

การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียว โดยอาศัยการตรวจจับสนามแม่เหล็กรั่วไหล Study and Development of Inspection Technique for Wire Strand Damages based on Magnetic Flux Leakage Detection

รภัสสิทธิ์ มัตธนู¹ เชิดพงษ์ จอมเดช^{2,*} และ บวรโชค ผู้พัฒน์^{1,3}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

² ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

³ ศูนย์วิจัยและบริการวิศวกรรมการเชื่อม สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: cherdpong.jom@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายแบบไม่ทำลายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวที่ใช้ในโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เสาส่งสัญญาณ สะพานซิง และระบบอัดแรงภายนอก โดยอาศัยการตรวจจับสนามแม่เหล็กรั่วไหลในบริเวณที่เกิดความเสียหายเมื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความเข้มสูงให้กับลวดเหล็กกล้าตีเกลียว ในงานวิจัยได้ศึกษารูปแบบการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กผ่านการสร้างและคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ (3D Numerical model) ของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 มิลลิเมตร ที่มีการจำลองความเสียหายขนาดต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กด้วยแท่งแม่เหล็กถาวรและปรับเปลี่ยนตำแหน่งการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ผลการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความเสียหายที่มีขนาดแตกต่างกันได้ และเพื่อยืนยันผลการคำนวณแบบจำลองดังกล่าว ในงานวิจัยยังได้ทำการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กแบบความไวสูงในการตรวจจับสนามแม่เหล็กรั่วไหล ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สอดคล้องกันของรูปแบบและขนาดของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง จากผลการศึกษาทำให้สามารถออกแบบและปรับปรุงเทคนิคการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความเสียหายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวที่ใช้ติดตั้งในโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว, ความเสียหาย, สนามแม่เหล็กรั่วไหล, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

Abstract

This paper presents the development of a nondestructive testing technique for detecting wire strand damages, which are often installed in large structures such as broadcast towers,

cable-stayed bridges, and external post-tensioning. By inducing high magnetic field strength, the induced magnetic field is changed due to leakage flux around the area of wire strand damage. In order to study the features of these flux leakages, a 3-dimensional numerical model was created using a 15.2 mm-diameter wire strand with different artificial notches. Then the model was calculated by using Finite Element Method (FEM). The computation results showed the different patterns of magnetic flux leakage in relation to the degree of wire strand damage. Moreover, the numerical calculation results were validated by setting up the experiment similar to computation modeling to detect the magnetic field leakage by using a high sensitivity magnetic field sensor. The experimental results confirmed that flux leakage patterns had similar trends compared with the numerical results. Consequently, the outcome of this research can be used for designing and improving the inspection technique of in-serviced wire strand in large structures based on magnetic field detection.

Keywords: Wire Strand, Damage, Magnetic Flux Leakage, Finite Element Method (FEM)

1. บทนำ

สายเคเบิล (Wire rope) และลวดเหล็กกล้าตีเกลียว (Wire strand) [1] ได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อช่วยรับแรงและน้ำหนักอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านของระบบลิฟต์ ระบบเครน อุปกรณ์ช่วยยกชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงส่วนประกอบของโครงสร้างขนาดใหญ่ อาทิเช่น เสาส่งสัญญาณ สะพานซิง และระบบอัดแรงภายในโครงสร้าง (Pre-tensioning, Post-tensioning) โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างทางยกระดับ ประเภท Precast Segmental Box Girder

ที่มีการเพิ่มปริมาณการใช้งานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากแผนแม่บทการพัฒนาทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 – 2579) และแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางราง ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล [2, 3] เนื่องด้วยสายเคเบิลและลวดเหล็กกล้าตีเกลียวเป็นชิ้นส่วนทางกลที่มีความแข็งแรงทนทานและมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชิ้นส่วนเสริมแรงในระบบคอนกรีตอัดแรงได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้โครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักได้มากกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไป [4] แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานสายเคเบิลที่ถูกรับน้ำหนักเป็นระยะเวลานานหรือใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม อาจเกิดความเสียหายในลักษณะต่าง ๆ [5] อาทิเช่น การกัดกร่อน (Corrosion) การสูญเสียพื้นที่หน้าตัด (Diameter reduction) และการขาดตัวของเส้นลวด (Wire breaks) เป็นต้น เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างและหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น การตรวจสอบสายเคเบิลให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันการตรวจสอบความเสียหายบนสายเคเบิลจะใช้การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) [1] โดยการสังเกตและสัมผัสหารอยความเสียหาย รวมไปถึงการตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของขนาด วิธีการนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบเบื้องต้น หรือการตรวจสอบเพื่อหารอยความเสียหายขนาดใหญ่ การตรวจสอบอีกวิธีการหนึ่งคือการถ่ายภาพรังสี (Radiographic Testing) [6] โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray) หรือรังสีแกมมา (Gamma Ray) ฉายทะลุผ่านสายเคเบิลไปตกกระทบกับแผ่นสร้างภาพ (Image plate) ที่วางอยู่อีกด้านหนึ่ง ภาพที่ได้จากการตรวจสอบสามารถแสดงให้เห็นถึงความหนาที่แตกต่างกันที่เกิดจากความเสียหายของสายเคเบิลได้ แต่วิธีการนี้มีความอันตรายขณะปฏิบัติงานและใช้เวลาในการตรวจสอบมาก นอกจากนี้การตรวจสอบสายเคเบิลอีกวิธีการหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นมาและเริ่มถูกใช้งานในช่วง 20 ปีนี้คือการตรวจสอบด้วยวิธีการทางสนามแม่เหล็ก (Magnetic Method) [1, 7, 8] โดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้กับสายเคเบิลที่เป็นวัสดุที่สามารถซึมซาบสนามแม่เหล็กได้ (Ferromagnetic material) และตรวจจับสนามแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux leakage: MFL) ในบริเวณที่เกิดความเสียหาย ทำให้ทราบถึงตำแหน่งและปริมาณของรอยความเสียหายบนสายเคเบิลได้

