

วงจรเปิด/ปิดพัลส์และการโปรแกรมสำหรับตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลา
ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์

สุทัศน์ แขกระจำง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2554

**Coil Driver and Programming for Detecting Time Response of
Coil Current Generated from Metal by Using Pulse Induction**

Sutas Kaegrajang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Computer and Telecommunication Engineering
Graduate School, Dhurakij Pundit University**

2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่และดูแลเป็นอย่างมากจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์บุญยวีร์ จามจรีกุล ซึ่งท่านคอยให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ นอกจากนี้ กระผมใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภักตะพันธ์ ผู้อำนวยการหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และเอาใจใส่นักศึกษาทุกๆ คนเสมอมา

ขอขอบคุณ อ.ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ และ อ.ดร.ชนัญ จารุวิทย์โกวิท กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยดำเนินเรื่องต่างๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโท และ นายจตุรงค์ ปุริสาร นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ที่ให้การช่วยเหลือและคำแนะนำที่มีประโยชน์ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนบุคคลในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาการศึกษาจบจนสำเร็จการศึกษา

พันตรี สุทัศน์ แภกระจ่าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector).....	4
2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน.....	8
2.2.1 วิเคราะห์การทำงานในสภาวะปิดวงจร.....	8
2.2.2 วิเคราะห์การทำงานในสภาวะเปิดวงจร.....	9
2.3 การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM.....	10
2.3.1 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะปิดวงจร.....	11
2.3.2 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะเปิดวงจร.....	11
2.4 ทฤษฎีการผันเส้นลวดเป็นรูปวงกลม.....	12
2.5 การตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์.....	14
2.6 วงจรวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ลวด.....	16
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	22
3.1 การคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM	22
3.2 ขั้นตอนวิธีในการใช้งาน ไทมเมอร์ 0 และ ไทมเมอร์ 1.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอ.....	24
3.4 อัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	26
3.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี.....	28
4. ผลการศึกษา.....	32
4.1 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นอลูมิเนียมที่วางในอากาศ.....	33
4.2 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงที่วางในอากาศ.....	36
4.3 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กที่วางในอากาศ.....	40
4.4 ผลการทดสอบการจำแนกโลหะที่วางในพื้นที่.....	41
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย.....	44
5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย.....	45
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย.....	45
5.4 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัย.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความกว้างพัลส์ด้านบวกในหน่วยของไทมเมอร์ 0 และหน่วยเวลา μs	26
4.1 ชนิดของแผ่นโลหะและสีของหลอด LED ที่ใช้แสดงผลการตรวจจับพบโลหะ.....	42
ข ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว.....	57
ค ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว....	60
ง ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว.....	63
จ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว.....	66
ฉ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว.....	69
ช ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว.....	72
ซ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว.....	75
ฌ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว.....	77
ญ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF.....	6
2.2 วงจรแอนะล็อกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ในเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF....	6
2.3 ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อโลหะชนิดต่างๆ.....	6
2.4 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI.....	7
2.5 วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าเสนอ.....	8
2.6 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสภาวะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)	9
2.7 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสภาวะที่ Contact 2 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (เปิดวงจร)	9
2.8 วงจรไฟฟ้าที่พัฒนาเพิ่มจากวงจรรูปที่ 2.5 โดยมีการต่อทรานซิสเตอร์และไดโอด.....	10
2.9 ทรานซิสเตอร์ทำงาน โดยอยู่ในสภาวะปิดวงจร.....	11
2.10 ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน อยู่ในสภาวะเปิดวงจร.....	11
2.11 คุณสมบัติทางกายภาพในทางทฤษฎีของขดลวดที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆ.....	13
2.12 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสภาวะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)	14
2.13 วงจรที่ต่อเอาต์พุตของออปแอมป์เข้าขาอินเทอร์รัปต์ภายนอก 0 ของ ATmega168.....	15
2.14 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (Coil Driver)	17
3.1 อัลกอริทึมหาค่า $T_{\text{discharge}}_{\text{air}}$	27
3.2 อัลกอริทึมหาค่า $T_{\text{discharge}}_{\text{metal}}$ และ $\Delta T_{\text{discharge}}$	28
3.3 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี.....	30
3.4 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศ.....	31
3.5 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในพื้นที่.....	31
4.1 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่น่าเสนอกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP.....	32
4.2 เครื่องมือวัดและการเชื่อมต่อในการทดสอบ.....	32
4.3 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จากการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียม 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.....	34
4.4 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียม 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 8 ซม.....	34
4.5 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จากการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียม 4x4 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.....	35
4.6 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียม 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม....	35
4.7 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จากการตรวจจับแผ่นทองแดง 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.....	37
4.8 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดง 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 7 ซม.....	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จากการตรวจจับแผ่นทองแดง 4x4 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.....	38
4.10 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดง 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.....	38
4.11 กราฟคุณลักษณะการตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 ซม.....	39
4.12 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นเหล็ก 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 7 ซม.....	39
4.13 กราฟคุณลักษณะการตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 ซม....	40
4.14 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นเหล็ก 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.....	41
4.15 ผลการตรวจจับพบแผ่นอลูมิเนียมที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีแดงสว่าง....	42
4.16 ผลการตรวจจับพบแผ่นทองแดงที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีฟ้าสว่าง.....	42
4.17 ผลการตรวจจับพบแผ่นเหล็กที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีเขียวสว่าง.....	43

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรเปิด/ปิดพัลส์และการโปรแกรมสำหรับตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์
ชื่อผู้เขียน	พันตรีสุทัศน์ แยกกระจ่าง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปยุตยวีร์ จามจรีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ โดยมีเป้าหมายในการทำวิจัย คือ 1) สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปิด/ปิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านไปยังโลหะที่วางห่างออกไปไม่เกิน 15 ซม. ได้ 2) เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ให้สามารถควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างขนาดต่างๆ ในการทดสอบหาคุณลักษณะของโลหะแต่ละชนิดได้ 3) หาวิธีในการอ่านค่า จัดเก็บค่า และวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อที่จะสร้างกราฟที่ระบุถึงผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะ 3 ชนิดที่ทดสอบได้ และ 4) เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะในอนาคตต่อไปจากการทดสอบ พบว่า วงจรเปิด/ปิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดและโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานตามที่ต้องการได้เป็นอย่างดีและโลหะแต่ละชนิดให้เส้นกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยผลตอบสนองของโลหะแต่ละชนิด ณ ระยะห่างแต่ละค่าจะถูกอ่านค่าได้แน่นอน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์และถูกนำมาพล็อตกราฟ ซึ่งกราฟเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยชิ้นงานที่นำเสนอนี้สามารถตรวจจับโลหะที่ทดสอบทั้ง 3 ชนิดที่วางในอากาศและวางในพื้นที่ทรายได้สำเร็จ รวมถึงสามารถระบุโลหะ อลูมิเนียม, ทองแดง และเหล็กได้อย่างถูกต้องผ่านทางหลอด LED ได้แก่ สีแดง, สีฟ้า และสีเขียว ตามลำดับ

