเป็นมุมที่ทำให้คลื่นตามขวางขนานไปกับผิวระหว่างตัวกลาง (หรือ $\theta_2 = 90^\circ$) ก็จะทำให้เหลือเฉพาะคลื่นผิววิ่งอยู่บนผิวของวัสดุ การทำให้คลื่นเสียงเดินทางในชั้นทดสอบเปลี่ยนสภาพจากคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวางกลายเป็นคลื่นผิว จำเป็นต้องใช้วัสดุตัวกลาง เพื่อทำให้เกิดการหักเหของแนวคลื่นโดยใช้ลึ่มสามเหลี่ยมที่ทำจากเทอร์โมพลาสติกอะคริลิก (Acrylic) ดังรูปที่ 2.10 กำหนดให้มุมตกกระทบ (Incident Angle) ของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านลึ่มสามเหลี่ยมให้มีขนาดเท่ากับมุมวิกฤตที่สอง (Second Critical Angle) ทำให้เกิดคลื่นตามขวางที่ผิวชั้นทดสอบ ส่วนคลื่นตามยาวจะถูกสะท้อนกลับเข้าไปในหัวตรวจสอบและถูกดูดกลืนโดยแท่งแดมป์ (Damping Blocks) ซึ่งมีหน้าที่ทำให้ผลึกหยุดสั่นเร็วที่สุด



ลึ่มสามเหลี่ยมที่จัดทำใหม่เอียงเป็นมุม 54° การส่งคลื่นจากหัวตรวจสอบเปลี่ยนจากหัวตรวจสอบชนิดสัมผัสลำเสียงมาก เป็นการใช้อหัวตรวจสอบชนิดสองหัว โดยหัวรับและหัวส่งแยกออกจากกัน คลื่นเสียงจะถูกส่งผ่านเข้าไปในชั้นทดสอบ เป็นผลทำให้เกิดคลื่นผิวที่ชั้นทดสอบ

2.1.5 การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก

การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกคือการส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงผ่านตัวกลางแล้วทำการวิเคราะห์ความเร็วสัญญาณการเดินทางคลื่นเสียงโดยวิธีแรกใช้เทคนิคการสะท้อนกลับสัญญาณพัลส์ (Pulse Echo Method) วิธีที่สองคือเทคนิคการส่งผ่านโดยใช้คลื่นผิว (Through Transmission Method)

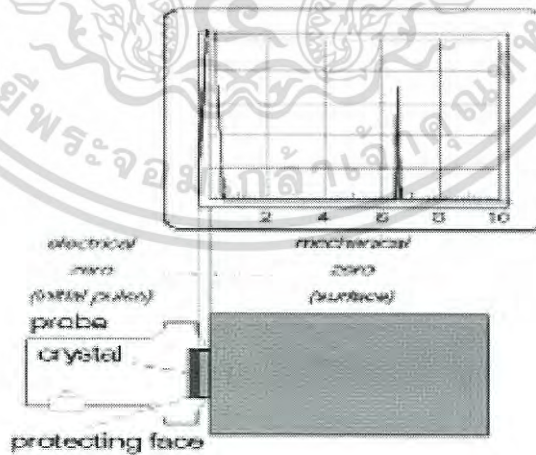


ภาพที่ 2.11 การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 27

2.1.6 วิธีการสะท้อนกลับสัญญาณพัลส์ (Pulse Echo Method)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน การตรวจสอบวัสดุตัวส่งและตัวรับคลื่นเสียงของหัวตรวจสอบจะอยู่ด้านเดียวกันของชิ้นงานที่จะตรวจสอบ สัญญาณพัลส์ช่วงสั้นๆจะถูกส่งเข้าไปในเนื้อวัสดุ การปรากฏสิ่งบกพร่องจะถูกบ่งชี้โดยการรับสัญญาณสะท้อนที่เกิดขึ้นก่อนสัญญาณสะท้อนจากผนังด้านล่าง จากขนาดของคลื่นสะท้อนนี้ทำให้ประมาณสิ่งบกพร่องได้ และจากระยะเวลาตั้งแต่คลื่นถูกปล่อยออกไปจนกระทั่งสะท้อนกลับสามารถคำนวณหาความลึกของสิ่งบกพร่องได้ ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 เทคนิคการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 28

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Technical Committee CEN/TC 256 "Railway applications" [5] เป็นเอกสารที่นำเสนอมาตรฐานการตรวจรางรถไฟของทวีปยุโรปในส่วนต่างๆ ด้วยมาตรฐาน EN 13674 European Standard ซึ่งจะมีการตรวจสอบหลักๆด้วยกัน 2 แบบคือ การตรวจสอบคุณสมบัติ และการตรวจสอบที่ยอมรับได้ โดยมีการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยการทำรอยบกพร่องเทียมขึ้นมาตามมาตรฐาน เป็นการเจาะรูกับชิ้นงานที่เป็นรางรถไฟด้วยหัวเจาะขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการตรวจสอบหารอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) ดูประสิทธิภาพในการของเครื่องที่ใช้ว่าหาตำแหน่งของรอยบกพร่องเทียมได้ถูกต้องหรือไม่



บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

โครงการที่ 1 มีการดำเนินแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ 1) การสร้างแท่งมาตรฐานจากรางรถไฟเพื่อใช้สอบเทียบกับเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 2) การสร้างชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องเทียมขึ้นจากรางรถไฟเช่นกัน 3) การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงซึ่งรายละเอียดและวิธีดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

3.1 การสร้างแท่งมาตรฐานจากรางรถไฟ

การสร้างแท่งมาตรฐานนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือก่อนที่จะนำไปใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานจริง ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการสร้างแท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบจากรางรถไฟโดยทำการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- ขั้นแรกเริ่มจากการตัดรางรถไฟบริเวณส่วนหัวของราง (Head rail) มาสร้างเป็นแท่งมาตรฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่ทำการตัดได้ง่ายและส่วนนิยมนำส่วนหัวรางมาทำการทดสอบ เช่น การทดสอบหาค่าความแข็งของราง

- ขั้นตอนต่อมาเมื่อได้แท่งมาตรฐานที่ทำจากรางรถไฟแล้วออกมา จากนั้นทำการเจียรผิวชิ้นงานเนื่องจากการสอบเทียบจำเป็นต้องใช้ผิวสัมผัสของรางจริงไม่ผ่านสนิมหรือสิ่งแปลกปลอมใดๆ เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำทำให้ชิ้นงานออกมามีดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงแท่งมาตรฐานที่ทำขึ้นหลังจากการตัดและเจียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องเทียมขึ้นจากรางรถไฟ

การสร้างรอยบกพร่องเทียมขึ้นนั้นจะอ้างอิงจากแบบมาตรฐานที่ EN 13674 European Standard ใช้สำหรับสร้างรอยบกพร่องเทียมของรางรถไฟโดยเฉพาะ ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำในการตรวจสอบหลังจากสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่ทำขึ้น โดยทำการเจาะลึกลงไป 15 มิลลิเมตร มีขนาด 2 มิลลิเมตรของรูเจาะดังภาพที่ 3.2



ก) รูที่ทำการเจาะด้านบนบนหัวราง

ข) รูที่ทำการเจาะด้านบนบนหัวรางอีกด้าน



ค) รูที่ทำการเจาะด้านข้างของราง

ภาพที่ 3.2 แสดงการเจาะรูตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๒๐ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง

การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Testing) จะใช้สอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้น หลังจากนั้นจึงนำไปตรวจสอบกับรางที่สร้างรอยบกพร่องเทียมขึ้น เพื่อยืนยันว่าแท่งมาตรฐานที่นำมาสอบเทียบสามารถตรวจสอบหาตำแหน่งที่มีรอยบกพร่องได้จริง

การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูงนี้ใช้เครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 ในการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้นและตรวจสอบรอยบกพร่องเทียมของรางที่ถูกทำขึ้นตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard มีลักษณะดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แสดงเครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340

การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง มีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปล่อยและรับคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมาซึ่งถูกเรียกว่า หัวตรวจสอบ (Probe) ซึ่งการตรวจสอบจะใช้หัวตรวจสอบทำมุม 45 องศา มีความถี่ 2 แบบคือความถี่ขนาด 2 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ใช้ตรวจสอบในระยะใกล้และความถี่ขนาด 4 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ใช้ตรวจสอบในระยะใกล้เนื่องจากความถี่คลื่นขนาด 4 เมกะเฮิร์ตซ์ จะสามารถค้นหาสัญญาณได้ดีแต่ความถี่ขนาด 2 เมกะเฮิร์ตซ์สามารถส่งเป็นระยะไกลได้ดีกว่าจึงมีการเปลี่ยนหัวตรวจสอบระหว่างการทดลอง ลักษณะหัวตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงลักษณะและขนาดของหัวตรวจสอบที่ใช้ในการทดลอง

ก่อนทำการสอบเทียบหรือการตรวจสอบรอยบกพร่อง คลื่นเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจากหัวตรวจสอบไม่เคลื่อนที่ผ่านอากาศเข้าไปในชิ้นงานได้ คลื่นเสียงนั้นจำเป็นต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวก่อนผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่ต้องการทำการตรวจสอบ โดยการทดลองจะใช้ Ultrasonic Couplant ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับส่งผ่านคลื่นเสียงเข้าไปในชิ้นงานโดยเฉพาะมีลักษณะดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะของ Ultrasonic Couplant

การตรวจสอบจะเริ่มจากการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่ทำขึ้นจากรางรถไฟ ซึ่งจะต้องค้นหาความเร็วคลื่นเสียงที่ปล่อยเข้าไปในชิ้นงานและปรับให้เครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 ที่แสดงเป็นสัญญาณบนหน้าจอของเครื่อง โดยหาขนาดของความหนาที่ถูกต้องจากแท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการตรวจสอบ แล้วจึงไปตรวจสอบกับชิ้นงานที่ผ่านการสร้างรอยบกพร่องเทียมตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงการตรวจสอบกับรางที่ผ่านการสร้างรอยบกพร่องเทียมตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การศึกษาการตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูง เป็นการทดลองและเก็บผลจากการดำเนินการจริงทำให้ทราบข้อมูลและปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งอาจจะสมบูรณ์หรือไม่ เนื่องจากรูปแบบการปฏิบัติงานและเทคนิคของผู้ทำการทดลอง โดยค่าที่ได้อาจจะตรงหรือคาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือแสดงให้เห็นว่าแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นสามารถนำไปตรวจสอบได้จริง ดังต่อไปนี้

4.1 ผลจากการสอบเทียบกับของหัวตรวจสอบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้น

การสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานต้องหาความเร็วคลื่นเสียงที่ใช้ในการส่งผ่าน โดยต้องได้ค่าความหนาของแท่งมาตรฐานที่ถูกต้องโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านคลื่นความถี่สูงของเครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 ปล่อยคลื่นออกมาจากหัวตรวจสอบโดยสังเกตจาสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอที่เป็นคลื่นสะท้อน (Back Wall Echo) เปรียบเทียบกับค่าความหนาจริงที่วัดได้จากเวอร์เนียดิจิตอล เพื่อสอบเทียบและเซตค่ากับเครื่องมือให้ได้ค่าความหนาและความเร็วของคลื่นเสียงของชิ้นงานที่ถูกต้องโดยอาศัยจากการเคลื่อนที่ไปมาของหัวตรวจสอบ ซึ่งได้ค่าออกมาดังนี้

ความหนาของชิ้นงาน 28.55 มิลลิเมตร

ค่าความเร็วคลื่นเสียงของชิ้นงาน 3012 เมตรต่อวินาที

วิธีการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่าความหนาและค่าความเร็วคลื่นเสียงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงการสอบเทียบเพื่อหาความเร็วเสียงและความหนาจริงของแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 นำหัวตรวจสอบที่ทำการสอบเทียบมาตรฐานหาค่าตำแหน่งรอยบกพร่อง

หลังจากทำการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้น ได้ค่าความเร็วคลื่นเสียงที่ปล่อยออกมาจากหัวตรวจสอบเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นงานแท่งมาตรฐานที่สร้างจากราง ขั้นตอนถัดมาคือการหารอยบกพร่องเทียมที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน EN 13476 European Standard เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจากการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่สร้างขึ้น ผลลัพธ์จะปรากฏบนหน้าจอของเครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 ออกมาในรูปแบบของคลื่น โดยจะทราบว่าพบรอยบกพร่องในชิ้นก็ต่อเมื่อค่าแอมพลิจูด (Amplitude) แสดงบนหน้าจอของเครื่องเคลื่อนที่ไปสูงที่สุด (Peak) จะแสดงถึงการพบรอยบกพร่องของคลื่นเสียงบางส่วนที่สะท้อนกลับมาเร็วกว่าส่วนอื่นที่เคลื่อนที่ผ่านไป จึงทำให้เห็นสัญญาณที่กลับก่อนได้เด่นขึ้นมาบนหน้าจอจากนั้นก็ทำการเลื่อนเกจที่ทำหน้าที่อ่านค่าตำแหน่งไปสัมผัสกับแอมพลิจูดที่สูงที่สุดแล้วเก็บบันทึกค่าที่ได้ออกมา ซึ่งเป็นตำแหน่งของรอยบกพร่องที่ทำการวัดค่ามีผลการทดลองออกมาแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของรอยบกพร่องเทียมเปรียบเทียบกับระยะจริง