จากการศึกษาและค้นคว้าวิธีการตรวจสอบข้างต้นพบว่า การตรวจสอบด้วยการใช้สนามแม่เหล็ก เป็นที่วิธีการที่สามารถตรวจสอบความเสียหายของสายเคเบิลได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการตรวจสอบแบบไม่สัมผัส และสามารถแยกแยะระดับความเสียหายได้ดี [8] ซึ่งมีงานวิจัยและพัฒนาความสามารถในการตรวจสอบด้วยการสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กมากขึ้น [9, 10] พบว่าการสร้างสนามแม่เหล็กด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบวงจรแม่เหล็ก (Magnetic yoke circuit) สามารถทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเข้าไปในชิ้นส่วนที่ถูกตรวจสอบได้ดีขึ้น นอกจากนี้การพัฒนาวิธีการตรวจจับสนามแม่เหล็กของสายเคเบิลด้วยขดลวด (Coil sensor) หรือ ฮอลล์

เซ็นเซอร์ (Hall's sensor) สามารถช่วยเพิ่มความไวในการตรวจสอบ (Sensitivity) และความสามารถในการแยกแยะ (Resolution) ของรอยความเสียหายแบบต่าง ๆ ได้ดี [9, 11] รวมไปถึงการพัฒนาวิธีประมวลผลการตรวจสอบจากสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์เพื่อแปลความหมายและประเมินความเสียหายของชิ้นงานตรวจสอบ [12] ซึ่งทำให้การตรวจสอบด้วยวิธีการทางสนามแม่เหล็กมีความก้าวหน้าและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานตรวจสอบสายเคเบิลได้หลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์การตรวจสอบด้วยหลักการนี้ โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น นอกจากนี้การตรวจจับสนามแม่เหล็กที่รั่วไหลของชิ้นงานตรวจสอบ

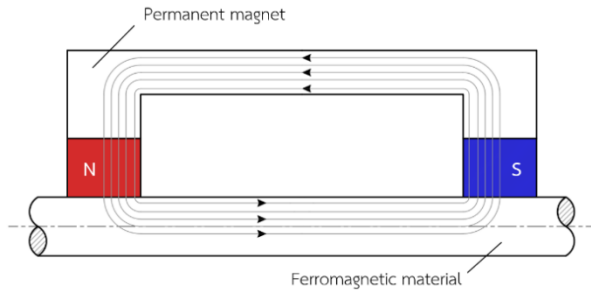
ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาและพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของสายเคเบิลและลวดเหล็กตีเกลียว เพื่อให้สามารถตรวจสอบหารอยความเสียหายบนสายเคเบิลที่ระยะห่าง (Lift-off) ต่าง ๆ ได้ ในขณะที่มีขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์การตรวจสอบที่ลดลง โดยได้ศึกษารูปแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ ผ่านการสร้างและคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และทำการยืนยันผลการคำนวณแบบจำลองด้วยการทดลอง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันของขนาดและรูปแบบสัญญาณการตรวจสอบ โดยเนื้อหาในบทความฉบับนี้ ประกอบไปด้วย (1) หลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก (2) การสร้างและคำนวณแบบจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) (3) การทดลองและการยืนยันผลการคำนวณแบบจำลอง และ (4) สรุปผลการวิจัย

2. หลักการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

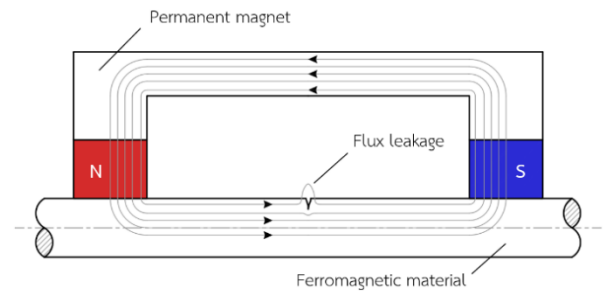
2.1 ทฤษฎีและสมการพื้นฐาน

การตรวจสอบความเสียหายบนสายเคเบิลและลวดเหล็กตีเกลียวด้วยวิธีวัดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Leakage : MFL) ในงานวิจัยนี้ ใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแบบคงที่ (Magnetostatics) ให้กับวัสดุตรวจสอบจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) ในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณที่มีรอยความเสียหาย และทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1

วิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแบบคงที่ สามารถทำได้โดยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) หรือแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) ซึ่งกระบวนการตรวจสอบด้วยวิธีการนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's differential equation of electric field and magnetic field) ในระบบเชิงเส้น [8] โดยประกอบด้วย 4 สมการสำคัญดังนี้



(ก) วัสดุตรวจสอบที่สมบูรณ์



(ข) วัสดุตรวจสอบที่มีรอยความเสียหาย

รูปที่ 1 หลักการพื้นฐานของการตรวจสอบความเสียหายโดยการตรวจจับสนามแม่เหล็กรั่วไหล (MFL)

สมการที่ (1) กฎของแอมแปร์และแมกซ์เวลล์ (Maxwell - Ampere's Law) (2) กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of induction) (3) กฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้า (Gauss's Law of electric) (4) กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก (Gauss's Law of magnetism) ดังสมการที่ (1) - (4) ตามลำดับ

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

เมื่อ H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m
 J คือ ความหนาแน่นของกระแส มีหน่วยเป็น A/m²
 D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/m²
 E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/m
 ρ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/m³
 และ B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/m²

โดย 1 Wb/m² = 10,000 gauss (G) = 1 Tesla (T)

สำหรับความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบด้วย MFL ระหว่าง B กับ H สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$B = \mu H \quad (5)$$

เมื่อ μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น H/m สมการควบคุมพื้นฐานและความสัมพันธ์เชิงเส้นข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับปัญหาด้านการคำนวณแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กแบบคงที่ ชนิดไม่มีกระแสไฟฟ้า แต่มีสนามแม่เหล็กตกค้างได้ ดังนั้นสมการที่ (1) และ (5) จะถูกเปลี่ยนเป็นสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$\nabla \times H = 0 \quad (6)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (7)$$

โดย μ_0 คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
 μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง และ B_r คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง มีหน่วยเป็น Wb/m²