Thesis Title	Coil Driver and Programming for Detecting Time Response of Coil Current Generated from Metal by Using Pulse Induction
Author	Maj.Sutas Kaegrajang
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Punyawati Jamjareekul
Department	Computer and Telecommunication Engineering
Academic Year	2010

ABSTRACT

This thesis proposes a study of zero-crossing time response of coil current generated from each kind of metal by using pulse induction (PI). The goals of this research are as follows: 1) building an electronic circuit to on/off PWM (pulse width modulation) signal which passes a round coil and propagates toward a metal which are placed far away within 15 cm, 2) writing an AVR ATmega168 microcontroller program to control the operation and generate PWM signals whose widths are varied so as to test and finding out the characteristic of 3 tested metal, 3) finding out a technique for reading, storing, and analyzes the experimented results in order to construct many graphs which identify the falling edge time response of coil current generated from each metal, and 4) guideline a building metal detector in the future. The experimental results have been shown that both the coil driver and the microcontroller programming, proposed in this research, can be operated completely as desired and each metal has owned its zero-crossing time response of current on coil which is differentiated each other absolutely. A lot of response values of each metal at each distance are read successfully by microcontroller and are plotted many graphs. The tendencies of these graphs have the same direction. The maximum detectable ranges of three tested metal whose sizes are 4x4 square inches and 2x2 square inches and are placed in air, are equal to 11 cm and 7 cm, respectively. This proposed device can detect three tested metal which are placed in free space as well as in ground successfully, and can identify aluminium, copper, and iron exactly through LED's, i.e., red, blue, and green, respectively.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector) จนทำให้เกิดคำเรียกรวมกันว่า “Pulse Induction Metal Detector” หลักการทำงานของเครื่องเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ คือ พัลส์กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งออกไปยังขดลวดส่ง หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพัลส์กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิด Eddy Current ในโลหะที่วางใกล้ๆ กับขดลวด ถ้าสนามแม่เหล็กถูกสวิตช์ได้ไวเพียงพอ Eddy Current ก็สามารถที่จะถูกตรวจจับที่ขดลวดรับ โดยกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่ขดลวดถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกชนิดของโลหะได้

การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์นั้นได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในตำราต่างประเทศที่แต่งขึ้นโดย I. Grant, F.S. และ West, G.F.¹ ต่อมา J. A. Corbyn^{2, 3} ได้พัฒนาและนำเสนอวงจรตรวจจับโลหะขึ้นมาใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก ทำให้การทดสอบคุณสมบัติในการใช้งานนั้นกระทำได้อย่างมาก ต้องเสียเวลาปรับจูนแต่งมาก ก่อนที่จะใช้งานได้จริงและมีคุณสมบัติตามความต้องการ

ต่อจากนั้น ได้มีนักวิจัยและบริษัทต่างๆ จากหลายประเทศจำนวนมากทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การสร้างเพื่อจำหน่าย^{4, 5} และเน้นจดสิทธิบัตรเพื่อขายลิขสิทธิ์ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ⁶ ทำให้รายละเอียดการออกแบบ การสร้างและการทำงาน โดยเฉพาะวิธีการทดสอบก่อนการใช้งานได้จริงได้ถูกเปิดเผยและเผยแพร่ออกมาในเชิงบทความและวารสารเชิงวิชาการน้อยมาก

¹ I. Grant, F. S. and West, G. F. (1965) **Interpretation Theory in Applied Geophysics** McGraw-Hill.

² J. A. Corbyn (1980) “Pulse Induction Metal Detector” **Wireless World**.

³ J. A. Corbyn (1980) “Pulse Induction Metal Detector - 2” **Wireless World**. pp.1-3.

⁴ DeepTech Metal Detectors “MEGAPULSE III - Pulse Induction Metal Detector” from <http://www.deeptech-bg.com/megapulseIII/MegapulseIII.pdf>

⁵ DeepTech Metal Detectors (2007). “Coil and Search Head Design – Patents and Utility Models (Part 1)” from www.deeptech-bg.com/search_coils.pdf

⁶ Patents of Metal Detector from <http://www.freepatentsonline.com/D356044.html>

ซึ่งในที่นี้ อาจจะกล่าวได้ว่า แทบจะไม่มีใครทราบได้เลยว่าเครื่องตรวจจับโลหะ มีหลักการออกแบบวงจรที่ใช้งานและมีวิธีทดสอบก่อนการใช้งานได้จริงอย่างไร ประเด็นที่ทราบ มีเพียงข้อเดียว คือ วิธีการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะในทางปฏิบัติ เมื่อซื้อเครื่องตรวจจับโลหะจากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายมาแล้วเท่านั้น ซึ่งแน่นอนที่สุด การใช้งานก็จะเป็นไปตามคำแนะนำการใช้เครื่องที่กำหนดตายตัวมาแล้วทั้งนั้น ไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้ มีขอบเขตการใช้งานที่จำกัด และที่สำคัญต้องนำเข้าเครื่องตรวจจับโลหะจากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายต่างประเทศเท่านั้น เนื่องจากการวิจัย ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะดังกล่าวทำได้ยากและต้องผ่านการทดสอบใช้งานจริงเป็นเวลานาน จึงแทบจะไม่มีนักวิจัยท่านใดในประเทศไทยให้ความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะขึ้นมาใช้งานเองหรือจำหน่ายในประเทศไทย