ระยะความลึกที่เจาะจริง (มิลลิเมตร)	ระยะความลึกที่อ่านได้ (มิลลิเมตร)
14.00	12.30
14.00 (ผีงตรงข้าม)	13.68
30.00	24.27
30.00 (ผีงตรงข้าม)	24.06
65.00	65.03
75.00	75.99
85.00	83.59
95.00	95.75
105.00	103.41

จากผลการทดลองที่ได้ทำให้ทราบว่าแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น สามารถค้นหาตำแหน่งรอยบกพร่องที่สร้างขึ้นหรือเรียกว่า รอยบกพร่องเทียมได้ในระยะที่ใกล้เคียงกับระยะที่สร้างขึ้นจากการเจาะจริง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 % เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างค่าระยะที่ได้ผลลัพธ์จากเครื่อง Ultrasonic Flaw Detector Masterscan 340 กับค่าระยะที่ทำการเจาะจริง ซึ่งระยะที่ได้จากเครื่องบริเวณหัวรางมีค่าคลาดเคลื่อนมากเนื่องจากบริเวณที่ทำการตรวจสอบเป็นส่วนโค้งของหัวรางจึงทำให้ระยะที่บันทึกผลจากเครื่องลดลงมาจากความเป็นจริงที่ควรจะเป็น โดยผลลัพธ์จากตารางที่ 4.1 การสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานที่ทำจากรางรถไฟนำไปตรวจสอบหารอยบกพร่องของรางเหมือนกันได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ทำให้ทราบว่าค่าความเร็วคลื่นเสียงที่ได้จากการสอบเทียบกับแท่งมาตรฐานนั้นใกล้เคียงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงของวัตถุจะทำให้ตรวจพบรอยบกพร่องในตำแหน่งที่ถูกต้องมากกว่า ซึ่งหากเปรียบเทียบกับแท่งมาตรฐานสำหรับสอบเทียบโดยทั่วไปคือ แท่ง V1 และ V2 จะอ่านค่าได้แม่นยำกว่าเนื่องจากเหล็กที่ใช้สร้างแท่งมาตรฐานและสร้างรางรถไฟเป็นเหล็กคนละชนิดกัน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองศึกษาในการตรวจสอบหารอยบกพร่อง โดยใช้คลื่นความถี่สูงในการตรวจสอบและทำการสอบเทียบกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่ทำขึ้นจากรางรถไฟ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาจุดบกพร่องบนรางรถไฟ สามารถอธิบายเป็นแนวทางได้ดังต่อไปนี้

- ค่าความเร็วเสียงที่ได้จากการสอบเทียบกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานที่ทำขึ้นนั้น แตกต่างจากค่าความเร็วเสียงในวัสดุที่เป็นเหล็กโดยทั่วไป แสดงถึงชนิดของเหล็กที่ไม่เหมือนกันทำให้การอ่านค่านั้นแม่นยำกว่า

- การตรวจหาตำแหน่งรอยบกพร่องเทียบที่ทำขึ้นบนรางชนิดเดียวกับแท่งสอบเทียบมาตรฐานนั้น สามารถหาตำแหน่งของรอยบกพร่องได้ ซึ่งสังเกตจากหน้าจอของเครื่องปรากฏออกมาตรงตามระยะที่เจาะรู โดยยิ่งตรวจสอบระยะลึกลงไปจะต้องมีการปรับเพิ่มขนาดของคลื่นที่ปรากฏเพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า แล้วจึงหารอยบกพร่องบนรางรถไฟของจริงที่ไม่ผ่านการตรวจสอบได้

- การหาตำแหน่งรอยบกพร่องจำเป็นต้องมีการสลับหัวตรวจสอบ โดยหัวตรวจสอบขนาด 4 MHz ใช้ตรวจสอบในระยะใกล้ ส่วนหัวตรวจสอบขนาด 2 MHz ใช้ตรวจสอบระยะไกลในรางรถไฟ

- การหาตำแหน่งรอยบกพร่องด้วยคลื่นความถี่สูงมีข้อจำกัดอยู่เช่นกัน โดยบริเวณที่ใกล้กับหัวตรวจสอบนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า Dead Zone แล้วในการตรวจสอบยังมีระยะความลึกในการตรวจสอบมากสัญญาณของคลื่นที่ถูกส่งออกไปก็จะสูญหายไปในช่วงของระยะที่ทำการตรวจสอบด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยทดลองที่ผ่านมาพบว่ามี การปรับปรุงพัฒนาการศึกษาการตรวจสอบรอยบกพร่องให้ดียิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการแนะนำองค์ประกอบที่ส่งผลต่อผลการทดลองดังต่อไปนี้

- คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบควรปราศจากสิ่งมลทินหรือสิ่งสกปรกที่ปกคลุมผิวก่อนทำการทดลอง ซึ่งความเรียบของผิวชิ้นงานนั้นส่งผลต่อการค่าการเดินทางของคลื่นเสียงด้วย

- เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองควรมีประสิทธิภาพ และการตอบสนองที่ดีซึ่งจะส่งผลต่อการอ่านค่าอาจมีความคลาดเคลื่อน

- การออกแบบแท่งสอบเทียบมาตรฐานควรมีขนาดเล็ก เพื่อเหมาะกับการพกพานำไปใช้หน้างานจริง

- การวิเคราะห์รอยบกพร่องผู้ทำการทดสอบควรมีความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างสูง เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ปรากฏว่าใช่รอยบกพร่องหรือไม่ และเป็นรอยบกพร่องชนิดใด

โครงการที่ 2 การประเมินความเค้นตึงจากการเชื่อมในรางรถไฟ



แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาหาความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อม จะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีพื้นฐานวัสดุภายใต้กระบวนการทางกล และกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาคของชิ้นงาน โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการทางกายภาพที่สอดคล้องต่อการประเมินค่าความเค้นตกค้าง โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ความหมายของความเค้นตกค้าง (Residual Stress)
- การประเมินความเค้นตกค้างโดยใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge)
- การประเมินความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction)

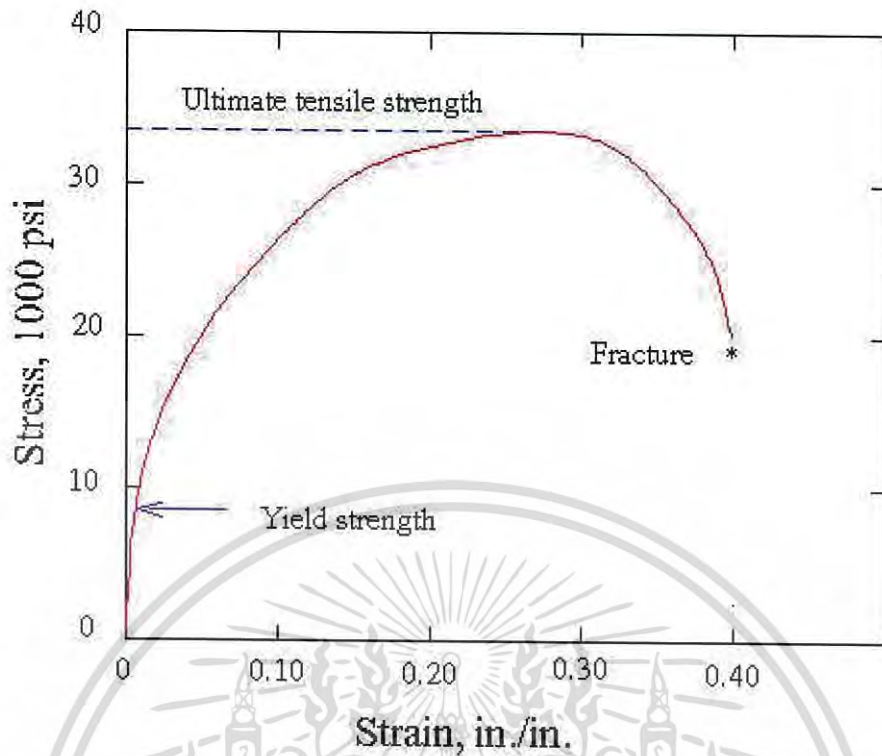
6.1.1 ความหมายของความเค้นตกค้าง

การวัดค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ปัจจุบันวิธีที่จะหาค่าความเค้นตกค้างโดยตรงยังมีอยู่ไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะประเมินความเค้นจากกฎของฮุกส์ (Hook Law) ซึ่งแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดและพิจารณาว่าอยู่ในขอบเขตและพิจารณาว่าอยู่ในขอบเขตของความยืดหยุ่นหรือไม่ ผลจากการวัดความเครียดจะเปลี่ยนเป็นตัวเลขกลับค่าเป็นความเค้นได้ ซึ่งการเกิดความเค้นโดยทั่วไปจะเกิดจากแนวทางหลัก ซึ่งอธิบายได้คือ "แรงเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด" ดังสมการ

$$\sigma = E\varepsilon$$

สมการที่ 6.1

- เมื่อ E = โมดูลัสยืดหยุ่น หน่วยเป็น เมกะพาสคาล (MPa)
 σ = ความเค้น หน่วยเป็น เมกะพาสคาล (MPa)
 ε = ความเครียด



ภาพที่ 6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 6

6.1.2 การประเมินความเค้นตกค้างโดยใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจ(Strain Gage) [3],[4] เป็นตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน (Passive Transducer) ที่ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด เพื่อการตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวางเช่น การวัดน้ำหนัก, ความดัน, แรงเชิงกลหรือการเคลื่อนที่ (Displacement) สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบยึดติด (Bonded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gage) ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นลวดเล็กๆขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียดเมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออกความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R คือความต้านทานของสเตรนเกจ

หน่วย โอห์ม (Ω)

ρ คือค่าความต้านทานคงที่ของตัวโลหะ

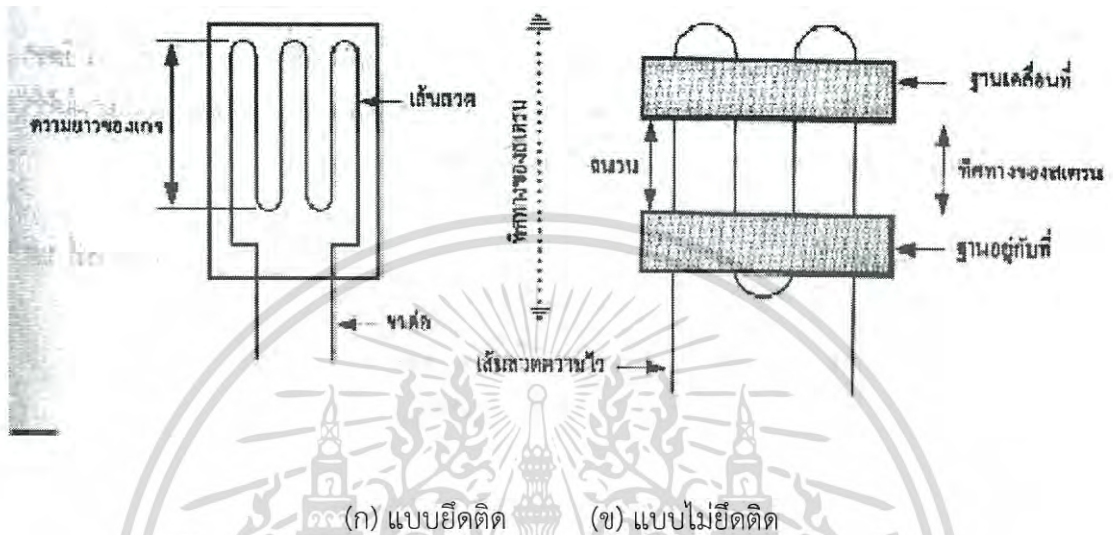
หน่วย โอห์ม เมตร ($\Omega\cdot m$)

L คือความยาวของเส้นลวด

หน่วย เมตร (m)

A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

หน่วย ตารางเมตร (m^2)



ภาพที่ 6.2 สเตรนเกจ (Strain Gage)

ที่มา : Pornpana Suklaead. 2001. สเตรนเกจ. (ออนไลน์).

แหล่งที่มา: <https://www.scribd.com/doc/23424357/สเตรนเกจ>, 28 พฤศจิกายน 2559.