2.2 การคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข

- สำหรับการแก้ปัญหาทางด้านการตรวจสอบด้วยการตรวจจับสนามแม่เหล็กรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก สิ่งสำคัญคือการหาค่าตอบของปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) ในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งสามารถทำได้โดยการคำนวณผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) หรือเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Numerical computation) โดยการกำหนดปริมาณสเกลาร์ที่เรียกว่า Magnetic Scalar Potential (V_m) มาช่วยในการคำนวณหาค่าตอบของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยให้ความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ V_m ดังสมการต่อไปนี้ [13]

$$H = -\nabla V_m \quad (8)$$

เมื่อแทนที่ความสัมพันธ์ Gauss's Law of magnetism ดังสมการที่ (4) จะได้สมการที่ (9) และจากความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H จะได้เป็นสมการที่ (10) ตามลำดับ

$$\nabla \cdot B = \mu_0 \mu_r \nabla \cdot (H + B_r) = 0 \quad (9)$$

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_m - B_r) = 0 \quad (10)$$

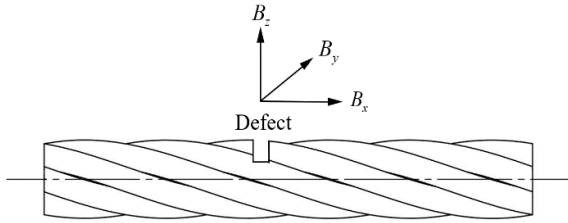
โดยที่ค่า Magnetic Scalar Potential (V_m) ของแม่เหล็กถาวรที่มีสนามแม่เหล็กตกค้างจะเป็นไปตามสมการที่ (11)

$$\nabla^2 V_m = \nabla \cdot B_r \quad (11)$$

เมื่อหาค่าตอบของ Magnetic scalar potential (V_m) ได้ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ได้ด้วยเช่นกัน โดยที่การคำนวณหาปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด (B_T) ที่เกิดจากรอยความเสียหาย (Defect) ของสายเคเบิลหรือลวดเหล็กตีเกลียวไม่ใช่ค่าที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะสามารถจำแนกได้ทั้งในแนวนอน แนวสัมผัส และแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2 และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลในแต่ละทิศทางยังสามารถระบุได้ดังสมการที่ (12)

$$B_T = B_x + B_y + B_z \quad (12)$$

เมื่อ B_x, B_y และ B_z เป็นปริมาณเวกเตอร์ของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่รั่วไหลในทิศทางแนวนอน แนวสัมผัส และแนวรัศมีตามลำดับ



รูปที่ 2 ทิศทางการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กบนสายเคเบิลและลวดเหล็กที่เกลียว

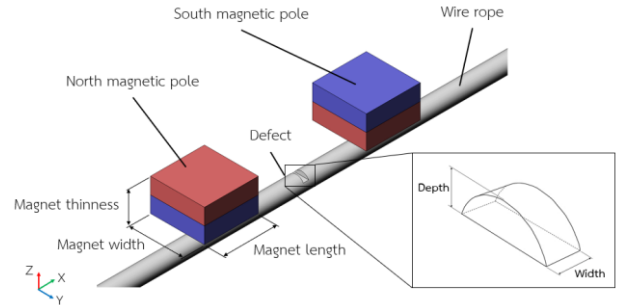
3. การสร้างและคำนวณแบบจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

3.1 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติและวิธีคำนวณแบบจำลอง

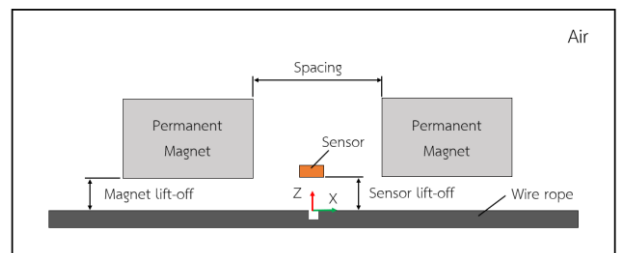
เนื่องจากการศึกษาและทดลองการตรวจสอบหารอยความเสียหายบนสายเคเบิลและลวดเหล็กที่มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอยู่มาก ทั้งในเรื่องของรูปแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ระยะการตรวจสอบที่เข้าถึงได้ ชนิดและขนาดของรอยความเสียหาย รวมถึงการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ยุ่ยาก เพื่อลดปัญหาดังกล่าวและเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ ในส่วนแรกนี้ผู้วิจัยจึงศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขในรูปแบบ 3 มิติ (3D Numerical model) ดังแสดงตัวอย่างการจำลองดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยโดเมนของแบบจำลองแท่งแม่เหล็กถาวรแบบจำลองสายเคเบิล ที่มีรอยความเสียหาย 5 ระดับ และแบบจำลองช่องว่างอากาศที่เป็นวัสดุต่างชนิดกันแต่มีขอบเขตของแต่ละโดเมนที่มีสนามต่อเนื่องกัน

โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 1 ดังนี้ แบบจำลองแท่งแม่เหล็กถาวรจำนวน 2 แท่ง กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กคงค้าง (Remanent flux density) เป็น 1.44 T และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) กำหนดเป็น 1.05 โดยอ้างอิงจากคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอดิเมียม NdFeB (Neodymium) มีรูปแบบการจัดเรียงห่างกันเป็นระยะ (Spacing) 100 mm แบบจำลองสายเคเบิล (Wire rope) กำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15.2 mm มีความยาว 100 cm และกำหนดค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ เป็น 100 และแบบจำลองอากาศโดยรอบ กำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 1 โดยที่กำหนดจุดเริ่มต้น (Origin) ของการจำลองอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองสายเคเบิล ดังแสดงในรูป 3 (ข) และแบ่งขนาดแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ ที่มีขนาดเล็กที่สุด 0.2 mm และขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 2.0 mm เป็นจำนวน 605,502 elements โดยใช้คอมพิวเตอร์

ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ 12 Core และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) ขนาด 32 GB