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการ ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใหม่เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรพัลส์ที่จะส่งต่อไปแก่ขดลวดและเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ขึ้นมาเพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ควบคุมการทำงาน รวมถึงจัดเก็บค่าระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด โดยสัญญาณ PWM ที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกมีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 3 หน่วยของไมโครวินาที (คิดเป็น 9.636 ไมโครวินาที) ไปจนถึง 50 หน่วยของไมโครวินาที (คิดเป็น 160.6 ไมโครวินาที) เพื่อที่จะทำให้รู้ได้ว่าโลหะแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ อย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แทนวงจรแอนะล็อกที่มีใช้งานในปัจจุบัน
- 2 เพื่อออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ PWM ส่งผ่านขดลวดไปยังโลหะที่อยู่ห่างออกไปได้
- 3 เพื่อเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถควบคุมการทำงานทั้งหมดและสามารถสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ ได้
- 4 เพื่อหาวิธีที่ใช้ในการอ่านค่า จัดเก็บค่า และวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับจากโลหะแต่ละชนิดได้
- 5 เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปิด/ปิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านไปยัง โลหะที่วางห่างออกไปไม่เกิน 15 ซม. ได้
- 2 เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถควบคุมการทำงาน และสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างขนาดต่างๆ ในการทดสอบหาคุณลักษณะของโลหะแต่ละ ชนิดได้
- 3 ทำการทดสอบกับโลหะ 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก โดยเลือกใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต AVR ATmega168
- 4 ทาวิธีในการอ่านค่าและจัดเก็บค่าผลตอบสนองตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ได้รับ จากการตรวจจับโลหะ 3 ชนิดที่วางในอากาศและในพื้นที่ทราย
- 5 จำแนกโลหะ 3 ชนิดที่วางในพื้นที่ทราย โดยแสดงผ่านหลอดแอลอีดี 3 ดวง (3 สี) ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถนำไปใช้งานได้จริงเพื่อตรวจจับโลหะจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก ในระยะใกล้ไม่เกิน 15 ซม. ได้
- 2 สามารถนำผลตอบสนองที่ได้รับไปสร้างสมการคุณลักษณะเฉพาะสำหรับโลหะแต่ละชนิด เพื่อใช้งานจริงได้
- 3 เป็นแนวทางที่สำคัญในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้งานได้จริงได้ในอนาคต

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1 สํารวจวรรณกรรมปริทัศน์ที่เกี่ยวกับหลักการทํางานและวงจรที่ใช้งานของเครื่องตรวจจับ โลหะแบบต่างๆ ที่มีขายและนำเสนอที่ผ่านมา
- 2 ออกแบบวงจรเปิด/ปิดสัญญาณ PWM และเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต AVR ATmega168
- 3 สร้างวงจรเปิด/ปิดสัญญาณ PWM แล้วเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปและ ขดลวดให้เป็นชิ้นงานที่นำเสนอ
- 4 ทดสอบการทำงานและปรับแต่งชิ้นงานให้สมบูรณ์
- 5 ทดสอบใช้งานจริง บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
- 6 จัดทำรายงานความคืบหน้าและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวดและการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ ดังนั้นในบทที่ 2 นี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อย่อยต่างๆ ดังนี้ หัวข้อที่ 2.1 กล่าวถึงเครื่องตรวจจับโลหะที่มีการขายหรือใช้งานในปัจจุบัน ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM และทฤษฎีการพันเส้นลวดเป็นรูปวงกลมจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2, 2.3, และ 2.4 ตามลำดับ ส่วนหัวข้อที่ 2.5 และ 2.6 จะกล่าวถึงการตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์และวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แก่ขดลวด ส่วนหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อย่อยมีดังนี้

2.1 เครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector)¹

เครื่องตรวจจับโลหะนั้นเป็นเครื่องที่ถูกค้นพบโดยวิศวกรชาวต่างชาติมานานไม่ต่ำกว่า 50 ปีและมีขายในเชิงพาณิชย์มานานนับสิบปี แต่แทบจะไม่มีเปิดเผยข้อมูลหรือเอกสารใดเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะออกสู่สาธารณชนหรือเผยแพร่ข้อมูลทางเทคนิคในการสร้างและออกแบบในอินเทอร์เน็ตเลย มีเพียงงานวิจัยที่ตีพิมพ์หลายสิบปีที่ผ่านมาและวงจรในเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขาย (จดสิทธิบัตรแล้ว) ที่นำเสนอเป็นวงจรแอนะล็อกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ในการสร้าง ซึ่งเป็นวงจรที่ยุ่งยาก ซับซ้อน ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน รวมไปถึงพัฒนาต่อเพื่อใช้งานได้ยากมาก ในที่นี้ อาจจะกล่าวได้ว่า แทบจะไม่มีใครทราบได้เลยว่าเครื่องตรวจจับโลหะมีหลักการออกแบบวงจรที่ใช้งานและมีวิธีทดสอบก่อนการใช้งาน ได้จริงอย่างไร ประเด็นที่ทราบมีเพียงข้อเดียว คือ “วิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ เมื่อซื้อเครื่องตรวจจับโลหะมาแล้วเท่านั้น” ซึ่งแน่นอนที่สุด การใช้งานก็จะเป็นไปตามคำแนะนำการใช้เครื่องที่กำหนดตายตัว ไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้ มีการใช้งานที่จำกัด และที่สำคัญต้องนำเข้าเครื่องจากต่างประเทศเท่านั้น

¹ สิทธิศักดิ์ ลีลาถาวรชัย. เครื่องตรวจจับโลหะ. จาก

อีกทั้ง เนื่องจากการวิจัย ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะดังกล่าวทำได้ยาก และต้องทดสอบใช้งาน ได้จริงเป็นเวลานาน จึงแทบจะไม่มีนักวิจัยท่านใดในประเทศไทยให้ความสนใจที่จะวิจัยเพื่อนำเสนอบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ พัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะขึ้นมาใช้งานเอง และขายเองในประเทศไทย ซึ่งแน่นอนที่สุด ประโยชน์ที่ได้รับจากการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ นั้นมีมากมายหลายประการและคุ้มค่าต่อการสร้างขึ้นมาใช้งานเองภายในประเทศ

จากการค้นหาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขายในขณะนี้ และเผยแพร่ข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต พบว่า ในปัจจุบันนี้ เครื่องตรวจจับโลหะถูกสร้างออกมาขายมีมากมายหลายชนิด โดยแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในที่นี้ จะอธิบายชนิดของเครื่องตรวจจับโลหะที่ถูกจำแนกออกตามเทคโนโลยีที่ใช้ทำงาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.1.1 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF (Very Low Frequency)

