บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ พบว่า วงจรเปิด/ปิดพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใหม่นี้ สามารถส่งสัญญาณพัลส์ PWM ไปยังโลหะและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ โดยในเบื้องต้น จะทำการทดสอบโลหะ 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก อีกทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 สามารถทำงานตามต้องการและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ด้านบวกต่างๆ กันได้เป็นอย่างดี โดยในงานวิจัยนี้เลือกอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะของโลหะจากการใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยใช้ค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด หลังจากนั้นได้ทำการจัดเก็บค่าและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับ เพื่อสร้างกราฟผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า โลหะแต่ละชนิดให้เส้นกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งกราฟผลตอบสนองของโลหะเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สัญญาณพัลส์ PWM ที่สร้างขึ้นสามารถส่งออกไปและตรวจจับโลหะแต่ละชนิดได้ในระยะทางไกลสุดเท่ากับ 7 - 8 ซม. และ 11 ซม. สำหรับโลหะขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ตามลำดับ โดยกราฟผลตอบสนองของแผ่นเหล็กจะมีลักษณะที่คล้ายกับกราฟผลตอบสนองของแผ่นอลูมิเนียม กล่าวคือ เมื่อค่าความกว้างของพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก 9.636 - 160.6 ไมโครวินาที พบว่า ค่า $\Delta T_discharge$ มีการเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและความชันเป็นลบมากขึ้น แต่ทั้งนี้ ค่าบวกและลบของค่า $\Delta T_discharge$ ที่ได้รับจากแผ่นเหล็กจะมีค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่า $\Delta T_discharge$ ของแผ่นอลูมิเนียม ตามลำดับ ส่วนกราฟผลตอบสนองของแผ่นทองแดงจะให้ค่า $\Delta T_discharge$ ที่เป็นบวกเท่านั้น มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็ก และเมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าไกลออกไปมากขึ้นเท่าใด ค่า $\Delta T_discharge$ ที่ได้รับจากแผ่นทองแดงก็จะยิ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้นเท่านั้น นั่นคือขดลวดไม่สามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ นอกจากนี้ ระยะห่างในการทดสอบยังขึ้นอยู่กับขนาดของโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบด้วย และ ยิ่งถ้าขนาดของโลหะและขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้งานมีค่ามากขึ้นเท่าใด ระยะทางที่ตรวจจับโลหะได้ก็มีระยะทางที่ไกลมากขึ้นเท่านั้น

5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

ผลงานที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้ คือ วงจรเปิด/พัลส์สัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดที่ทำหน้าที่ส่งผ่านและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นจากโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก, โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM รวมไปถึงวิธีที่ใช้ในการอ่านและบันทึกค่าเพื่อนำไปสร้างกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะแต่ละชนิด ดังนั้น งานวิจัยต่อไปที่ควรจะกระทำเพิ่มเติมในช่วงเริ่มต้นต่อไป คือ การนำค่าข้อมูลหรือกราฟผลตอบสนองเหล่านี้ไปสร้างสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equations) ของโลหะทั้ง 3 ชนิด และการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะของประเทศไทยในอนาคตได้จริง เพื่อเป็นการออกแบบ การทำวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทยเอง ลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าอุปกรณ์และวงจรใช้งานที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บผลการทดสอบให้ครบตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัยในครั้งนี้แล้ว พบว่า การเพิ่มระยะทางในการตรวจจับโลหะให้ไกลมากขึ้นสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

5.3.1 โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการพันขดลวดให้มากกว่า 35 รอบ แต่ยังคงใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเท่าเดิมคือเท่ากับ 15 ซม.

5.3.2 โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้มากกว่า 15 ซม. แต่ยังคงใช้จำนวนรอบของการพันขดลวดเท่าเดิมคือ 35 รอบ

การกระทำ 2 วิธีดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่จะส่งออกไปจากขดลวดนั่นเอง จึงทำให้สามารถตรวจจับโลหะได้ไกลมากยิ่งขึ้น การเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้มากขึ้นนั้นไม่มีผลต่อการตรวจจับโลหะให้ไกลมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า สัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) มีผลทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนตลอดเวลา จึงทำให้ได้รับผลการทดลองที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นในการทดลอง ควรจะเลือกใช้แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 Vdc จะทำให้ได้รับผลการทดลองที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากความคิดเห็นของผู้วิจัยในกรณีที่โลหะที่นำมาใช้ในการทดสอบไม่ใช่ อลูมิเนียม, ทองแดง และเหล็ก คือ ถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบมีโลหะจำพวกเหล็กผสมอยู่ (Ferro-Magnetic Material) แนวโน้มของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะมีแนวโน้มที่เหมือนกับกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับพบเหล็กบริสุทธิ์ในงานวิจัยฉบับนี้ แต่ถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบมีโลหะชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferro-Magnetic Material) แนวโน้มของกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะมีค่าแตกต่างกันไป เพียงแต่พยากรณ์ได้เลยว่า "วัสดุต่างชนิดกันที่มีโลหะเจือปนอยู่จะมีกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันแน่นอน" อีกทั้ง ปริมาณของเนื้อโลหะที่เจือปนอยู่ในวัสดุแต่ละชนิดก็มีผลต่อระยะในการตรวจจับได้และค่าระยะเวลาการตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดด้วย

5.4 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัย

องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้ มีดังนี้

5.4.1 รู้และเข้าใจในหลักการออกแบบและหลักการทำงานที่ใช้ในการสร้างวงจรเปิด/พัลส์สัญญาณ PWM แบบใหม่ให้แก่เครื่องตรวจจับโลหะแบบการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ RLC และไอซีเป็นจำนวนมาก อีกทั้งไม่ต้องเสียเวลาในการปรับจูนเป็นเวลานาน

5.4.2 เข้าใจหลักการทำงานที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกต่างๆ กัน เพื่อหาค่าระยะเวลาการตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะแต่ละชนิด ซึ่งยังไม่เคยมีบทความใดนำเสนอก่อนหน้านี้

5.4.3 มีทักษะการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้งานจริงในทางปฏิบัติมากขึ้น โดยในที่นี้ ได้ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกต่างๆ กัน รวมถึงทำการอ่านค่าและบันทึกค่าระยะเวลาการตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะแต่ละชนิด แล้วนำไปสู่การพล็อตกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก ได้สำเร็จ โดยทำการตรวจจับโลหะที่วางอยู่ในอากาศและที่วางอยู่ใต้พื้นดินได้