(ก) Isometric view



(ข) Front view

รูปที่ 3 รูปแบบการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

ตารางที่ 1 ข้อมูลแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

หัวข้อ	ขนาด (mm)
ขนาดของแท่งแม่เหล็กถาวร (Width x Length x Thickness)	50 x 50 x 30
ระยะห่างระหว่างแท่งแม่เหล็กถาวร (Spacing)	100
ความกว้างของรอยความเสียหาย (Width)	5
ความลึกของรอยความเสียหาย (Depth)	1, 2, 3, 4, 5
ระยะห่างระหว่างแท่งแม่เหล็กถาวรกับสายเคเบิล (Magnet lift-off)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์กับสายเคเบิล (Sensor lift-off)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

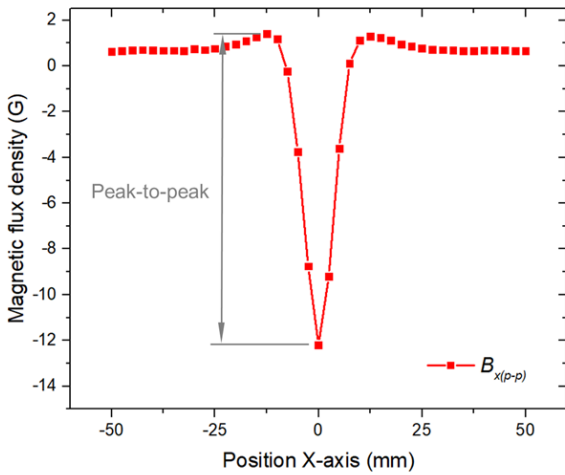
การวิจัยส่วนนี้เป็นการหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical solution) ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปแบบของสัญญาณการตรวจสอบ MFL บนแบบจำลองทั้งทิศทางตามแนวนอน (B_x) แนวสัมผัส (B_y) และแนวรัศมี (B_z) ที่ได้จากการคำนวณโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กถาวรผ่านสายเคเบิลที่มีรอยความเสียหาย ทุก ๆ ระยะ 2.5 mm (Sweep parameters) รวมเป็นระยะทาง 100 มิลลิเมตร ตามความยาวของสายเคเบิล (X - axis) โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาทีต่อการจำลอง 1 ครั้ง เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ (1) อิทธิพลของระยะห่างเซ็นเซอร์ (2) อิทธิพลของระยะห่างชุดตรวจสอบจำลอง และ (3) ความสามารถในการตรวจสอบหารอยความเสียหายบนสายเคเบิล

3.2 ผลการคำนวณแบบจำลอง

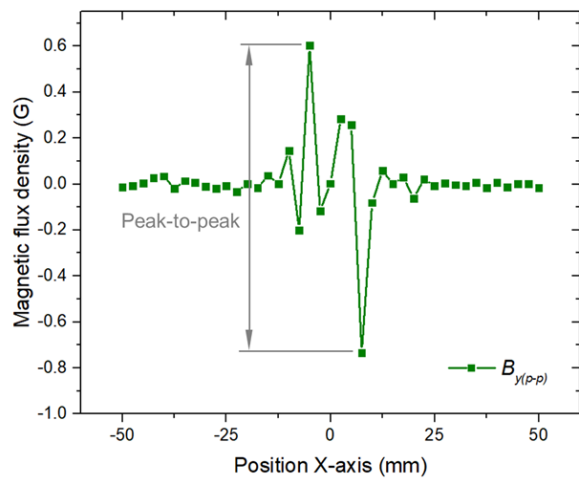
3.2.1 อิทธิพลของระยะห่างเซ็นเซอร์ (Sensor lift-off)

ผลการคำนวณแบบจำลองที่มีรอยความเสียหาย (Defect) บนสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่มีความเสียหาย ขนาด 5 x 5 mm (Width x Depth) มีระยะห่างระหว่างแบบจำลองแท่งแม่เหล็กถาวรกับสายเคเบิล (Magnet lift-off) 2 mm และมีระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์กับสายเคเบิล (Sensor lift-off) ตั้งแต่ 2 - 14 mm จากการคำนวณแบบจำลอง พบว่าสัญญาณ MFL ในทิศทาง B_x , B_y และ B_z มีขนาดและรูปแบบของสัญญาณที่ต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก - ค) ตามลำดับ และเมื่อนำขนาดของสัญญาณระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุด (Peak-to-peak) มาวิเคราะห์เพิ่มเติม พบว่ารูปแบบของสัญญาณในแต่ละช่วงระยะห่าง

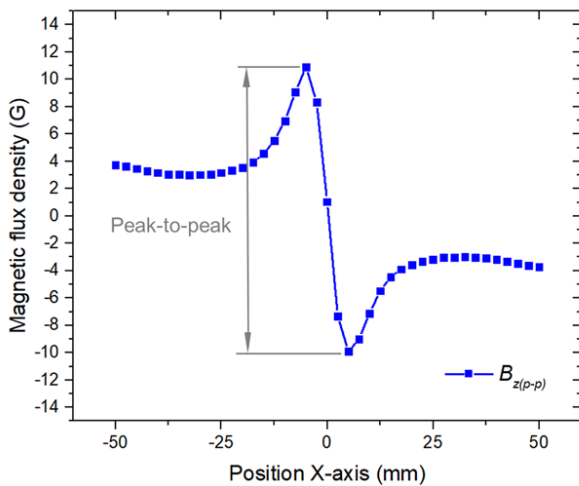
เซ็นเซอร์ในการตรวจสอบ (Sensor Lift-off) มีผลต่อขนาดสัญญาณ MFL ดังแสดงในรูปที่ 4 (ง) โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดสัญญาณการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กทั้ง 3 ทิศทางแล้ว พบว่า $B_{z(p-p)}$ มีค่ามากที่สุด ในทุกช่วงความห่างของเซ็นเซอร์ แต่ที่ระยะใกล้ที่สุด คือ 2 มิลลิเมตร จะเป็นระยะที่มีสัญญาณ MFL มากที่สุด ที่ 86.67 G และลดลงตามลำดับเมื่อมีระยะห่างมากขึ้น จนถึง 6.24 G ที่ระยะ 14 มิลลิเมตร ในขณะที่เดียวกัน $B_{x(p-p)}$ ก็มีรูปแบบของสัญญาณที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันกับ $B_{z(p-p)}$ โดยมีสัญญาณ MFL มากที่สุดที่ระยะ 2 mm ที่ 62.48 G และลดลงตามลำดับเมื่อมีระยะห่างที่มากขึ้น แต่ในทางกลับกัน $B_{y(p-p)}$ มีรูปแบบของสัญญาณที่ไม่สามารถคาดเดาได้และมีขนาดสัญญาณการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง 0.25 - 1.65 G ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีความสำคัญ



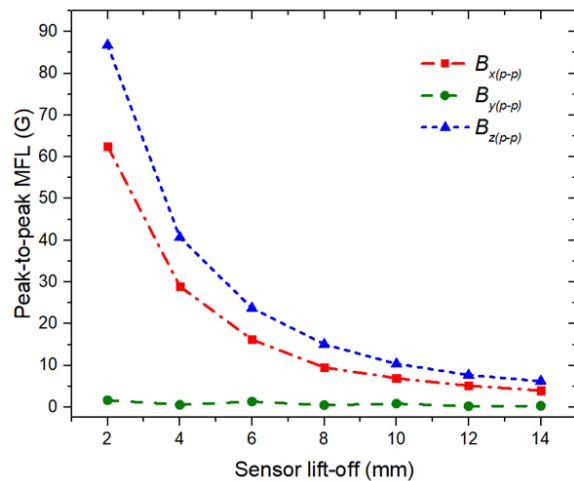
(ก) รูปแบบของสัญญาณแนวนอน (B_x)



(ข) รูปแบบของสัญญาณแนวสัมผัส (B_y)



(ค) รูปแบบของสัญญาณแนวรัศมี (B_z)

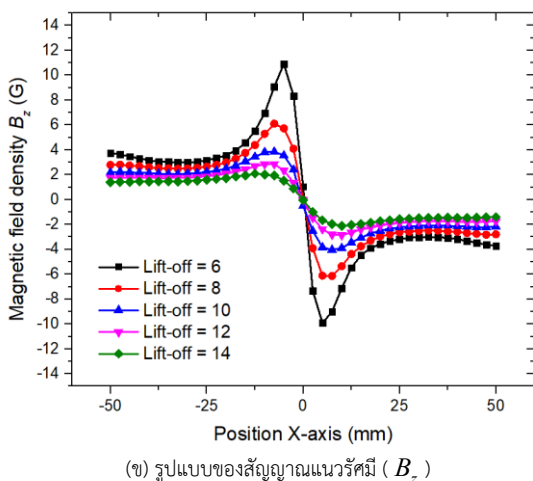
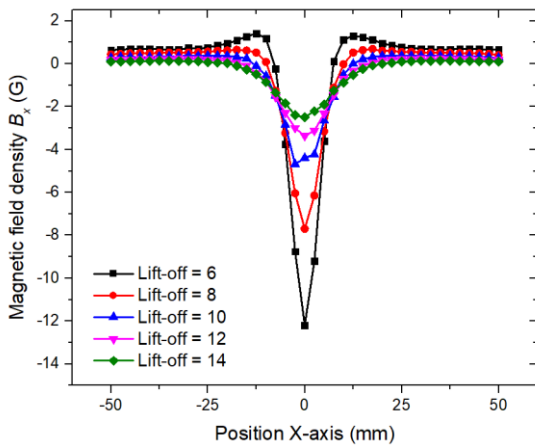


(ง) การเปรียบเทียบสัญญาณ Peak-to-peak

รูปที่ 4 รูปแบบของสัญญาณการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก (MFL)

3.2.2 อิทธิพลของระยะห่างการตรวจสอบ (lift-off)

การคำนวณแบบจำลองเมื่อชุดสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizer) และ จุดวัดสัญญาณ MFL (Detector point) ถูกกำหนดให้อยู่ในระนาบเดียวกัน ตามแนวแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีระยะห่าง (Lift-off) จากแบบจำลองสายเคเบิล ระหว่าง 6 - 14 mm และจำลองรอยความเสียหาย ขนาด 5 x 5 mm โดยพิจารณาสัญญาณการตรวจสอบการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กเฉพาะ B_x และ B_z เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณการตรวจสอบอย่างมีนัยสำคัญ ผลการคำนวณแบบจำลองพบว่า การเพิ่มระยะห่างของการตรวจสอบ (Lift-off) ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณ MFL ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5 เช่นเดียวกันกับการเพิ่มระยะห่างของแบบจำลองเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว โดยที่ขนาดของสัญญาณ MFL จะมีค่ามากที่สุด ในบริเวณที่ใกล้กับแบบจำลองสายเคเบิล ที่ระยะ 6 mm ทั้ง B_x และ B_z โดยมีค่าสูงสุดของสัญญาณ (Peak) ที่ -12.19 G และ 10.91 G ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะห่างของการคำนวณ สัญญาณจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงระยะ 14 mm ที่ค่าสูงสุดของสัญญาณที่ -2.49 G และ -2.11 G ของ B_x และ B_z ตามลำดับ ซึ่งเครื่องหมายที่แสดงอยู่ด้านหน้าของขนาดสัญญาณ หมายถึงทิศทางของไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก



รูปที่ 5 รูปแบบสัญญาณการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก (MFL) ที่ระยะห่าง 6 - 14 มิลลิเมตร

4. การทดลองและการยืนยันผลการคำนวณแบบจำลอง

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้มีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการคำนวณแบบจำลอง โดยมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง ประกอบไปด้วยกัน 7 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยมีรายละเอียดดังนี้ (1) ชุดสร้างสนามแม่เหล็ก ชนิด NdFeB (Neodymium) เกรด N52 ขนาด 50 x 50 x 30 mm (2) เซ็นเซอร์สำหรับวัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field Sensor) ชนิดความไวสูง 25 mV/V/Oe สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอน (B_x) และแนวรัศมี (B_z) (3) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Dc Power Supply) ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเซ็นเซอร์ที่แรงดัน 5 V (4) Data Acquisition (DAQ) สำหรับแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อใช้งานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ National Instruments รุ่น PCI - 6115 (12-Bit, 10 MS/s/Ch) โดยใช้งานร่วมกับชุดต่อสัญญาณแบบหลายช่อง BNC - 2110 (5) คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับประมวลผลสัญญาณ MFL และ (6) ลวดเหล็กกล้าตีเกลียว มอก. 420 - 2540 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ยาว 1 m พร้อมทั้งจำลองรอยความเสียหายที่มีความกว้างขนาด 5 mm และความลึก 5 ระดับ ตั้งแต่ 1 - 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 7