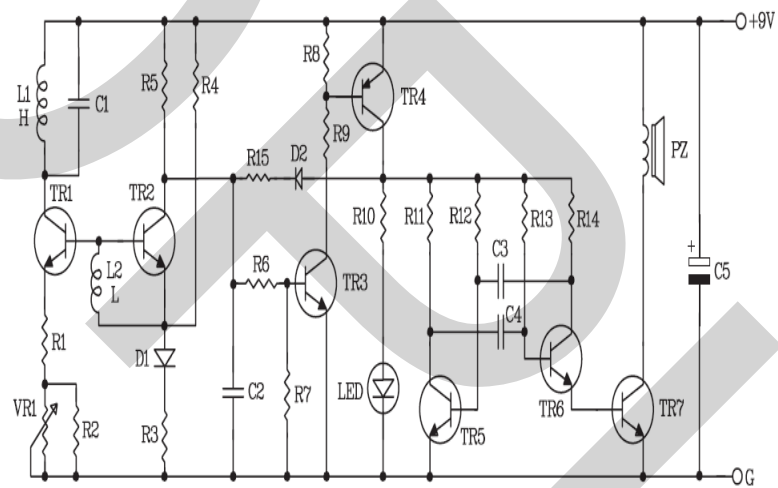
รูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แสดงรูปร่างและวงจรใช้งานของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF โดยเป็นเครื่องที่ใช้คลื่นวิทยุย่าน VLF (ย่านความถี่ต่ำมาก) ส่งไปยังโลหะ ส่วนของคอยล์จะประกอบด้วยขดลวดที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน 2 ขด คือ คอยล์ส่ง (transmitter Coil) เป็นขดลวดอยู่รอบนอก ทำหน้าที่ส่งคลื่นที่สร้างจากกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ประมาณ 6.6 kHz คอยล์รับ (Receiver Coil) เป็นขดลวดอยู่รอบใน ทำหน้าที่เสมือนเสาอากาศที่คอยรับสัญญาณ

หลักการทำงาน คือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในคอยล์ส่ง จะเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบคอยล์ โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งลงไปยังพื้นดิน เมื่อคลื่นที่ส่งออกไปจากคอยล์ส่งกระทบกับโลหะ จะเกิดการสะท้อนของคลื่นกลับขึ้นมาด้วยทิศทางการโพลาไรซ์ที่ตรงข้ามกับคลื่นที่ส่งออกไป ทำให้คอยล์รับที่รับได้เฉพาะคลื่นที่มีการโพลาไรซ์ในทิศทางหนึ่งๆ สามารถแยกแยะได้ว่าคลื่นที่รับได้นั้นเป็นคลื่นจากคอยล์ส่ง หรือคลื่นที่สะท้อนมาจากโลหะ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณและออกทางลำโพง

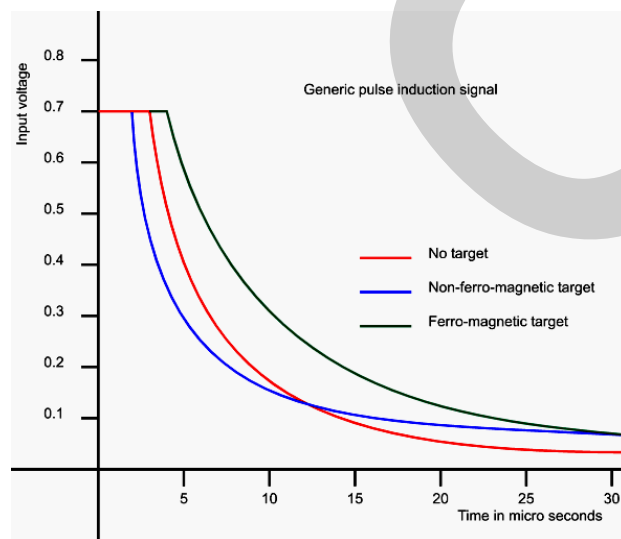
นอกจากนี้ เครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF นี้ยังสามารถแยกแยะชนิดของวัตถุได้โดยอาศัยการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ส่งออกไป (Phase Shifting) ซึ่งการเลื่อนเฟสนี้เกิดขึ้นจากปัจจัย 2 ประการ คือ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทาน ซึ่งวัตถุที่นำไฟฟ้าทุกชนิดมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานคงที่เสมอ โดยอาศัยหลักการที่ว่า วัตถุที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง จะมีการเลื่อนเฟสได้มาก ส่วนวัตถุที่มีความต้านทานสูง จะมีการเลื่อนเฟสน้อย จึงทำให้สามารถแยกแยะความแตกต่างของโลหะได้ ซึ่งจะตรวจจับสัญญาณว่ามีการเลื่อนเฟสไปเท่าไรและประมวลผลว่าวัตถุที่พบเป็นโลหะหรือขยะ โดยการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อโลหะมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 รูปร่างของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF



รูปที่ 2.2 วงจรแอนะล็อกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ในเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF



รูปที่ 2.3 ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อโลหะชนิดต่างๆ

2.1.2 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI (Pulse Induction)

เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI (Pulse Induction) นี้มีโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โดยเครื่องดังกล่าวจะประกอบไปด้วยคอยล์หนึ่งขดที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและรับ คอยล์จะส่งพลังงานเป็นลูกคลื่นสั้นๆ ออกไป เมื่อแอมพลิจูดของลูกคลื่นกระเพื่อมขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุด มันจะลดความเข้มลง โดยกลับทิศทางอย่างทันทีทันใด เกิดเป็นลูกคลื่นที่มีลักษณะแหลมมาก ขณะที่เครื่องตรวจอยู่เหนือโลหะ ลูกคลื่นจะวิ่งไปกระทบกับวัตถุ และสะท้อนกลับมา เครื่องจะสามารถแยกแยะได้ว่าระยะเวลาของการสะท้อนยาวหรือสั้น ถ้าระยะเวลายาวกว่าปกติ จะแสดงว่า วัตถุที่อยู่ใต้พื้นดินนั้นเป็นโลหะ จากนั้นสัญญาณที่สะท้อนกลับมา จะถูกส่งผ่านไปที่เครื่องขยายเสียง และขับออกทางลำโพง ข้อเสียของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI คือ เวลาในการสะท้อนนั้นไม่สามารถแยกแยะชนิดของโลหะได้ แต่มันจะใช้ได้ดีในตัวกลางที่มีการนำไฟฟ้าสูงและสามารถหาโลหะที่อยู่ใต้ดินลึกๆได้ ซึ่งเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF ทำไม่ได้

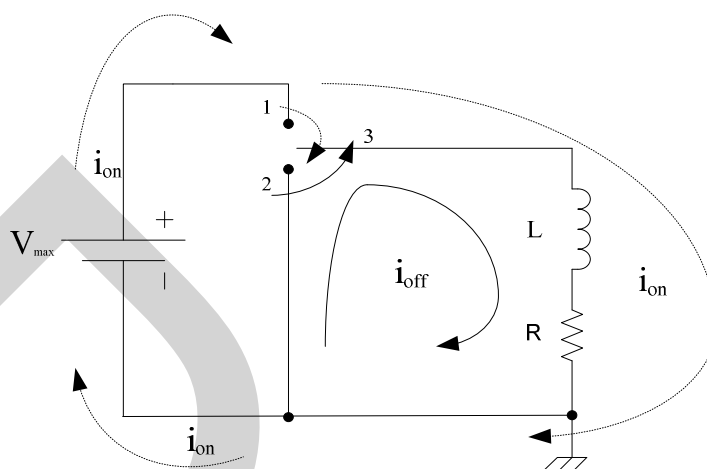


รูปที่ 2.4 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI

2.1.3 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ BFO (Beat Frequency Oscillation)