ในรูปที่1(ก)จะแสดงโครงสร้างของสเตรนเกจแบบยึดติดที่ทำมาจากเส้นลวดเล็กๆขดไปขดมาหลายครั้ง และยึดติดตั้งไว้บนแผ่นกระดาษหรือพลาสติกบางๆโดยทั่วไปเส้นลวดนี้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.001 นิ้วและมีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม สำหรับโครงสร้างของ สเตรนเกจแบบไม่ยึดติด (Unbounded Strain Gage) จะทำจากเส้นลวดเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับฐานที่อยู่กับที่ (Fixed Base) และฐานที่เคลื่อนที่ (Movable) ได้ดังแสดงในรูปที่1(ข)

การใช้สเตรนเกจในการตรวจวัดความเครียดวัตถุนั้น เราจะพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพสองสิ่งคือ ค่าความต้านทานของเกจ (Gage Resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่า “ เกจแฟกเตอร์ ” (Gage Factor) ดังสมการทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

สมการที่ 6.3

เมื่อ	K คือ เกจแฟรคเตอร์	
	R คือ ความต้านทานเริ่มต้น	หน่วย โอห์ม (Ω)
	ΔR คือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง	หน่วย โอห์ม (Ω)
	L คือความยาวเริ่มต้น	หน่วย เมตร (m)
	ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนแปลง	หน่วย เมตร (m)

ในเทอมของ $\Delta L/L$ เราสามารถกำหนดเป็นหน่วยของความเครียด (Unit Strain) ใช้อักษรแทนด้วย G ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการได้ใหม่คือ

$$K = \frac{\Delta R/R}{G} \quad \text{สมการที่ 6.4}$$

จากการค้นพบของฮุค (Hooke) เกี่ยวกับวัตถุหลาย ๆ ชนิดที่ขนาดจำกัด ซึ่งจะมีอัตราส่วนคงที่ระหว่างความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) อยู่ความเค้น (Stress) จะนิยามได้ว่า เป็นแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ค่าคงที่สมการของความเค้นคือ

$$S = \frac{F}{A} \quad \text{สมการที่ 6.5}$$

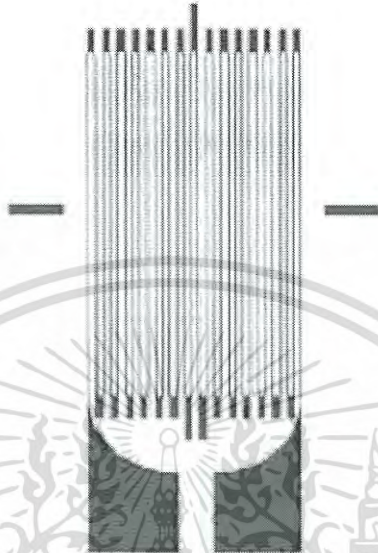
เมื่อ	S คือ ความเค้น	หน่วย เมกะพาสคาล (MPa)
	F คือ แรง	หน่วย นิวตัน (N)
	A คือ พื้นที่	หน่วย ตารางเมตร (m^2)

ค่าคงที่ของสัดส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดตามกฎของฮุค (Hooke's law) นี้เรียกว่า “ ดัชนีการยืดหดตัวของวัตถุ ” (Modulus of Elasticity of The Material) หรืออาจจะเรียกว่า “ ยังโมดูลัส ” (Young's Modulus) ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 6.1

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{สมการที่ 6.1}$$

สเตรนเกจจะแบ่งประเภทตามวัสดุที่นำมาใช้ทำได้เป็น 2 ชนิดคือสเตรนเกจชนิดโลหะ (Metallic Strain Gage)และสเตรนเกจชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Strain Gages)

สเตรนเกจชนิดโลหะทำมาจากวัสดุที่เป็นเส้นลวดความต้านทานบาง ๆ ขนาดเล็กมาก หรือทำมาจากฟอยล์โลหะ (Metal Foil) บาง ๆ มาตัดเป็นรูปซิกแซกคล้าย ๆ กับเส้นลวดของสเตรนเกจดังแสดงลักษณะของฟอยล์ในรูปที่ 6.3 สเตรนเกจชนิดนี้สามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงได้



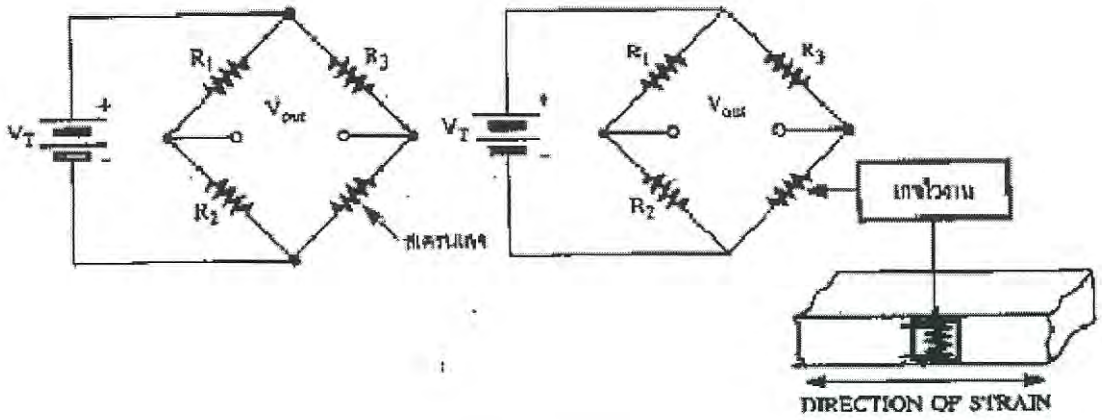
ภาพที่ 6.3 สเตรนเกจที่ทำมาจากฟอยล์โลหะ

ที่มา : Pornpana Suklaead. 2001. สเตรนเกจ. (ออนไลน์).

แหล่งที่มา: <https://www.scribd.com/doc/23424357/สเตรนเกจ>. 28 พฤศจิกายน 2559.

สเตรนเกจชนิดสารกึ่งตัวนำทำมาจากผลึกซิลิคอนที่มีเกจแพคเกจสูงประมาณ 50 ถึง 200 สเตรนเกจชนิดนี้จะมี ความไวสูงมากคือ ประมาณ 10 เท่าของสเตรนเกจแบบเส้นลวด แต่มีความเป็นเชิงเส้นต่ำมากจะมีใช้เฉพาะงานพิเศษ

การใช้งานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความเที่ยงตรงในการวัดความยืดหรือหดตัวของวัตถุได้เป็นอย่างดี เช่น การวัดความเครียดในคานเสาของงานทางด้านโยธา โดยเราจะนำเอาสเตรนเกจไปแปะติดกับคานหรือเสาที่ต้องการวัด และต่องานเข้ารวมกับวงจรบริดจ์ เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในภาพที่ 6.4



(ก) วงจรบริดจที่ใช้สเตรนเกจ

(ข) ลักษณะการต่อใช้งาน

ภาพที่ 6.4 แสดงการใช้งานของสเตรนเกจ

ที่มา : Pornpana Suklaead. 2001. สเตรนเกจ. (ออนไลน์).

แหล่งที่มา: <https://www.scribd.com/doc/23424357/สเตรนเกจ>. 28 พฤศจิกายน 2559.

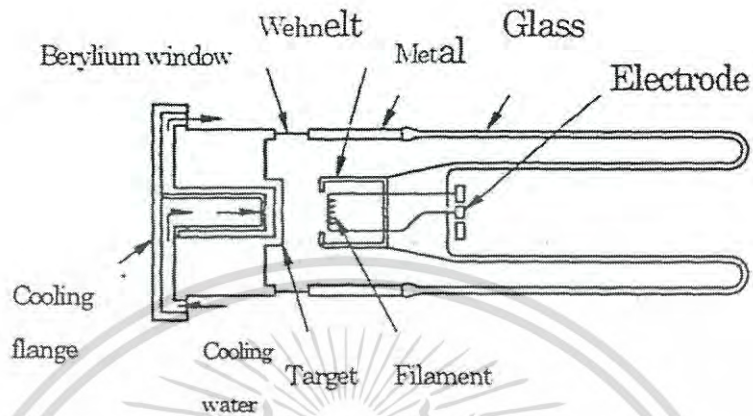
6.1.3 การประเมินความเค้นตึงด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาค และการจัดเรียงตัวของอะตอมในโลหะ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหมายถึงการจำแนกชนิดเฟส (Phase) ที่ปรากฏอยู่รวมถึงรูปร่างและขนาดของเฟสนั้น ๆ การประเมินค่าความเค้นตึงด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) เป็นการหาความเค้นที่ผิวของชิ้นงานโดยใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับระยะระหว่างระนาบแลตทิท (Lattice Planes) ของผลึกซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.25 nm เมื่อลำแสงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากหลอดเอ็กซ์เรย์ โดยฉายรังสีให้แพร่กระจายเป็นบริเวณ 1-2 มม. ลึกลงไปในผิวงาน 10-30 μm และได้ถึง 0.5 มม. ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์จะชนเข้ากับอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของผลึก แล้วทำให้รังสีเอ็กซ์นั้นเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น มีความเข้มต่าง ๆ กันและมีมุมต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกเพื่อหาความเค้นตึงได้

6.1.3.1 รังสีเอ็กซ์

เครื่องมือที่ให้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ใช้หลอดเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Tube) โครเมียม (A-40-Cr) ซึ่งให้ความยาวคลื่น 2.2897 อังสตรอม (Angstrom) ความต่างศักย์ที่ให้กับขดลวดเพื่อที่จะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์จะต้องใช้แรงเคลื่อน 30 kV กระแส 30 mA ต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบที่ทำด้วยโลหะและอยู่ในสุญญากาศ เมื่อใช้ขดลวดโครเมียมเป็นขั้วลบแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ขดลวดร้อนขึ้นอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมา และถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นด้วยการใช้ความต่างศักย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูตให้เข้าไปไซประโยชน์ดานการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างขั้วมาก ๆ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนเป้าหมาย (Target) ที่ทำด้วยโลหะต่างกันจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้นโดยพลังงาน 99 % จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งเป้าจะต้องทำให้เย็นลงโดยดลเย็นตลอดเวลา ดังภาพที่ 6.10

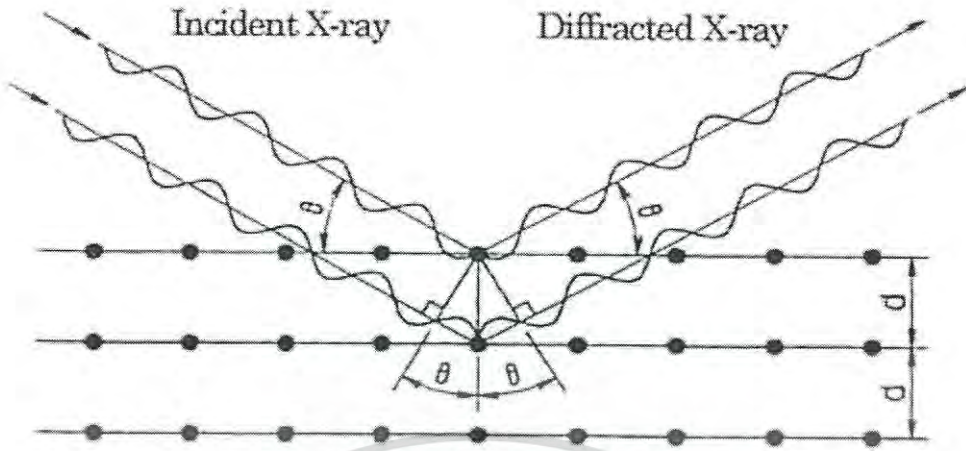


ภาพที่ 6.5 แสดงอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสี

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 36

6.1.3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

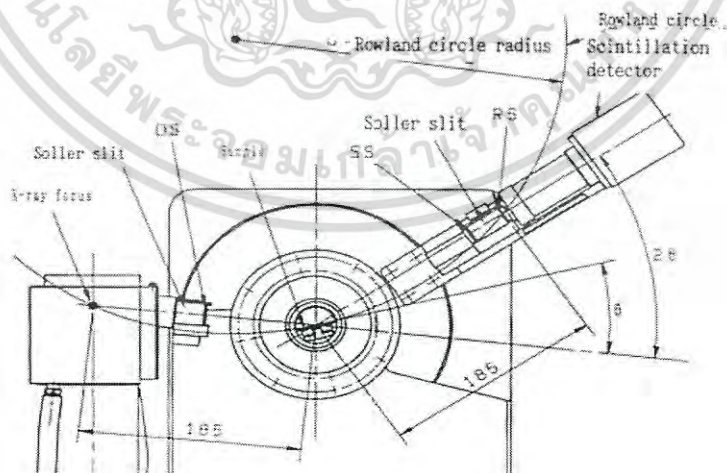
ถ้าให้ลำแสงรังสีเอ็กซ์ที่เป็นความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic) ผ่านเข้าไปกระทบกับผิวชิ้นงานโดยให้ระนาบผลึก (Crystal Planes) ที่จุดศูนย์กลางของอะตอมที่กระจายอยู่ถูกแทนที่ด้วยระนาบผลึกซึ่งเหมือนกับกระจกเพื่อสะท้อนลำแสงรังสีเอ็กซ์ ที่เข้ามากกระทบเส้นที่ขนานกันตามแนวราบนั้นแสดงถึงจุดของระนาบผลึกที่ขนานกันด้วยถ้าอะตอมมีการเรียงตัวเป็นระนาบ และแต่ละระนาบห่างกันด้วยระยะทางสม่ำเสมอเท่ากับ d_{hkl} จากรูปพบว่าอะตอมจะตั้งฉากกับหน้ากระดาษ เมื่อรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบกับผลึกที่ทำมุม θ กับพื้นผิวของผลึก ลำแสงที่สะท้อนออกมาไม่อยู่ในเฟส หรือลำแสงไม่เสริมกันแต่จะรบกวนกันและหักล้างกัน แสดงว่ารังสีเอ็กซ์จะไม่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ถ้ารังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนออกมาอยู่ในเฟส (Phase) เป็นการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) ภาพรูปที่ 6.11



ภาพที่ 6.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [1]

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 37

วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้กันทั่วไปของเทคนิคทางเอ็กซ์ดิฟแฟรคชัน คือ จะใช้หัววัด (Detector) หมุนปรับ เพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มรังสี ที่เลี้ยวเบนออกมาและมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่พลอต (Plot) ค่าความเข้มของลำแสงรังสีเอ็กซ์ ที่เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบนอ้างอิงแบบอัตโนมัติ และคำนวณผลค่าความเค้นตึงด้วยโปรแกรม ดังภาพที่ 6.12