4.2 วิธีการทดลอง

การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองจะดำเนินการตามแผนผังการทดลอง ตามรูปที่ 8 โดยวิธีการทดลองเป็นการเคลื่อนที่ (Scan) ลวดเหล็กตีเกลียวที่จำลองรอยความเสียหายไว้ 5 ระดับ ผ่านแท่งแม่เหล็กถาวรและเซ็นเซอร์ตรวจจับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (TMR Sensor) ตามแนวแกน X ด้วยอัตราเร็ว 10 cm/s จำนวน 3 ครั้ง ต่อการทดลอง เพื่อนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์จะเป็นรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถูกลบจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (DAQ) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านโปรแกรมบนระบบคอมพิวเตอร์ได้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเป็นการแสดงผลในรูปแบบกราฟ ที่มี Sampling rate 10 kS/s จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเข้าสมการที่ (13)

$$B = \frac{V_{out}}{(S \times V_{in})} \quad (13)$$

โดย V_{out} คือ แรงดันที่ออกจากเซ็นเซอร์ มีหน่วยเป็น V

S คือ ความไวในการตรวจสอบของเซ็นเซอร์ (Sensitivity)

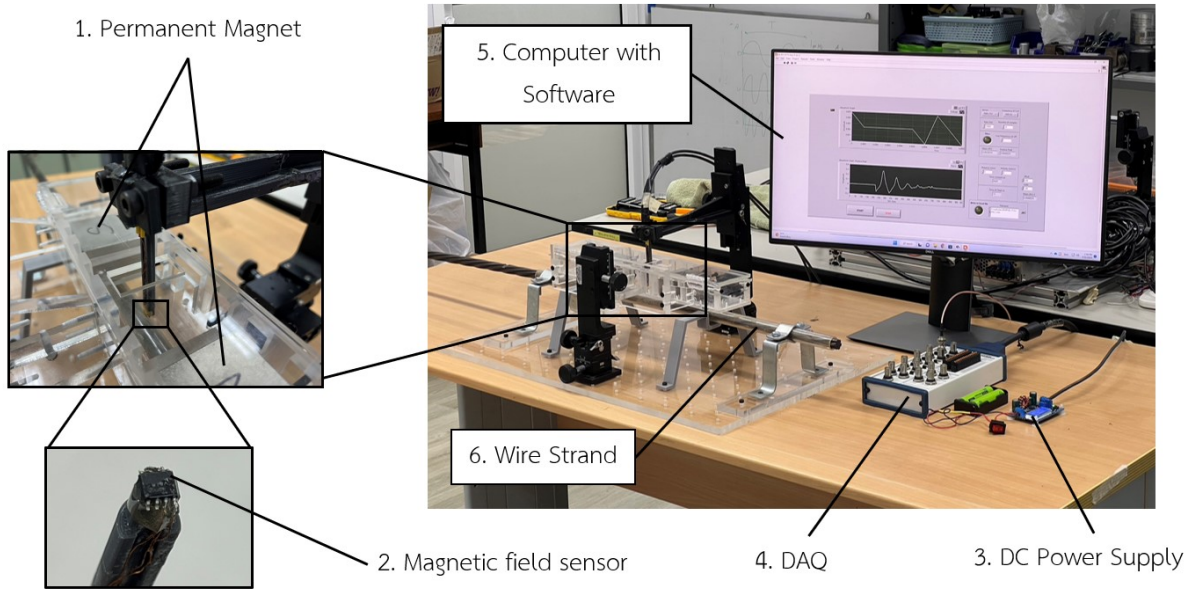
มีหน่วยเป็น mV/V/Oe

และ V_{in} คือ แรงดันที่จ่ายให้กับเซ็นเซอร์ มีหน่วยเป็น V

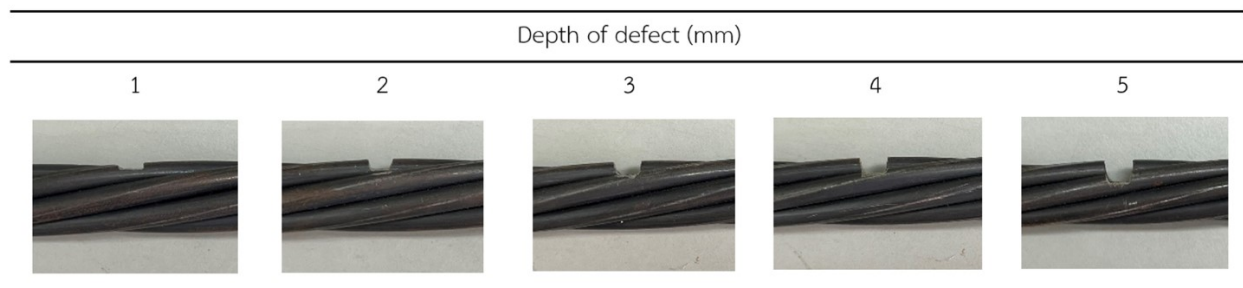
เมื่อ 1 oersted (Oe) มีค่าเท่ากับ 1 gauss (G) ในอากาศ

เพื่อเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้าให้เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและ นำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณผ่านแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ โดยตัวอย่างของสัญญาณการทดลองทั้งทิศทางแนวนอน