เครื่องตรวจโลหะประเภทนี้ ประกอบด้วยคอยล์ 2 ขด คือคอยล์ใหญ่ และคอยล์เล็ก โดยคอยล์อันใหญ่เป็นตัวส่งสัญญาณ ส่วนคอยล์อันเล็กที่อยู่ในกล่องควบคุมจะเป็นตัวรับสัญญาณ คอยล์แต่ละอันจะต่อเข้ากับเครื่องออสซิลเลเตอร์ที่ให้กำเนิดความถี่เท่ากัน

ขณะที่กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านเข้าไปในคอยล์แต่ละอัน คอยล์ใหญ่จะให้เกิดคลื่นวิทยุ และส่งไปที่วัตถุใต้พื้นดิน เมื่อคลื่นกระทบกับวัตถุ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัตถุจะทำให้ความถี่ของคลื่นที่สะท้อนกลับเปลี่ยนไปเล็กน้อย เมื่อคอยล์เล็กรับคลื่นที่สะท้อนกลับมา มันจะทำการเปรียบเทียบความถี่ของออสซิลเลเตอร์กับความถี่ที่รับได้ ความแตกต่างของความถี่นี้ทำให้เกิดเสียงบีตขึ้นมาในภายหลัง



รูปที่ 2.5 วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าเสนอ

2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวงจรไฟฟ้าแบบใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัยฉบับนี้เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน¹ ที่ใช้วิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบ โดยในรูปที่ 2.5 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าเสนอ และตัวเลข 1, 2 และ 3 เป็นตัวเลขกำกับขาของทรานซิสเตอร์ โดยในที่นี้ เรานำทรานซิสเตอร์มาทำงานในโหมด Switching และต่อใช้งานเป็นแบบ Common Emitter เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเสมือนว่าเป็นการชาร์ตและดีสชาร์ตกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า/ออกจากขดลวด ตามลำดับ ดังนั้น เราสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจрдังกล่าวได้ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 Contact 1 กับ 3 ต่อกัน (ปิดวงจร) กระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่า i_{on} และ กรณีที่ 2 Contact 2 กับ 3 ต่อกัน (เปิดวงจร) กระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่า i_{off}

2.2.1 วิเคราะห์การทำงานในสถานะปิดวงจร

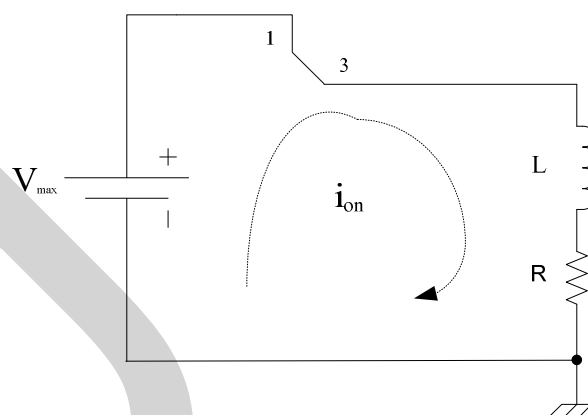
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร) โดยจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร i_{on} ได้จากการพิจารณาใช้กฎ KVL ดังนี้

$$V_{max} - L \frac{dI}{dt} = IR \quad (2.1)$$

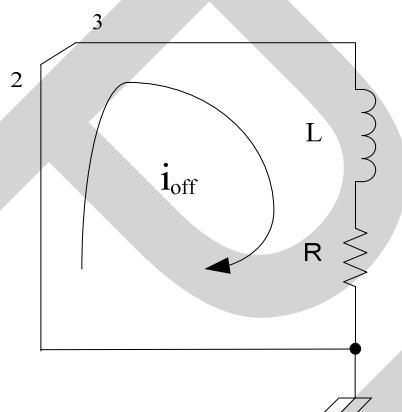
$$I = \frac{V_{max}}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) \quad (2.2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad i_{on} = I_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{โดยที่} \quad \tau = \frac{L}{R} \quad \text{และ} \quad I_0 = \frac{V_{max}}{R} \quad (2.3)$$

¹S.R. Paranjothi. (2010). **Electric Circuit Analysis**. (3rd ed.). New Age Science.



รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)



รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 2 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (เปิดวงจร)

2.2.2 วิเคราะห์การทำงานในสถานะเปิดวงจร

รูปที่ 2.7 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 2 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (เปิดวงจร) โดยจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร i_{off} ได้จากการพิจารณาใช้กฎ KVL ดังนี้

$$L \frac{dI}{dt} = IR \quad (2.4)$$

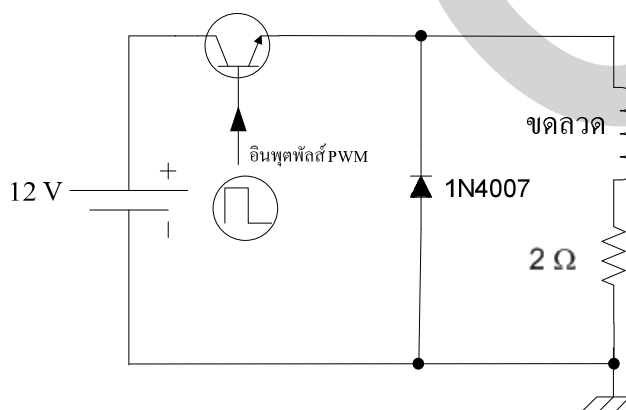
$$I_{off} = e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น } i_{off} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{โดยที่ } \tau = \frac{L}{R} \quad (2.6)$$