ภาพที่ 6.7 แสดงหัววัด (Detector) หมุนปรับ เพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มรังสี [1]

ที่มา : นาย พณพล ปั้นเงิน, 2548 : 37

6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

TAKAHASHI และคณะ [6] ได้ทำการหาความเค้นตกค้างของรางรถไฟปรกติ ด้วยการวัดสามแบบแล้วเอามาเปรียบเทียบกับกันคือ การติดตั้งสเตรนเกจเป็นแนวเดียวกัน 12 เกจตั้งแต่หัวรางมาจนถึงฐานด้านล่าง วัดความเครียดออกมาจากการตัดโดยทำการตัด 3 ครั้งด้วยกันแล้วนำค่าความเครียดที่ได้มาจากทั้งแนวตามยาวของรางและแนวตัดขวางรางมาคูณด้วยค่ายังโมดูลัสซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เท่ากับ 207 GPa จึงออกมาเป็นค่าความเค้น โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลกับวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน แต่ไม่สามารถเทียบได้ทุกจุดเนื่องจากวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันนั้นไม่สามารถยิงรังสีเอ็กซ์ออกมาได้ในบริเวณด้านข้างของราง (Web) และเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ด้วยการใช้โปรแกรม ABAQUS ver. 6.6 มาวิเคราะห์



บทที่ 7

วิธีดำเนินการดำเนินการวิจัย

โครงการที่ 2 สามารถแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การหาตำแหน่งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน 2) การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดีฟรคชั่น 3) เป็นการประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีติดตั้งสเตรนเกจ ซึ่งรายละเอียดและการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

7.1 การหาตำแหน่งของผลกระทบจากความร้อน

การทดลองประเมินหาความเค้นตกค้างนี้ จะวิเคราะห์บริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟแบบแฟลชบัดด์ (Flash butt) ที่เกิดความเค้นตกค้างขึ้นเนื่องจากความร้อนในระหว่างทำการเชื่อม ซึ่งทำการประเมินจากรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมมาแล้วมีด้วยกัน 3 แบบ คือ 1) รางแข็งกับรางแข็ง 2) รางแข็งกับรางอ่อน 3) รางอ่อนกับรางอ่อน ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 แสดงรางที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานเชื่อมแบบแฟลชบัดด์ จากแรงรถไฟที่ได้มาทดลองบริเวณรอยเชื่อมจะได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone หรือ HAZ) ซึ่งบริเวณนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นผิว โดยส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าความเค้นตกค้างที่อยู่บริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลง จึงจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเพื่อหาค่าความเค้นของแต่ละตำแหน่ง โดยใช้เครื่อง NAKANISHI CMAX กับกระดาษทรายขัดชิ้นงานแล้วนำไปทดสอบด้วยกรดไนตริก 10 % ผสมกับน้ำ ในบริเวณที่ขัดด้วยกระดาษทรายซึ่งจะปรากฏตำแหน่งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนออกมาดังภาพที่ 7.2



ก) กระดาษทรายเบอร์ 80 ,120 และ240ตามลำดับ ข) เครื่อง NAKANISHI CMAX ใช้ขัดผิวชิ้นงาน.

ภาพที่ 7.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 7.3 แสดงลักษณะและขนาดของผลกระทบเนื่องจากความร้อนหลังการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วทาด้วยกรดไนตรอน 10 %

7.2 การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

การหาความเค้นที่อยู่ภายในรางด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น นั้นเป็นการยิงวัดที่จุดเล็กๆที่มีระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดกับหัวของเครื่อง XSTRESS รุ่น 3000 ซึ่งทำหน้าที่ฉายรังสีเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร โดยระยะนี้จากถูกคำนวณด้วยการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ ในการวัดแต่ละจุดต้องทำการวัดทั้ง 2 แนวแกน ได้แก่ แกนตามแนวยาวราง และ แกนตัดขวางราง

โดยเมื่อจัดวางชิ้นงานเสร็จแล้วโดยให้หัววัดที่ฉายรังสีตรงกับตำแหน่งที่ต้องการวัดแล้วเครื่องก็จะดำเนินการสอบเทียบโดยอัตโนมัติ ซึ่งทำการยิงรังสีที่ทำมุม 0 องศา, -30 องศา, -45 องศา, 30 องศาและ45องศาตามลำดับ แล้วเฉลี่ยออกมาเป็นค่าความเค้น ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดดังภาพที่

7.4



ภาพที่ 7.4 แสดงตัวอย่างการด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นจากเครื่อง XSTRESS รุ่น 3000

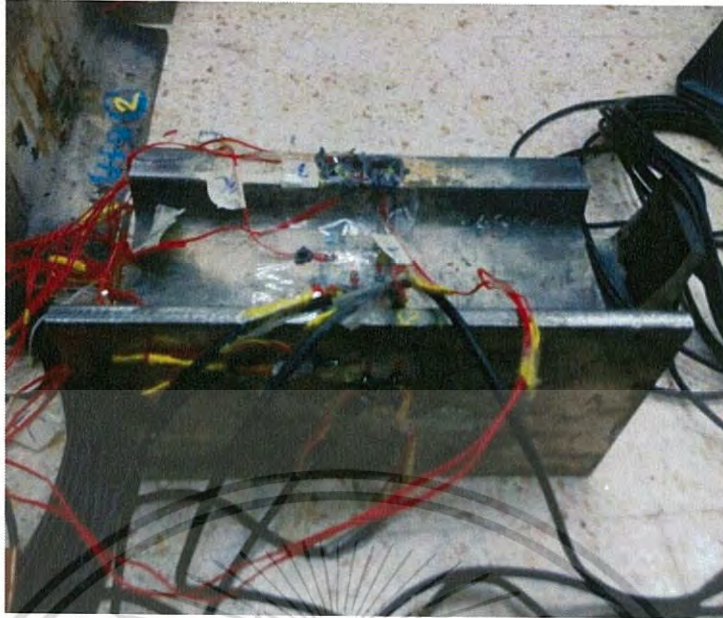
7.3 การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีติดตั้งสเตรนเกจ

การติดตั้งสเตรนเกจนั้นจำเป็นต้องให้เกจสัมผัสผิววราง จึงต้องมีการขัดผิวชิ้นงานก่อนทำการติดตั้ง โดยสเตรนเกจที่ใช้เป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ที่มีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม อ่านค่าจากการยืดหรือหดของเกจได้ทิศทางเดียวดังภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.5 แสดงชนิดของสเตรนเกจขนาด 120 Ω ที่ใช้ในการทดลอง

หลังจากติดตั้งเกจแล้วต้องทำการต่อสายไฟเข้ากับสเตรนเกจแล้วเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง Quantum X เพื่อคูล์สัญญาณที่ปรากฏออกมาจากที่คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อด้วยกัน หลังจากนั้นต้องทำการตรวจสอบสัญญาณที่ปรากฏออกมาทางจอเพื่อดูความถูกต้องในการติดตั้งแต่ละขั้นตอนก่อนจะนำไปตัดราง ตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจทั้ง 3 รางนั้นทำการติดตั้งในบริเวณที่คล้ายกับการวัดด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน แล้วในทำการติดตั้งสเตรนเกจที่บริเวณใกล้รอยเชื่อมและใกล้กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนซึ่งที่จุดหนึ่งจะติดตั้ง 2 เกจท่ามุ่มตั้งฉากกันดังภาพที่ 7.6



ภาพที่ 7.6 แสดงภาพรวมของตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจของรางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง

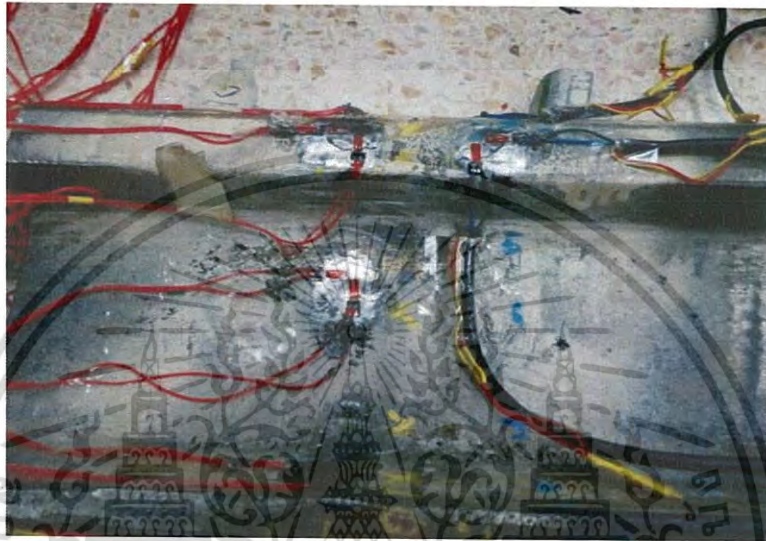
ในส่วนของการตัดจะทำการตัดที่รอยเชื่อมของรางแล้วสังเกตค่าความเครียดที่ออกมาแล้วนำไปแปลงค่าออกเป็นความเค้นที่คล้ายตัวของมาของวัสดุ ซึ่งแบ่งการตัดออกเป็น 2 ครั้ง โดยครั้งแรกตัดที่บริเวณรอยเชื่อม (Weld) แล้วเก็บผลออกมาเป็นความเครียดบริเวณรอยเชื่อม และครั้งที่สองตัดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone) แล้วเก็บผลออกมาเป็นความเครียดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนดังภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7 แสดงสภาพหลังการตัดของรางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 42 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตัดรางของชิ้นงานรางแข็งกับรางแข็งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณที่ทำการติดตั้งสเตรนเกจใกล้เบมิดมากเกินไปทำให้สเตรนเกจเสียหายไปบางส่วน จึงทำการติดตั้งใหม่โดยให้เกจนั้นสมมาตรกันเพื่อตรวจสอบค่าความเครียดทั้งด้านซ้ายและด้านขวาว่ามีแนวโน้มค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ดังภาพที่ 7.8



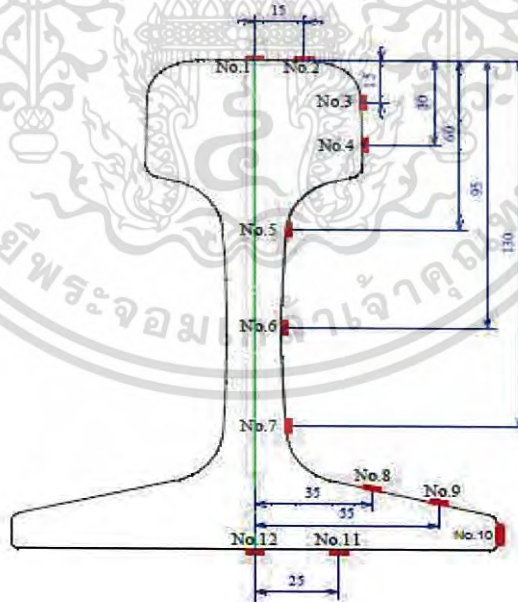
รูปที่ 7.8 แสดงภาพรวมของตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจของรางแข็งเชื่อมกับรางอ่อนและรางอ่อนเชื่อมกับรางอ่อน

บทที่ 8 ผลการวิจัย

การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น และวิธีติดตั้งสเตรนเกจ เป็นการทดลองและเก็บผลจากการดำเนินงานจริง ทำให้ทราบข้อมูลและปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะสมบูรณ์หรือไม่ เนื่องจากรูปแบบการปฏิบัติงานหรือเทคนิคการทำการทดลองทำให้ค่าที่ได้อาจจะตรงหรือคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการการวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นและวิธีติดตั้งสเตรนเกจ ดังต่อไปนี้

8.1 ผลการทดลองวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

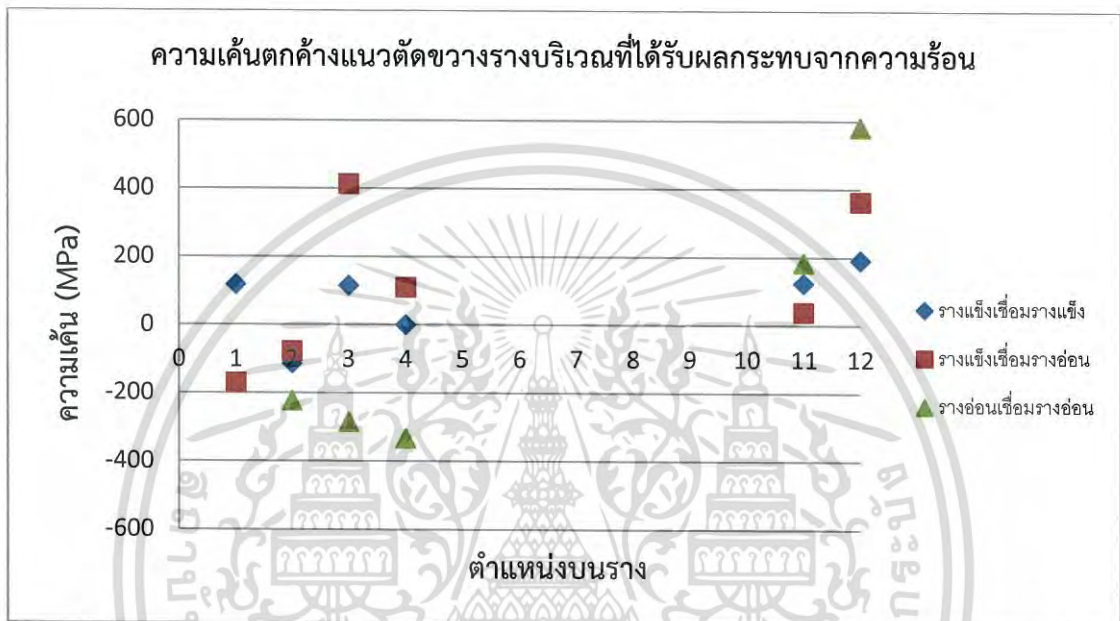
การประเมินความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น เนื่องจากชิ้นงานบริเวณที่ทำเครื่องหมายไว้บางบริเวณที่ถูกยิงด้วยรังสีจากเครื่อง XSTRESS รุ่น 3000 มีผิวที่ไม่ราบเรียบพอทำให้ผู้ทำการทดลองต้องเลื่อนจุดที่ทำการวัดค่าออกมาจากระยะเดิมตามความเหมาะสม ซึ่งอาจทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนออกมาบางจุดและ ทำการวัดในบริเวณด้านข้างของราง (web) นั้นไม่สามารถทำการ จึงแสดงตำแหน่งการวัดดังภาพที่ 8.1