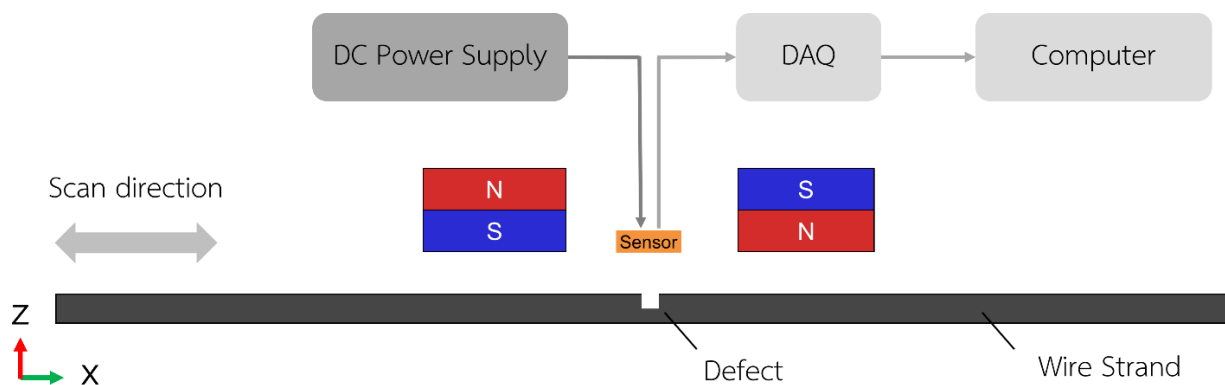
(B_x) และแนวรัศมี (B_z) แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจากรูปจะแสดงถึงขนาดและ รูปร่างของสัญญาณที่ได้จากการตรวจสอบบนลวดเหล็กที่เกลียวที่มีการจำลอง รอยความเสียหาย 5 ระดับ



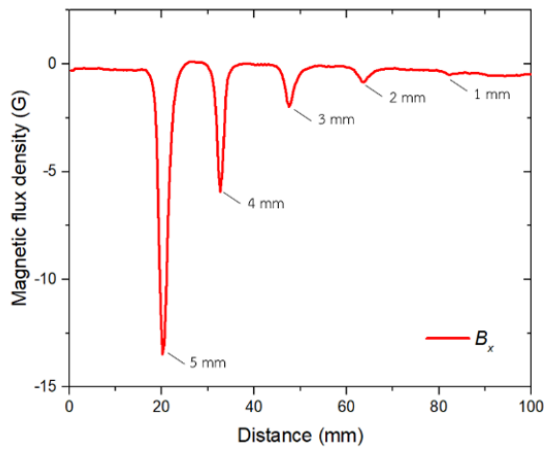
รูปที่ 6 ส่วนประกอบของเครื่องมือและอุปกรณ์



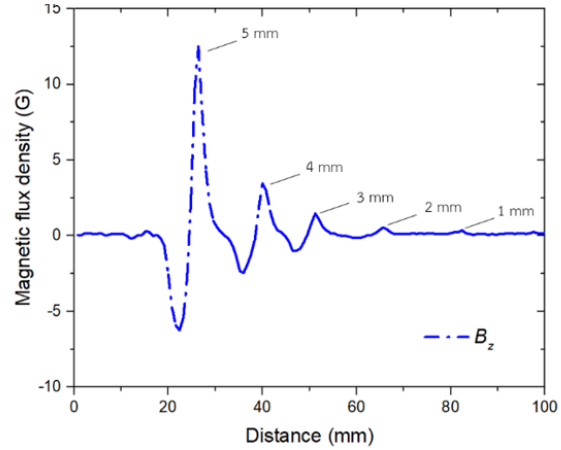
รูปที่ 7 การจำลองรอยความเสียหายบนลวดเหล็กที่เกลียวที่ความลึก 5 ระดับ



รูปที่ 8 แผนผังการทดลอง



(ก) ทิศทางแนวนอน (B_x)



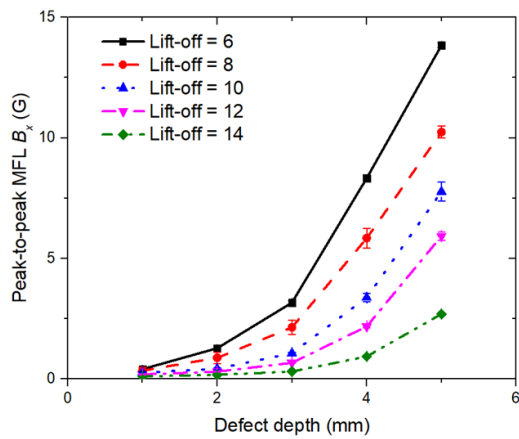
(ข) ทิศทางแนวรัศมี (B_z)

รูปที่ 9 ตัวอย่างของสัญญาณการตรวจผ่านรอยความเสียหายบนลวดเหล็กตีเกลียวที่ความลึก 5 ระดับ

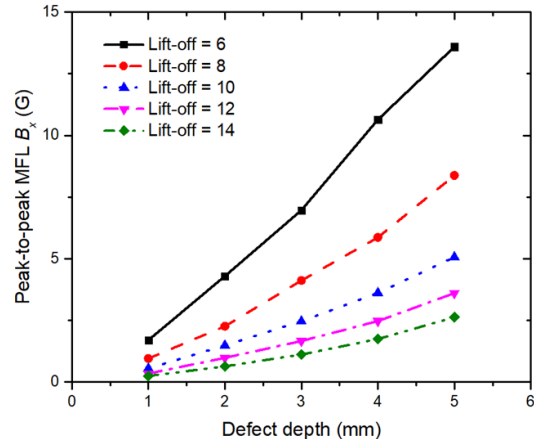
4.3 ผลการทดลองและการยืนยันผลคำนวณแบบจำลอง

ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจจับการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กบนลวดเหล็กตีเกลียวจากการทดลองเพื่อยืนยันผลการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแบบจำลองในหัวข้อที่ 3 ตามระดับความลึก

ของรอยความเสียหาย และมีระยะห่าง (lift-off) ในการตรวจสอบโดยพิจารณาค่าระหว่างจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดของสัญญาณ (Peak-to-peak) ทั้งในทิศทาง B_x และ B_z ดังรูปที่ 10 และ 11