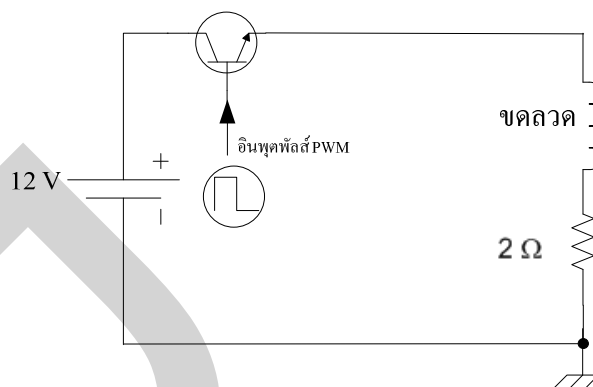
จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี พบว่าปัจจัยที่มีผลคือค่าความต้านทาน (R) และค่าความเหนี่ยวนำ (L) จากการทดลองเพื่อวัดค่าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากวงจรไฟฟ้างกล่าว โดยนำโลหะมาวางอยู่ห่างจากขดลวด ณ ระยะห่างค่าต่างๆ กัน แล้วทำการวัดค่า L เครื่องมือวัดค่า RLC ในห้องปฏิบัติการระบบวัดคุม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ พบว่า ค่า L ที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลง สาเหตุหลักที่ทำให้ค่า L เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีวัตถุโลหะมาอยู่ใกล้กับขดลวด นั้นสามารถที่จะอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีสนามแม่เหล็กดังนี้ “เมื่อขดลวดอยู่ใกล้กับโลหะ ค่า μ_r (ค่าสภาพความซึมซาบ หรือ permeability ของขดลวด) มีค่าลดลง ในทางกลับกัน ถ้าวัตถุอยู่ห่างออกไปจากโลหะไปเรื่อยๆ ค่า μ_r จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่า μ_r มีค่าเท่ากับ μ_{air} (ค่าสภาพความซึมซาบของอากาศ)” ซึ่งถ้าเลือกขดลวด (ตัวเหนี่ยวนำหรือสัญลักษณ์ L ในวงจรรูปที่ 2.5) เบอร์ใหญ่ขึ้น แต่จำนวนรอบในการพันมีค่าเท่าเดิม จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าที่สูงขึ้น ความต้านทานในวงจรมีค่าลดลง จะส่งผลดีต่อวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าเสนอคือ จะทำให้วงจรมีความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับโลหะได้ดียิ่งขึ้น

2.3 การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM

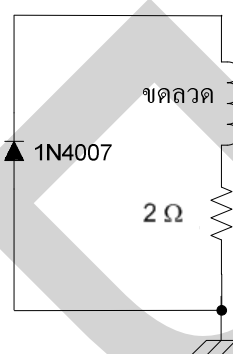
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการงานของทรานซิสเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) ในงานวิจัยฉบับนี้ จึงทำให้วงจรรูปที่ 2.5 ถูกแก้ไขใหม่โดยวางทรานซิสเตอร์และไดโอดเข้าไปเพิ่มเติมในวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยทรานซิสเตอร์ในวงจรรูปที่ 2.8 นั้นถูกกำหนดให้ทำงานภายใต้สภาวะที่กำหนด 2 ลักษณะ คือ เปิดวงจรกับปิดวงจร ซึ่งเป็นไปตามหลักการงานโดยปกติของทรานซิสเตอร์อยู่แล้ว ซึ่งการทำงานใน 2 ลักษณะดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ป้อนให้แก่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะถูกระบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 วงจรไฟฟ้าที่พัฒนาเพิ่มขึ้นจากวงจรรูปที่ 2.5 โดยมีการต่อทรานซิสเตอร์และไดโอด



รูปที่ 2.9 ทรานซิสเตอร์ทำงาน โดยอยู่ในสภาวะปิดวงจร



รูปที่ 2.10 ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน อยู่ในสภาวะเปิดวงจร

2.3.1 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะปิดวงจร

รูปที่ 2.9 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.8 ในสภาวะที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน (สภาวะปิดวงจร) กล่าวคือ มีระดับแรงดัน 5 โวลต์ป้อนเข้าที่ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ ในที่นี้ก็คือ ความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM (Pulse On) ที่ป้อนเข้าขาเบส นั่นเอง โดยในรูปที่ 2.9 นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรเป็นแบบลูปปิด จึงทำให้ขดลวด (ตัว L ในวงจรรูปที่ 2.5) เริ่มสะสมพลังงานภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่มีค่าเท่ากับระยะเวลาของความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าขาเบส

2.3.2 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะเปิดวงจร

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.8 ในสภาวะที่ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน (สภาวะเปิดวงจร) กล่าวคือ มีระดับแรงดันที่ต่ำประมาณ 0 โวลต์ป้อนเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ในที่นี้ก็คือ ความกว้างพัลส์ด้านลบของสัญญาณ PWM (Pulse Off) ที่ป้อนเข้าขาเบส นั่นเอง โดยในรูปที่ 2.10 นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรเป็นแบบลูปปิดเช่นกัน แต่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและทรานซิสเตอร์ถูกตัดออกไปจากวงจรในรูปที่ 2.8 นั่นก็หมายความว่า ขดลวด

จะคายพลังงานและในช่วงแรก แรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าคงที่ แต่หลังจากที่ขดลวดคายพลังงานใกล้จะหมด กระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย

จากการทดสอบในทางปฏิบัติ พบว่า โลหะต่างชนิดกันในระยะห่างที่ชิ้นงานรับรู้ได้ พบว่า จะมีค่าความเหนี่ยวนำไม่เท่ากัน เมื่อป้อนค่า Pulse On ที่แตกต่างกัน จะแสดงคุณลักษณะ (Characteristics) ผลตอบสนองตัดศูนย์ของค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเราทำการตรวจจับระยะเวลาเมื่อเริ่มเกิด Pulse Off ไปจนถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับ 0

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำโลหะ ทำให้เกิด Eddy Current บนผิวของโลหะ ซึ่งส่งผลต่อค่าความเหนี่ยวนำในเชิงวงจรไฟฟ้าด้วยเช่นกัน โดยจะเป็นการส่งต่อพลังงานจากขดลวดไปสู่ผิวของโลหะที่อยู่ใกล้ๆ ซึ่งชนิดโลหะต่างกันจะมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่างกันและส่งผลให้ค่า $T_{discharge}$ ต่างกันด้วย โดย $T_{discharge}$ เป็นค่าผลต่างของค่าเวลาดั้งแต่จุดเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มที่จะลดลง (เริ่มการส่ง Pulse Off) ไปจนถึงจุดเวลาที่ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์

2.4 ทฤษฎีการพันเส้นลวดเป็นรูปวงกลม

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตรวจจับโลหะ พบว่า ในงานวิจัย² ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ โดยใช้การประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล จากงานวิจัยดังกล่าวได้นำเส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.40 – 0.80 mm โดยมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพในทางทฤษฎีที่คำนวณได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งถึงแม้ว่าขนาดและรูปร่างทางกายภาพของขดลวดจะนำมาพันเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมที่แตกต่างกันในการใช้งานก็ตาม แต่ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดแต่ละแบบนี้ก็มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 380 – 406 μH และ 1.6 – 2.3 โอห์ม ตามลำดับ โดยขดลวดที่มีขนาดเล็กกว่า ย่อมจะต้องมีจำนวนรอบของขดลวดที่มากขึ้นด้วย ซึ่งโดยทั่วไป ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับใช้งานในเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้หลักการการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ (Pulse Induction Metal Detector) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300 – 500 μH ซึ่งในงานวิจัย² นี้ก็ได้เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อตรวจจับโลหะที่มีค่าเท่ากับ 400 μH

¹ Pulse induction metal detector with DSP. from http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.