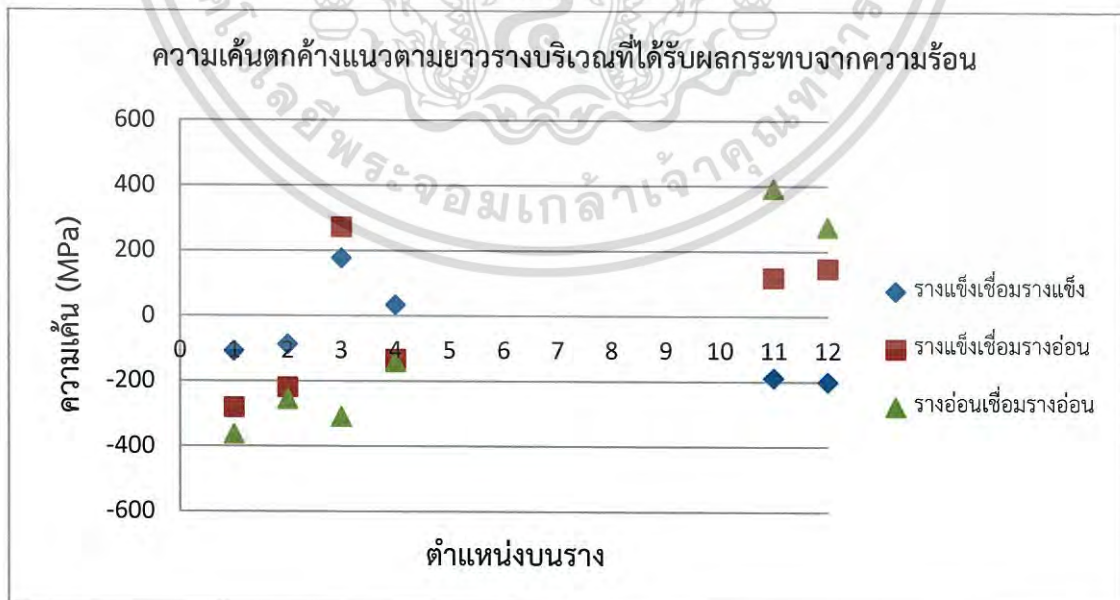
ภาพที่ 8.1 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตำแหน่งที่แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันนั้นไม่สามารถทำการวัดความเค้นตกค้างบริเวณหมายเลข 5 ถึงหมายเลข 9 เนื่องจากเครื่อง XSTRESS รุ่น 3000 หัววัดที่ทำหน้ายิงรังสีเอ็กซ์ไม่สามารถเข้าบริเวณดังกล่าวได้ แล้วยังไม่ได้วัดที่บริเวณหมายเลข 10 เนื่องจากมีพื้นที่น้อยในแนวตัดขวางจึงไม่ได้ทำการวัด ซึ่งแสดงผลค่าของความเค้นตกค้างออกมาดังภาพที่ 8.2, 8.3, 8.4 และ 8.5



ภาพที่ 8.2 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางรางบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน



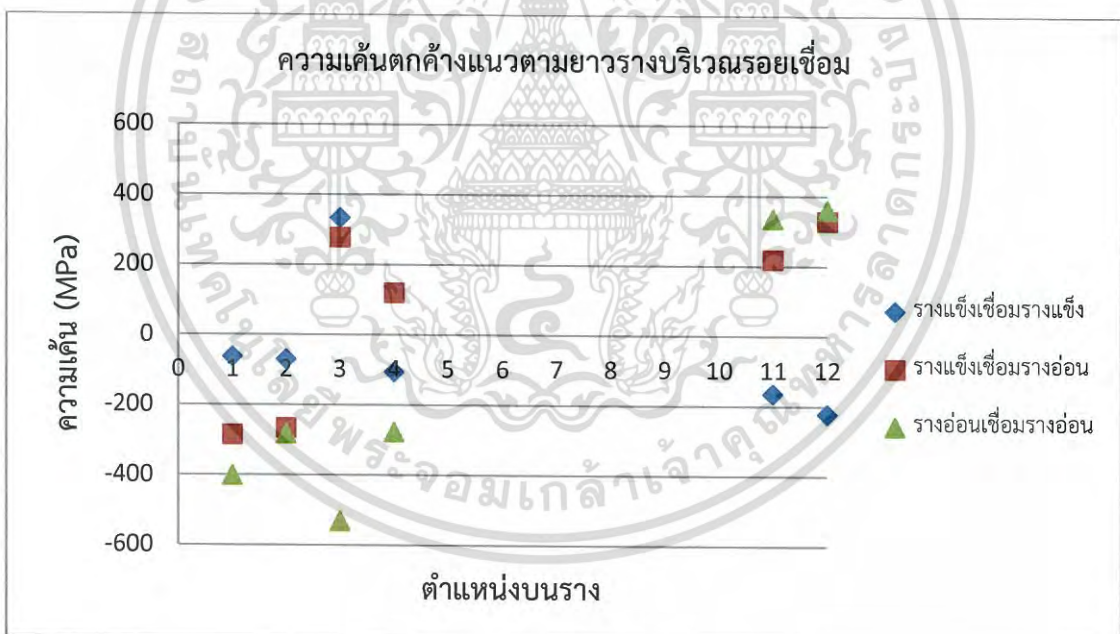
ภาพที่ 8.3 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวรางบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้วยวิธี

เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8.4 แสดงค่าความเค้นตักค้ำแนวตั้งขวางรางบริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

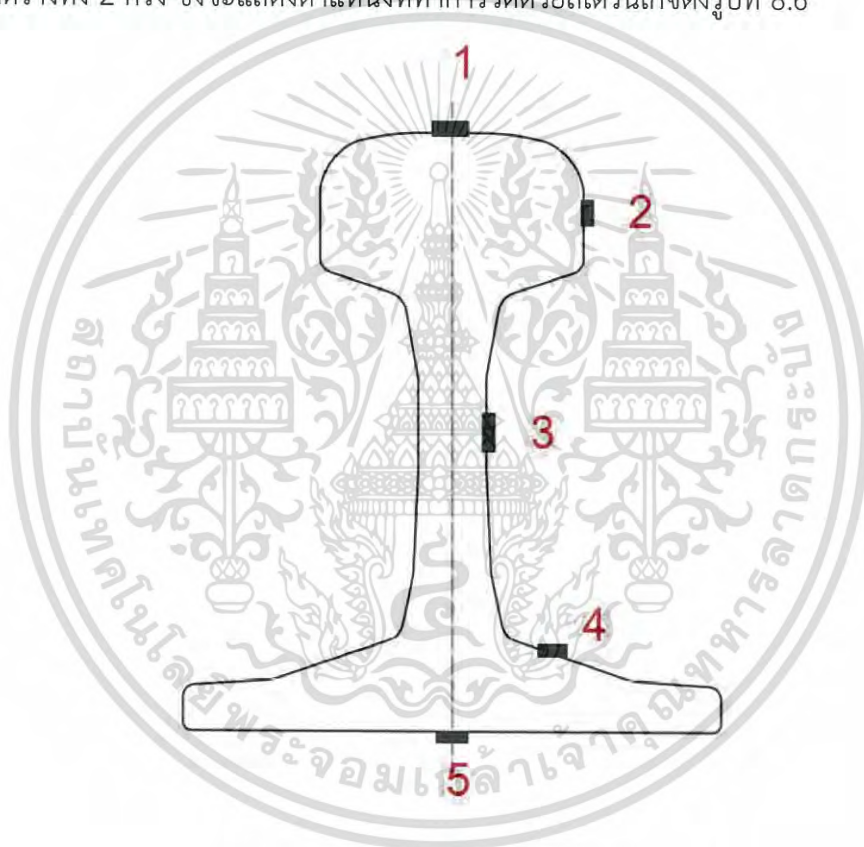


ภาพที่ 8.5 แสดงค่าความเค้นตักค้ำแนวตามยาวรางบริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น

จากผลที่ได้จากการทดลองนี้ค่าความเค้นที่ได้จากชิ้นงานรางอ่อนเชื่อมกับรางอ่อนมีความแตกต่างจากอีก 2 ชิ้นงาน ซึ่งอาจมีผลกระทบมาจากความร้อนเนื่องจากการเชื่อมรางแบบแฟรชบัดด์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ส่งผลให้ค่าความเค้นที่ได้จากทั้งบริเวณรอยเชื่อมรางและบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่เหมือนกับอีก 2 ชิ้นงาน

8.2 ผลการทดลองวิธีติดตั้งสเตรนเกจ

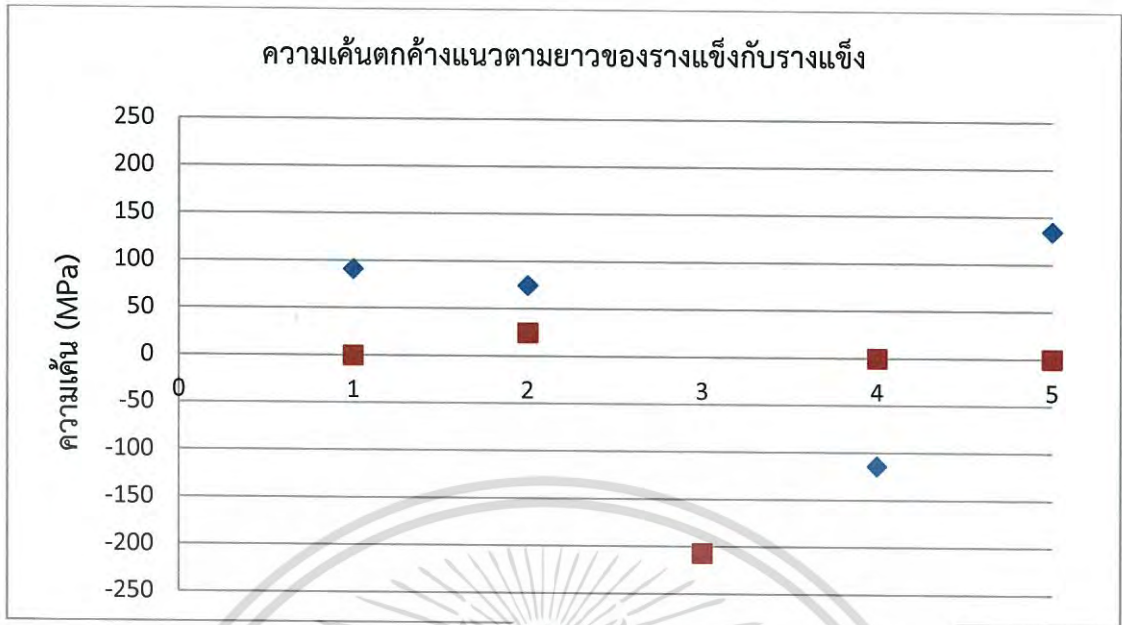
จากการทดลองในบทที่ผ่านมาการหาค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีสเตรนเกจ แบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็น 2 กรณีเนื่องจากรูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจที่ไม่เหมือนกัน โดยวัดความเค้นการตัดรางทั้ง 2 ครั้ง ซึ่งจะแสดงตำแหน่งที่ทำการวัดด้วยสเตรนเกจดังรูปที่ 8.6