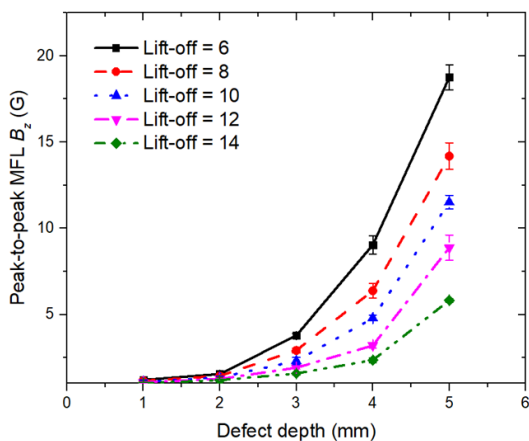


(ก) ผลการทดลอง

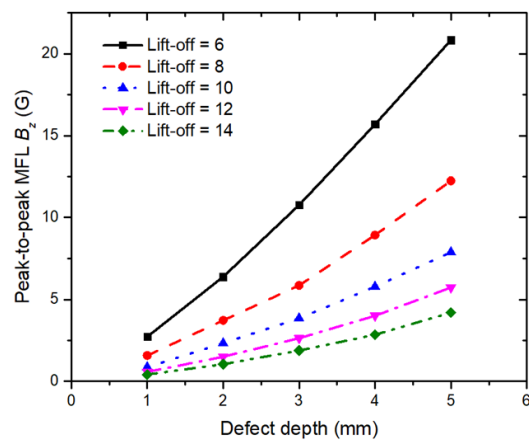


(ข) คำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข

รูปที่ 10 ความสามารถในการตรวจสอบรอยความเสียหาย ทิศทางแนวนอน (B_x)



(ก) ผลการทดลอง



(ข) คำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข

รูปที่ 11 ความสามารถในการตรวจสอบรอยความเสียหาย ทิศทางแนวรัศมี (B_z)

พบว่าสัญญาณ MFL ในทิศทาง $B_{x(p-p)}$ จากการทดลอง ที่ระดับความลึกของรอยความเสียหาย 5 มิลลิเมตร จะมีขนาดของสัญญาณสูงที่สุดเมื่อมีระยะห่างของการตรวจสอบที่ 6 มิลลิเมตร และลดลงอย่างต่อเนื่องตามความลึกของรอยความเสียหายที่ลดลง ตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่อระยะห่างของการตรวจสอบเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้สัญญาณ $B_{x(p-p)}$ มีแนวโน้มที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณแบบจำลองในรูปที่ 10 (ข) ในขณะที่เดียวกันสัญญาณ MFL ที่ได้จากการทดลองในทิศทาง $B_{z(p-p)}$ ดังแสดงในรูปที่ 11 ก็มีรูปแบบและทิศทางของสัญญาณการตรวจ $B_{z(p-p)}$ ที่สอดคล้องและคล้ายคลึงกันระหว่างสัญญาณจากการทดลองและสัญญาณที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ยังพบว่าระดับของสัญญาณการตรวจสอบด้วย MFL ในทิศทาง B_z มีระดับสัญญาณสูงกว่าสัญญาณ B_x ซึ่งเป็นไปตามผลที่ได้จากการคำนวณแบบจำลอง

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของสายเคเบิลและลวดเหล็กกล้าที่เกลียวที่อาศัยการตรวจจับการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กเพื่อให้สามารถตรวจสอบรอยความเสียหายที่มีความลึกหลายระดับและมีระยะห่างในการตรวจสอบที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาผ่านแบบจำลองเชิงตัวเลข ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) พร้อมทั้งยืนยันผลการคำนวณแบบจำลองด้วยการทดลอง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. สัญญาณการตรวจสอบที่เกิดจากรอยความเสียหายในทิศทางตามแนวนอน (B_x) แนวสัมผัส (B_y) และแนวรัศมี (B_z) มีขนาดและรูปแบบของสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยสัญญาณ B_x และ B_z มีความสำคัญต่อการตรวจสอบอย่างมีนัยสำคัญ
2. ระยะห่างของการตรวจสอบ (Lift-off) มีผลต่อขนาดของสัญญาณทั้ง B_x และ B_z
3. การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการนี้ สามารถตรวจสอบและแยกแยะตำแหน่งที่มีระดับความลึกที่แตกต่างกันได้
4. การทดลองเพื่อยืนยันผลมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)
5. สามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงเทคนิคการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากความเสียหายของสายเคเบิลและลวดเหล็กกล้าที่เกลียวได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์ สำหรับการศึกษาและทดลองในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เชิดพงษ์ จอมเดช (2545). การตรวจสอบสายเคเบิลโดยวิธีวัดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 5 - 17.
- [2] กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม (2559). แผนแม่บทการพัฒนาทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 - 2579)
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กระทรวงคมนาคม (2553). โครงการศึกษาปรับแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางราง ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล
- [4] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2545). มทข. 102 - 2545 มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรง
- [5] Bethlehem Wire Rope (2000). Bethlehem Structural Products (Structural Strand and Wire Rope). Williamsport Wire Rope Works, Williamsport, pp. 2-7.
- [6] Peng-Chi Peng, Chung-Yue Wang (2015). Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges. NDT&E International, Vol. 75, pp. 80-86.
- [7] Bo Feng, Jianbo Wu, Hongming Tu, Jian Tang and Yihua Kang (2022). A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing. Materials, 15.
- [8] ASTM E1571-01 (2001). Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope, ASTM Standard, Vol. 3.03, Section 15, pp. 848-852.
- [9] Jomdecha C. and Prateepasen A. (2009). Design of Modified electromagnetic Main Flux for Steel Wire rope Inspection. NDT&E International, Volume 42, Issue 1, pp. 77-83.
- [10] Tang, J., Wang, R., Liu, B., & Kang, Y. (2021). A novel magnetic flux leakage method based on the ferromagnetic lift-off layer with through groove. *Sensors and Actuators A: Physical*, 332, 113091.
- [11] Zhang, Y., Jing, L., Xu, W., Zhan, W., & Tan, J. (2019). A sensor for broken wire detection of steel wire ropes based on the magnetic concentrating principle. *Sensors*, 19 (17), 3763.

- [12] Liu, S., Sun, Y., Ma, W., Xie, F., Jiang, X., He, L., & Kang, Y. (2019). A new signal processing method based on notch filtering and wavelet denoising in wire rope inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38, pp. 1-14.
- [13] Chen, Z., Jomdecha, C., Xie, S. (2019). Eddy Current Testing. In: Ida, N., Meyendorf, N. (eds) *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7_40