Size	Shape	Turns	Wire size	Inductance	Resistance
Ø 120 mm	Round	36	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	405 µH	1.9 Ohm
Ø 150 mm	Round	31	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	394 µH	2.0 Ohm
Ø 175 mm	Round	28	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	387 µH	2.1 Ohm
Ø 200 mm	Round	26	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	406 µH	2.2 Ohm
Ø 250 mm	Round	22	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	380 µH	2.3 Ohm
Ø 300 mm	Round	20	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	390 µH	1.6 Ohm
Ø 400 mm	Round	17	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	396 µH	1.8 Ohm
Ø 500 mm	Round	15	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	400 µH	2.0 Ohm
1.0 x 1.0 m	Square	10	Ø 0.66 mm / 0.34 mm ²	406 µH	2.0 Ohm
1.4 x 1.4 m	Square	8	Ø 0.66 mm / 0.34 mm ²	387 µH	2.2 Ohm
1.8 x 1.8 m	Square	7	Ø 0.80 mm / 0.50 mm ²	398 µH	1.7 Ohm

รูปที่ 2.11 คุณสมบัติทางกายภาพในทางทฤษฎีที่คำนวณได้ของขดลวดที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆ

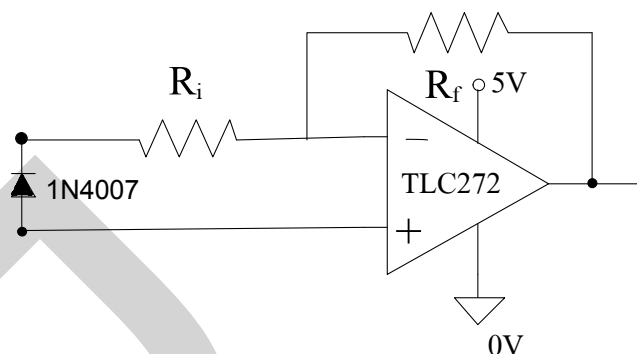
ดังนั้น ในงานวิจัยที่นำเสนอฉบับนี้จึงได้นำเส้นลวดที่มีขายตามท้องตลาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.40 mm หรือมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.14 mm² และมีฉนวนหุ้มมาพันเป็นขดลวดรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 cm และกำหนดจำนวนรอบที่พันเป็นเลขลงตัวเท่ากับ 35 รอบ และมีความหนาของขดลวดประมาณ 1 cm เพื่อให้มีคุณสมบัติในการเลือกใช้งานตรงกับกรณีที่ 2 ของรูปที่ 2.13 หลังจากนั้น ทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ทดสอบดังกล่าว พบว่า มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 420 µH และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 2 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดที่ใกล้เคียงกับค่าที่ปรากฏในกับกรณีที่ 2 ของรูปที่ 2.11 จริง อีกทั้งเป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงกับงานวิจัย¹ ที่เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่าเท่ากับ 400 µH ซึ่งในที่นี้ อาจจะกำหนดจำนวนรอบของการพันเส้นลวดเป็นขดลวดที่เป็นรูปทรงอื่นๆ หรือมีจำนวนรอบค่าอื่นๆ ก็ได้ แต่สิ่งที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอในการใช้งานขดลวดในการตรวจจับโลหะก็คือ ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดที่ใช้งานจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 400 µH และ 2 โอห์ม ตามลำดับ

นอกจากนี้ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 420 µH ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ยังเป็นค่าที่ถูกต้องและสามารถยืนยันที่มาของค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวได้ โดยอาศัยสมการการหาค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.7²

$$L = \frac{(d^2 n^2)}{(l + 0.45d)} \quad (2.7)$$

¹ Pulse induction metal detector with DSP. from http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.

² Single-layer Coil Inductance and Q. from <http://www.qsl.net/in3otd/indcalc.html>.



รูปที่ 2.12 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)

กล่าวคือ เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในการพันขดลวดเข้าไปในสมการที่ 2.7 เราจะค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $415 \mu\text{H}$

อ้างอิงรูปที่ 2.6 หัวข้อที่ 2.2 ทฤษฎีวงจไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งเป็นวงจไฟฟ้าที่ใช้ ออกแบบและสร้างวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด พบว่า หลังจากที่ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ งาน (L) เท่ากับ $420 \mu\text{H}$ และรู้ค่า Ampere Max ที่ทนได้ของเส้นลวดที่เลือกใช้งาน โดยดูจากคู่มือ ลวดทองแดง (American Wire Gauge หรือ AWG) แล้วเราก็จะสามารถคำนวณหาค่า R ที่ใช้ใน วงจรเปิด/ปิดพัลส์ในรูปที่ 2.6 ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.8) ซึ่งในที่นี้ เราจะแทนค่า V_{\max} เท่ากับ 12 โวลต์และ Ampere Max เท่ากับ 6 แอมแปร์ ดังแสดงในสมการที่ (2.9) - (2.10)

$$\frac{V_{\max}}{\text{Ampere Max}} \leq R \quad (2.8)$$

$$\frac{12 \text{ V}}{6 \text{ A}} \leq R \quad (2.9)$$

$$R \geq 2 \Omega \quad (2.10)$$

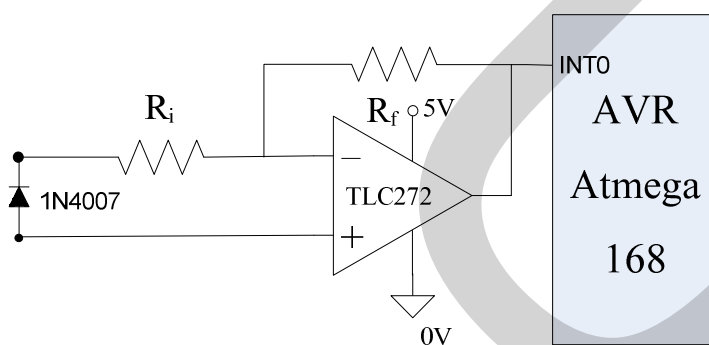
ดังนั้น ตัวต้านทาน R ที่คำนวณได้และนำมาใช้ในวงจรเปิด/ปิดพัลส์นั้นสามารถจะ เลือกใช้ค่าใดๆ ก็ได้ แต่จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 โอห์ม ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ เลือกใช้งาน ค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.14