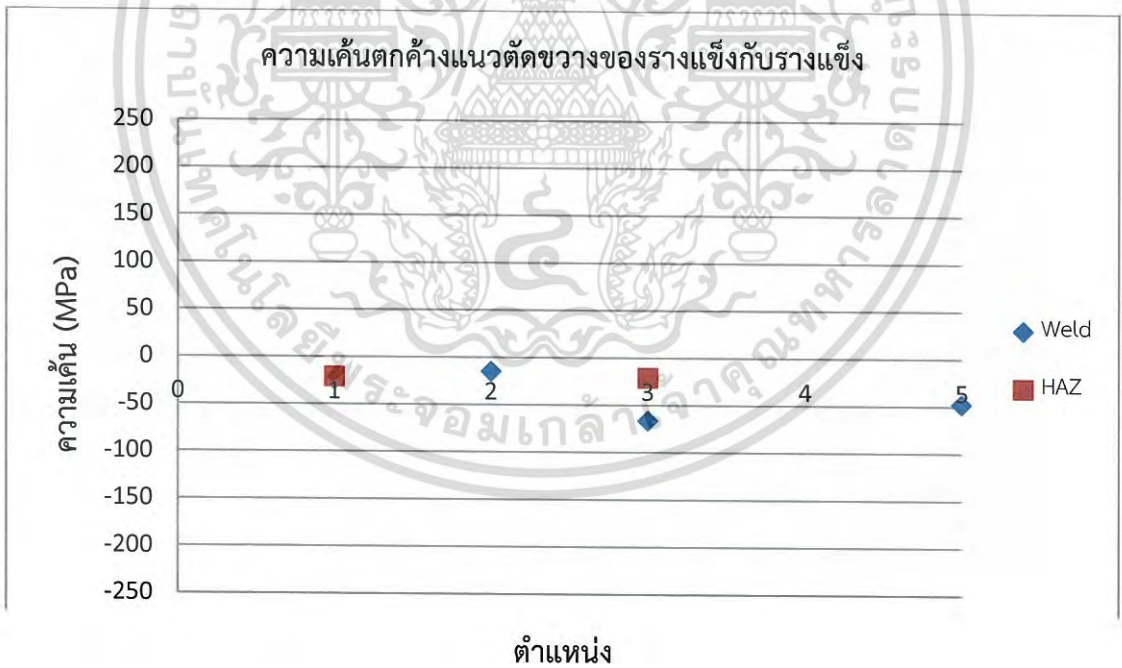
รูปที่ 8.6 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจ

8.2.1 ผลการทดลองจากรางแข็งเชื่อมกับรางแข็ง

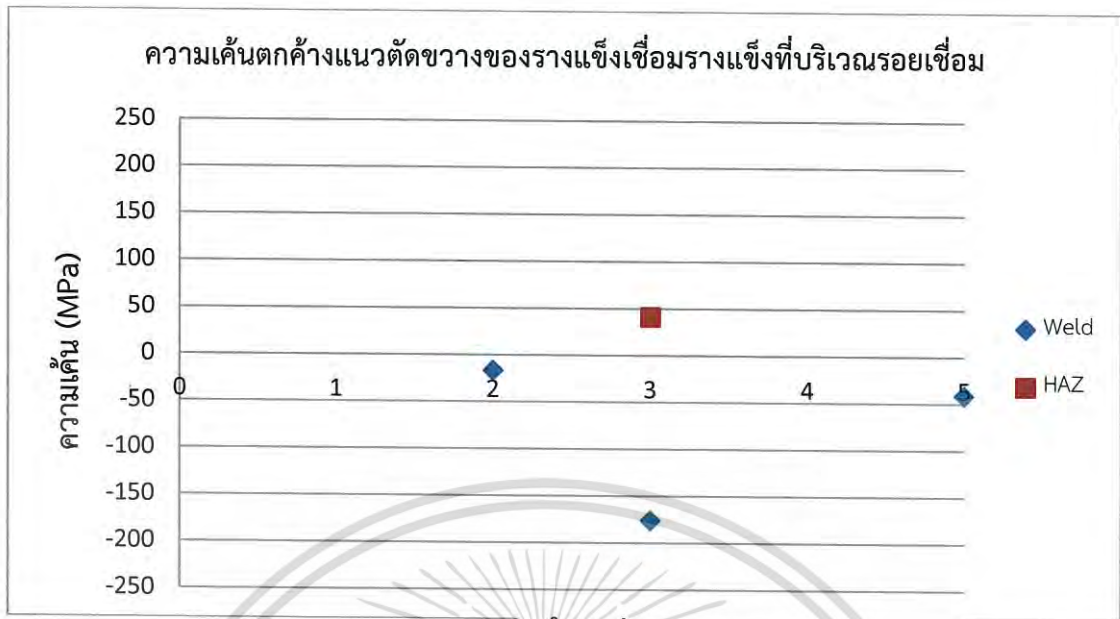
การติดตั้งสเตรนเกจในกรณีแรก ผลการทดลองของการติดตั้งสเตรนเกจจากการตัดรางครั้งแรกที่บริเวณรอยเชื่อมจะได้ค่าความเค้นที่บริเวณรอยเชื่อม จากนั้นตัดรางครั้งที่ 2 ที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนจะได้ค่าความเค้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แล้วได้ค่าดังภาพที่ 8.7, 8.8 และ 8.9



ภาพที่ 8.7 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวของรางแข่งกับรางแข่งด้วยวิธีสเตรนเกจ



ภาพที่ 8.8 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางแข่งกับรางแข่งด้วยวิธีสเตรนเกจ

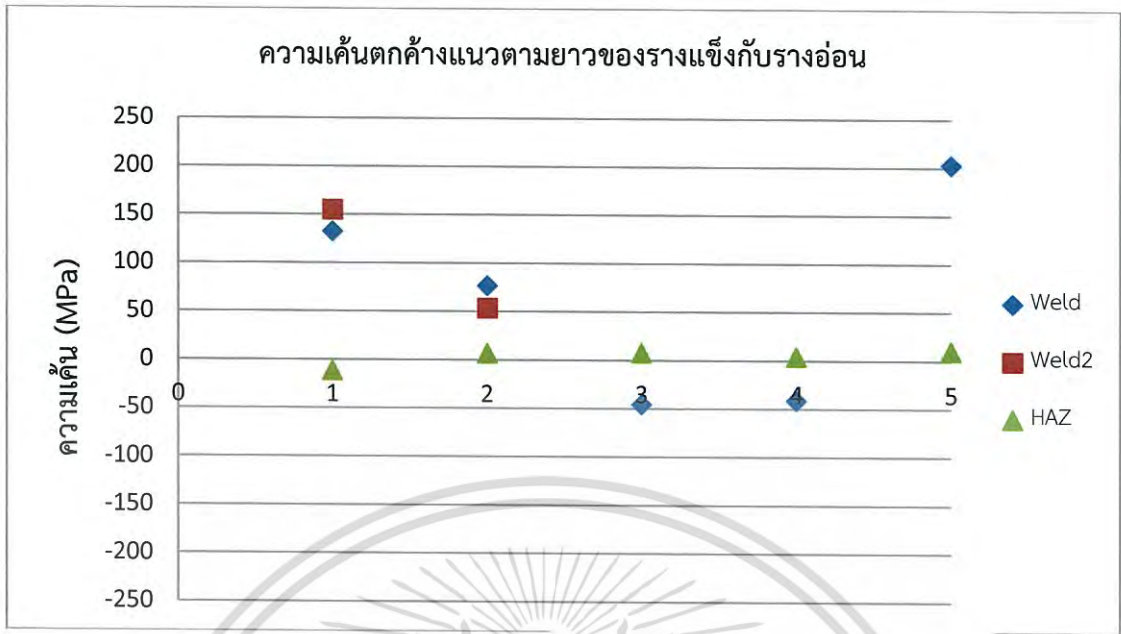


ภาพที่ 8.9 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางแข็งเชื่อมรางแข็งที่บริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธี สเตรนเกจ

จากการทดลองติดตั้งสเตรนเกจบนรางแข็งกับรางเชื่อมทำให้ทราบผลกระทบในการเก็บผลข้อมูลจากการตัดราง ซึ่งผลที่ออกมาการวัดความเค้นตกค้างในแนวตัดขวางนั้นได้ผลจากการกดของใบมีดทำให้ค่าความเค้นที่ออกมาติดลบทั้งหมด แล้วมีค่าความเค้นบางค่าที่แสดงออกมามีค่าบวกได้รับผลกระทบเนื่องจากการตัดทำให้เกจเสียหายไม่สามารถแสดงค่าออกมาได้และเนื่องจากน้ำหล่อเย็นขณะตัดรางรถไฟไปกระทบกับสเตรนเกจจึงให้ค่าออกมาคลาดเคลื่อน

8.2.2 ผลการทดลองจากรางแข็งเชื่อมกับรางอ่อน และ รางอ่อนเชื่อมกับรางอ่อน

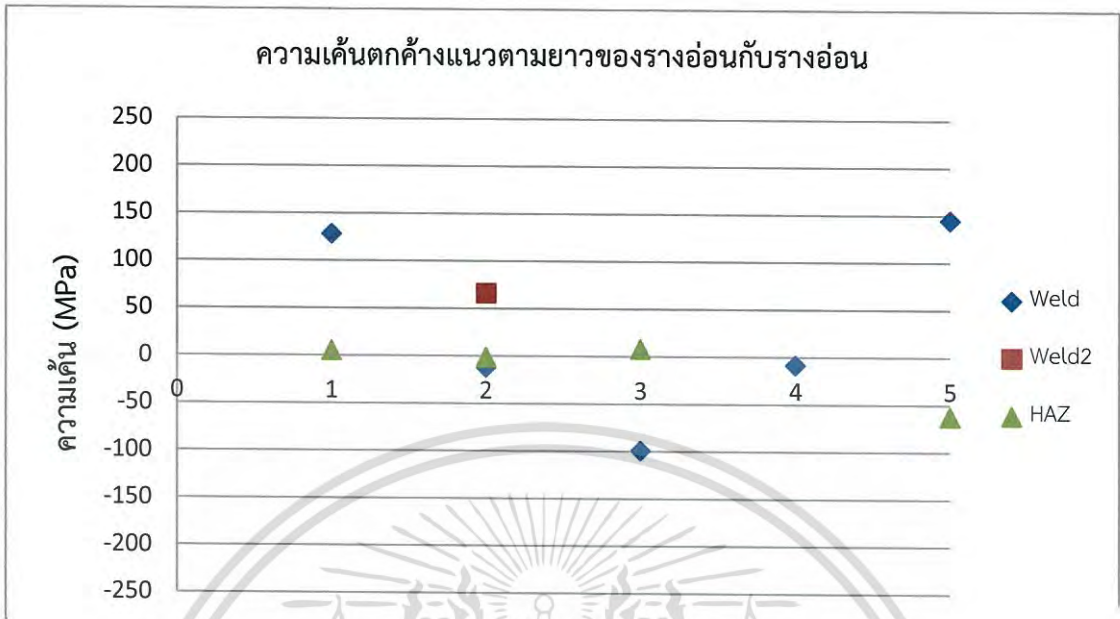
ในกรณีที่สองนั้นติดตั้งสเตรนเกจเฉพาะบริเวณที่อยู่ห่างจากบริเวณผลกระทบจากความร้อน 10 มิลลิเมตรเช่นเดิม แต่ไม่ติดตั้งใกล้กับบริเวณรอยเชื่อมแล้ว เนื่องจากผลการทดลองจากกรณีแรกนั้นทำให้ทราบว่า ถ้าติดตั้งสเตรนเกจใกล้กับที่บริเวณตัดมากเกินไปจะทำให้สเตรนเกจเกิดความเสียหายอ่านค่าออกมาคลาดเคลื่อน จึงทำการติดตั้งสเตรนเกจฝั่งตรงข้ามกันแบบอีกฝั่งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการเก็บผลการทดลอง ซึ่งจะมีค่าความเค้นตกค้างบริเวณรอยเชื่อม 2 แบบจากการตัดครั้งแรกตัดรางที่บริเวณรอยเชื่อม แต่จะไม่มีค่าความเค้นตกค้างจากการตัดครั้งที่สองตัดที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน ตามลำดับดังที่แสดงในรูปภาพที่ 8.10, 8.11, 8.12 และ 8.13



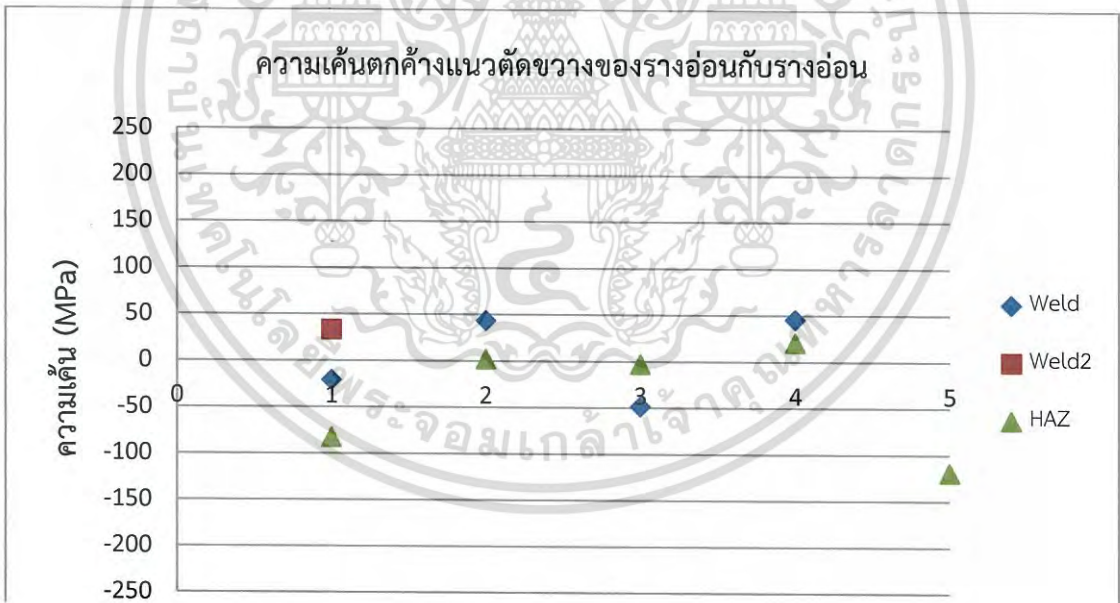
ภาพที่ 8.10 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวของรางแข่งกับรางอ่อนวิธีสเตรนเกจ



ภาพที่ 8.11 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางแข่งกับรางอ่อนด้วยวิธีสเตรนเกจ



ตำแหน่ง
ภาพที่ 8.12 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตามยาวของรางอ่อนกับรางอ่อนด้วยวิธีสเตรนเกจ



ตำแหน่ง
ภาพที่ 8.13 แสดงค่าความเค้นตกค้างแนวตัดขวางของรางอ่อนกับรางอ่อนวิธีสเตรนเกจ

จากการทดลองติดตั้งสเตรนเกจบนรางแข่งกับรางอ่อนและรางอ่อนกับรางอ่อน รวมถึงการทดลองครั้งแรกของรางแข่งกับรางแข็ง ทำให้ทราบว่าค่าความเค้นตกค้างที่มีค่ามากที่สุด อยู่ที่บริเวณฐานด้านรางของรางเนื่องจากผลกระทบจากความร้อนในระหว่างการเชื่อม และส่วนที่เป็นฐานนั้นต้องทำหน้าที่รับแรงจึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ความเค้นตกค้างมีค่ามากในบริเวณนี้ แล้วจากการทดลองของรางแข่งกับรางอ่อนและรางอ่อนกับรางอ่อน สามารถยืนยันได้ว่าค่าความเค้นตกค้างจากการตัดครั้งที่ 2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนนั้นมีค่าน้อยเหมือนกัน อันมีผลมาจากการตัดครั้งแรกได้ปลดปล่อยความเค้นออกไปแล้วบางส่วนทำให้ค่าความเค้นที่ออกมามีน้อย ในส่วนของแนวตัดขวางของรางค่าความเค้นตกค้างที่ได้ออกมานั้นมีผลจากการกดของใบมีดเช่นเดิม



บทที่ 9

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองในการประเมินความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน และการติดตั้งสเตรนเกจบนรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมแบบแฟลชบัดด์ทั้ง 3 แบบ สามารถอธิบายแนวทางได้ดังต่อไปนี้

- การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีติดตั้งสเตรนเกจค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองแรกทำให้ทราบว่าจะระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการตัดตรงกับบริเวณที่ทำการติดตั้งสเตรนเกจ มีผลต่อค่าความเครียดที่ได้ตั้งนั้นการทดลองหลังจากนั้นจึงปรับมาเป็นแบบสมมาตรที่บริเวณรอยตัดดังกล่าวที่ 7.8

- การประเมินค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีติดตั้งสเตรนเกจค่าความเค้นที่ได้มีความคลาดเคลื่อน จากการสูญเสียไปในช่วงการขัดชิ้นงานบริเวณที่ทำการติดตั้งสเตรนเกจ แล้วการตัดรางในครั้งที่ 2 ของทุกการทดลองในบริเวณที่มีผลกระทบเนื่องจากความร้อนได้ค่าออกมาไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากการตัดครั้งแรกความเค้นได้กระจายตัวออกไปแล้วส่วนใหญ่

- ในการทดลองหาความเค้นทั้ง 2 แบบ วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสามารถให้ค่าความเค้นออกมาได้ทันที ส่วนความเค้นที่ได้จากสเตรนเกจนั้นมาจากแปลงความเครียดที่ได้จากการทดลองมาเป็นความเค้นด้วยการใช้ค่างโมดูลัส ซึ่งใช้เท่ากับ 207 MPa ของเหล็กปรกติแทนไปในกฎของฮุก

- การหาค่าความเค้นตกค้างของการทดลองนี้ นั้นมีชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองน้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ที่ออกมาได้ว่าค่าที่แม่นยำหรือไม่ เพราะในระหว่างทำการทดลองมีปัญหาที่ไม่คาดคิดเกิดขึ้นด้วยจึงมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะมายืนยัน

- การหาค่าความเค้นตกค้างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน เป็นการหาค่าความเค้นที่ผิวของชิ้นงานในระดับไมโคร (Micro) โดยไม่ทำลายชิ้นงานจึงสามารถนำกลับไปใช้งานต่อได้ ส่วนการหาค่าความเค้นตกค้างด้วยสเตรนเกจค่าความเป็นการหาความเค้นจากทั้งตัวชิ้นงานจากการตัดซึ่งเป็นการทำลายชิ้นงานจึงเหมาะกับการนำไปศึกษาโครงสร้างภายในต่อไป

9.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยทดลองที่ผ่านมาพบว่าควรมีการปรับปรุงพัฒนาการศึกษาความเค้นตกค้างจากการเชื่อมรางรถไฟให้ดียิ่งขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการแนะนำองค์ประกอบที่ส่งผลต่อผลการทดลองดังต่อไปนี้

- คุณภาพของผิวชิ้นงานที่ทำการทดลองควรเรียบและปราศจากสิ่งมลทินหรือสิ่งสกปรกปกคลุมผิวก่อนทำการทดลอง ซึ่งส่งผลต่อค่าที่ได้โดยเฉพาะในขั้นตอนการยิงรังสีของวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

- การประเมินความเค้นตกค้างในการทดลอง ควรดำเนินการตรวจสอบความเค้นในแนวแกน X และ แกน Y ทุกจุดที่ต้องการวัดค่าเสมอ

- การกำหนดจุดที่จะทำการวัดค่าความเค้นที่เป็นรอยเชื่อม ควรที่จะทำการวัดค่าที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนด้วย เพราะบริเวณนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในทำให้ค่าต่างๆมีการเปลี่ยนแปลง

- การติดตั้งสเตรนเกจทุกครั้ง จะมีการสูญเสียความเค้นเนื่องจากการขัดชิ้นงานก่อนทำการติดตั้ง

- การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างควรมีการเปรียบเทียบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยควบคู่กัน

เอกสารอ้างอิง

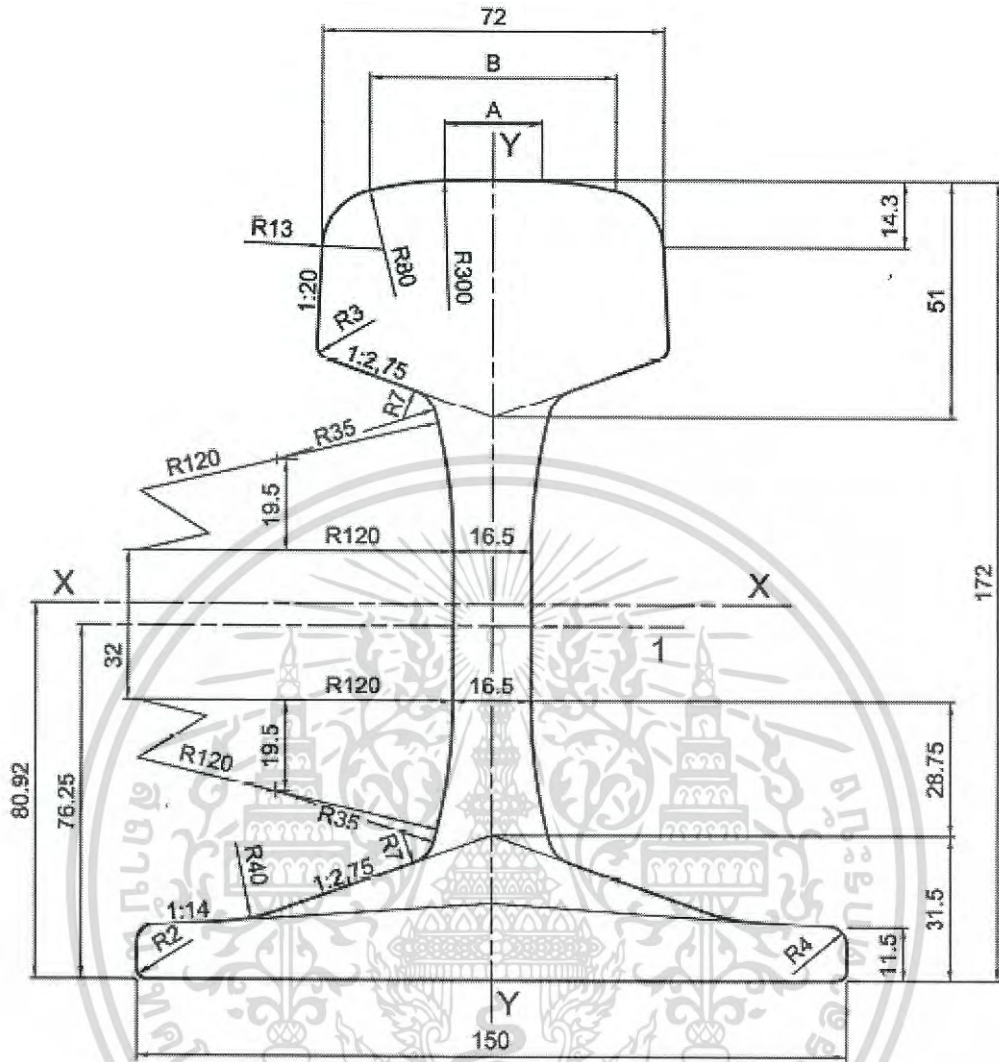
- [1] Krautkramer. (1997). การศึกษาหลักการขั้นพื้นฐานของการทดสอบคลื่นเสียงความถี่สูง. เอกสารประกอบคำบรรยายเรื่อง: เครื่องตรวจสอบรอยร้าวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง(น. 1-15). ชลบุรี: บริษัท ซี.วี.เอ็ม.กรุ๊ป จำกัด.
- [2] Phillips, Robert Ronald. (2012). *Ultrasonic methods for rail inspection*. University of California. California.
- [3] INFRASTRUCTURE DIVISION. (September 2012). *Technical Specification for ON-TRACK ULTRASONIC RAIL FLAW DETECTION TEST SERVICE*. ISRAEL RAILWAYS LTD.
- [4] Andrew Wilson. (August 2011). *Engineering Manual Track : RAIL DEFECTS AND TESTING (Version 4.5)*. Sydney
- [5] Technical Committee CEN/TC 256 "Railway applications". (2011). *EN 13674-1:2011 (E)*. Republic of Bulgaria.
- [6] Shunichi TAKAHASHI, Toshihiko SASAKI, Yasuto KONDOH, Yukio HIROSE. (2009). *RESIDUAL STRESS EVALUATION OF RAILWAY RAILS*. Kanazawa University, Kanazawa.
- [7] Ninshu Ma, Zhipeng Cai, Hui Huang, Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Jiluan Pan. (2015). *Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment*. Osaka University. Osaka.
- [8] Pornpana Suklaead. (2016, November 28). ส เ ต ร น เ ก จ . retrieved from <https://www.scribd.com/doc/23424357/สเตรนเกจ>
- [9] Karl Hoffmann. (1989). *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

[10] นาย พณพล ปั่นเงิน. (2548). การประเมินความคุ้มค่าของการใช้คลื่นความถี่สูง. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

[11] นาย อาทิตย์ จันทร์ขาว. (2550). การศึกษาคูณลักษณะของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูงในการตรวจวัดความคุ้มค่า. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.







รูปที่ ก.1 แบบวาดของรางรถไฟ UIC 60 [11]

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 64

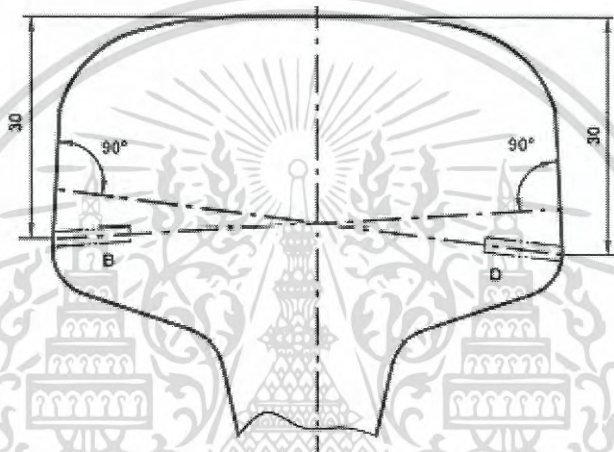


ภาคผนวก ข
ตำแหน่งที่ทำการเจาะตามมาตรฐาน EN 13476 European
Standard



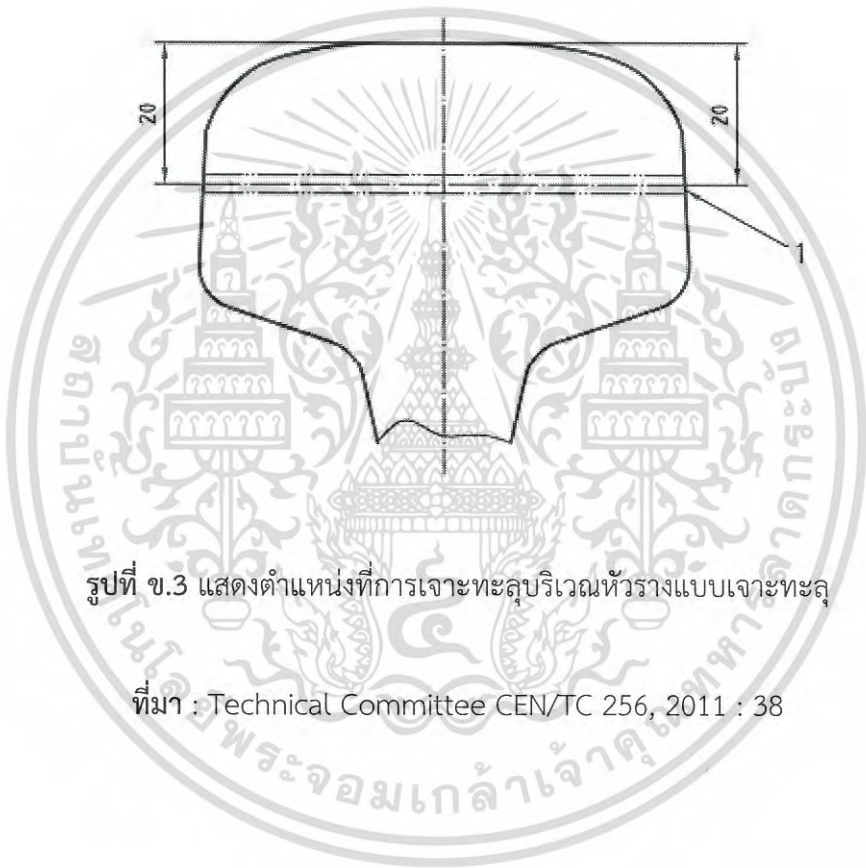
รูปที่ ข.1 แสดงตำแหน่งที่การเจาะทะลุบริเวณหัวรางเจาะลึกเข้าไป 15 มิลลิเมตรแบบตั้งฉาก

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 38



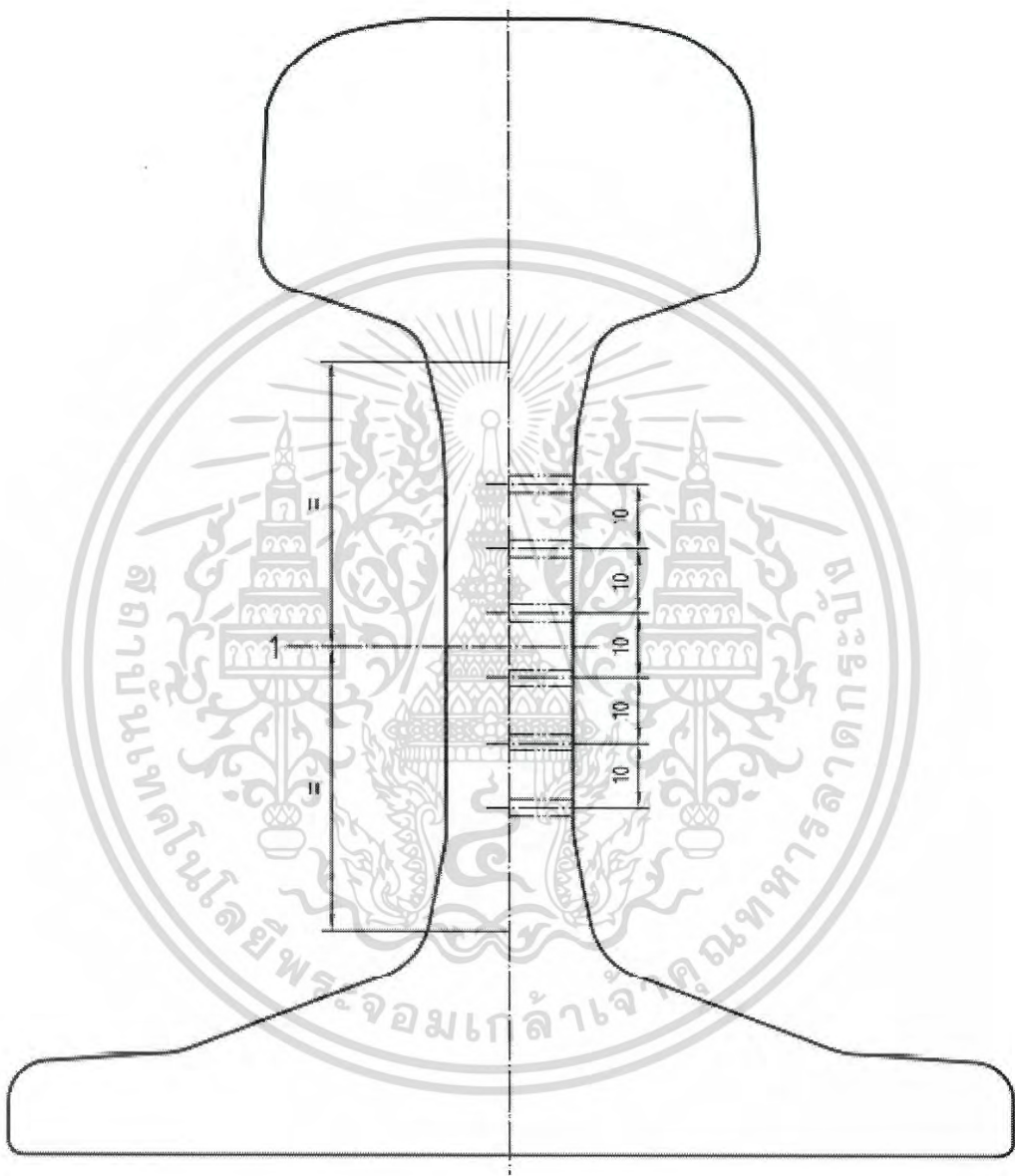
รูปที่ ข.2 แสดงตำแหน่งที่การเจาะทะลุบริเวณหัวรางเจาะลึกเข้าไป 15 มิลลิเมตรแบบเฉียง

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 38



รูปที่ ข.3 แสดงตำแหน่งที่การเจาะทะลุบริเวณหัวร่างแบบเจาะทะลุ

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 38



รูปที่ ข.4 แสดงตำแหน่งที่การเจาะทะลุบริเวณด้านข้างรางทั้ง 6 รู

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 39



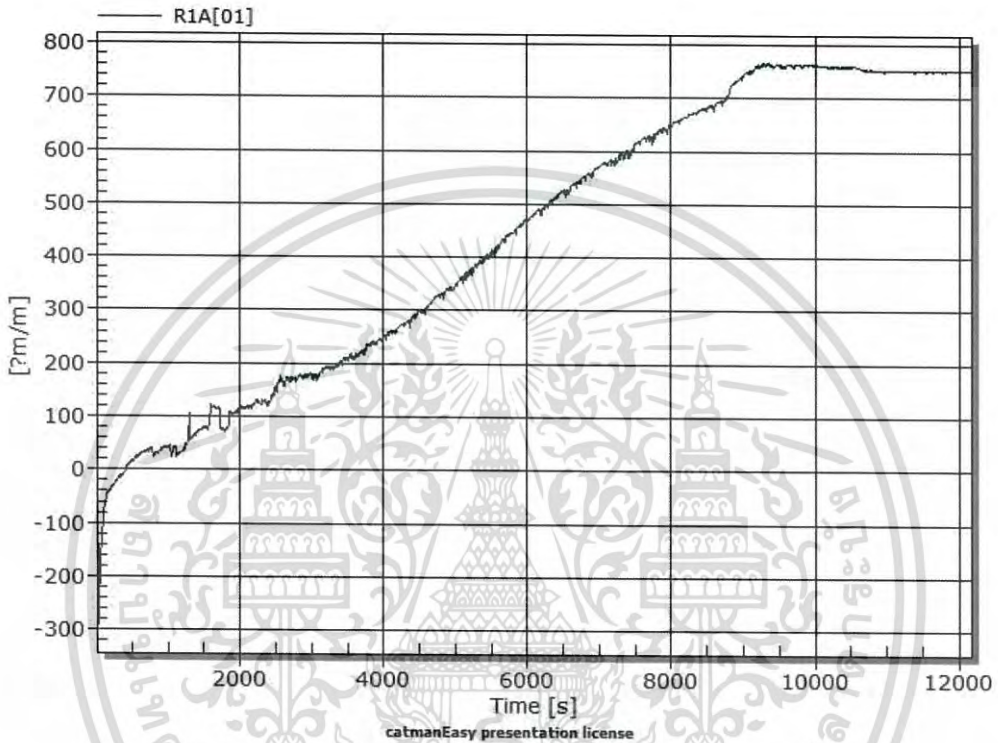
รูป ข.5 แสดงตำแหน่งที่การเจาะทะลุบริเวณโคนฐานราง

ที่มา : Technical Committee CEN/TC 256, 2011 : 40

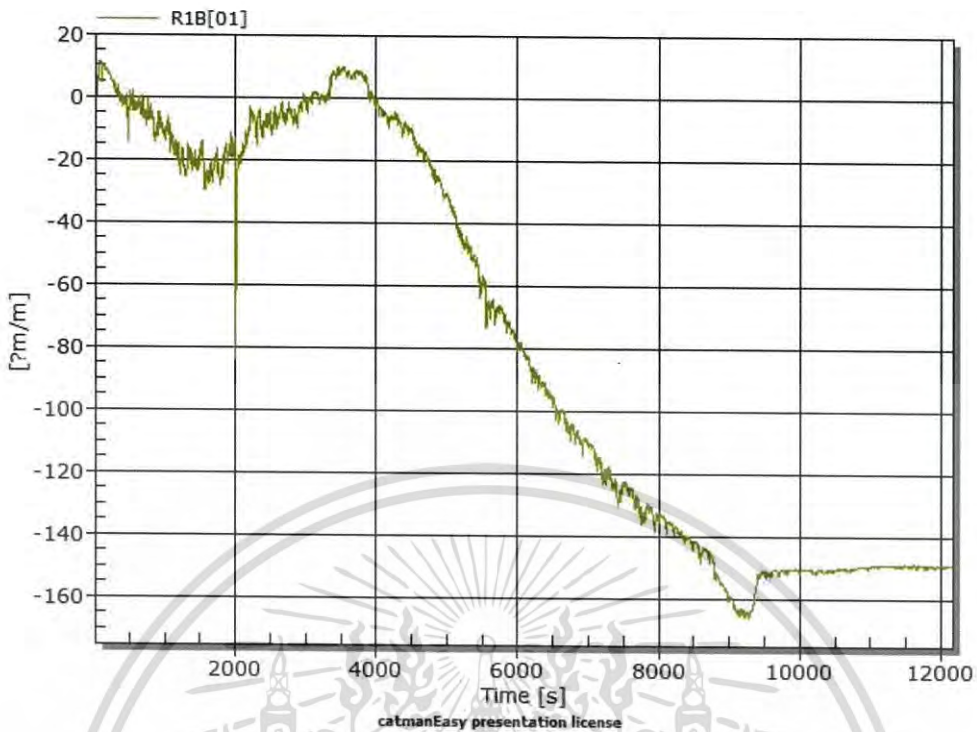


ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการประเมินค่าความแตกต่างของรอยเชื่อมรางที่ได้จาก
สเตรนเกจ

การประเมินค่าความเค้นตกค้างที่ได้จากจากสเตรนเกจนั้นหลังจากการตัดรางรถไฟแล้ว สเตรนเกจจะอ่านค่าจากการยืดหดตัวออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเครียดดัง ภาพที่ ค.1 และ ค.2



รูปที่ ค.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเครียดบริเวณหัวรางด้านบนแนวตามยาว ของรางจากการตัดที่บริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ ค.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเครียดบริเวณหัวรางด้านบนแนวของรางจากการตัดที่บริเวณรอยเชื่อม

ซึ่งจากกราฟที่นำมาเป็นตัวอย่างจะนำเอาค่าความเครียดที่คงที่ สังเกตจากกราฟซึ่งสเตรนเกจได้ทำการยึดหรือหดเสร็จแล้วนั่นเอง โดยถ้าค่าออกมาเป็นบวกจะแสดงถึงการยืดตัวของเกจ แต่ถ้าเป็นติดจะแสดงถึงการหดตัวของเกจ ซึ่งหลังจากได้ค่าความเครียดมาแล้วก็จะนำไปแทนในสมการที่ 2.1

$$\sigma = E\varepsilon$$

เมื่อ E = โมดูลัสยืดหยุ่น หน่วยเป็น MPa, GPa

σ = ความเค้น หน่วยเป็น MPa, GPa

ε = ความเครียด

โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเท่ากับ 207 GPa ซึ่งเป็นค่าคงที่ของวัสดุที่เป็นเหล็กเหมือนรางที่ใช้ในการทดลอง แล้วแทนค่าทั้งความเครียดที่ได้จากการทดลองและโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นค่าคงที่ในเหล็กก็จะได้ค่าความเค้นที่เป็นความเค้นที่คลายตัวออกมาจากชิ้นจะแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณของความเค้นที่ได้จาก ความเครียดบริเวณหัวรางด้านบนแนวตามยาวของรางจาก การตัดที่บริเวณรอยเชื่อม

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\sigma = 207 * 760 \mu$$

$$\sigma = 157.32 \text{ MPa}$$

เช่นเดียวกับอีกกราฟ

ตัวอย่างการคำนวณของความเค้นที่ได้จากความเครียดบริเวณหัวรางด้านบนแนวตัดขวางของรางจาก การตัดที่บริเวณรอยเชื่อม

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\sigma = 207 * 150 \mu$$

$$\sigma = 31.05 \text{ MPa}$$