2.5 การตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของการตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่า เท่ากับ 0 โดยนำออปแอมป์ (Operational Amplifier) มาต่อใช้งานเพื่อขยายสัญญาณอินพุตแบบ

Inverting Amplifier ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยในที่นี้ จะเลือกไดโอดที่ทนรับกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าค่า Ampere Max ของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่มีค่าเท่ากับ 6 แอมแปร์ (อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้ว) และในวงจรที่ออกแบบนี้จะมีค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด (V_d) ประมาณ 0.3 – 0.8 โวลต์แล้วแต่ชนิดของไดโอดที่ใช้งาน ในที่นี้ เราเลือกใช้งานไดโอดเบอร์ 1N4007 ซึ่งเป็นไดโอดที่มีค่า t_{on} กับ t_{off} ต่ำ และมีค่า V_d ประมาณ 0.65 โวลต์ ซึ่งในความเป็นจริง เราจะเลือกใช้ไดโอดเบอร์ใดก็ได้ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้งานไดโอดในวงจรที่นำเสนอนี้ก็คือ ไดโอดดังกล่าวจะต้องมีค่าทำงานโดยมีค่า t_{on} กับ t_{off} ที่ต่ำ เพื่อที่ว่าวงจรเปิด/ปิดพัลส์จะสามารถตอบสนองหรือทำงานได้อย่างรวดเร็วตามต้องการ รวมถึงมีค่า V_d อยู่ระหว่าง 0.3 – 0.8 โวลต์

เหตุผลที่สำคัญที่เลือกอัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ 25 เท่า ก็เพราะว่า “เราต้องการสร้างสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ (ขาเอาต์พุตของออปแอมป์) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าจากระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ไปเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์ เปรียบเสมือนเป็น “สัญญาณพัลส์ขอบขาลง (Falling Edge Trigger)” ที่ชัดเจน ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณพัลส์ขอบขาลงดังกล่าวไปกระตุ้นขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 (INT 0) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 เพื่อให้เกิดการอินเทอร์รัปต์และทำงานเพื่อตรวจจับระยะเวลาที่เกิดผลตอบสนองตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรที่ต่อเอาต์พุตของออปแอมป์เข้าขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของ ATmega168

จากการที่เรานำออปแอมป์ TLC272 มาต่อใช้งานแบบ Inverting Amplifier และกำหนดให้ระดับแรงดันอินพุต V_{in} และระดับแรงดันอินพุต V_{out} มีค่าเท่ากับ 0.2 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ นั้น เราสามารถที่จะหาค่าของ R_i กับ R_f เพื่อนำมาใช้งานวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอตั้งในรูปที่ 2.13 ได้โดยใช้สมการที่ 2.11 – 2.13 ดังนี้

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.11)$$

$$5 = 0.2 * \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{R_f}{R_i} = 24 \quad (2.13)$$

ในที่นี้ ถ้าเราเลือกใช้งานตัวต้านทาน R_i มีค่าเท่ากับ 1 k Ω และนำค่า R_f นี้ไปแทนลงในสมการที่ (2.13) เราได้ตัวต้านทาน R_f มีค่าเท่ากับ 24 k Ω

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า หลักการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับ 0 โดยนำออปแอมป์มาต่อใช้งานเพื่อขยายสัญญาณอินพุตแบบ Inverting Amplifier ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นั้นสามารถนำมาใช้งานได้ในงานวิจัยฉบับนี้ โดยสัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5 โวลต์กับ 0 โวลต์อย่างชัดเจน ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นสัญญาณพัลส์ที่สามารถนำไปกระตุ้นขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของ AVR ATmega168 เพื่อให้เกิดการอินเทอร์รัปต์และ AVR ATmega168 ตรวจจับระยะเวลาที่เกิดผลตอบสนองตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

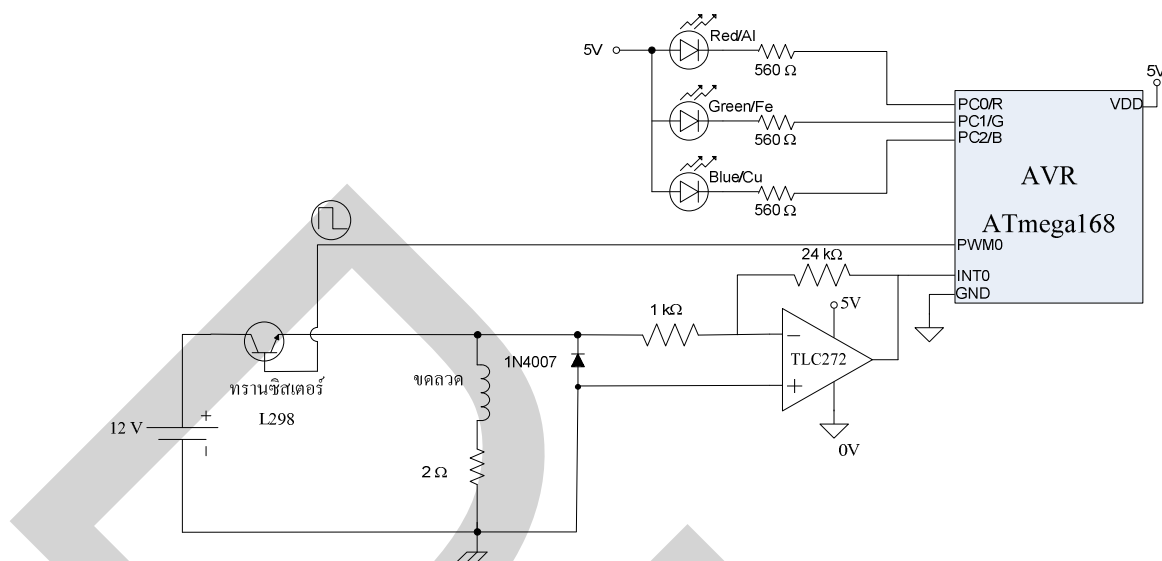
2.6 วงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แก่ขดลวด

โดยทั่วไป วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (Coil Driver) ที่มีใช้งานในเครื่องตรวจจับโลหะนั้น^{1,2} มีหน้าที่หลักที่สำคัญคือทำหน้าที่เปิดและปิดสัญญาณพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับได้จากโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบไปยังวงจรแอนะล็อกที่ทำจากอุปกรณ์ RLC หลังจากนั้น จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปประมวลผลและระบุชนิดของโลหะที่ตรวจจับได้ต่อไป โดยเครื่องตรวจจับโลหะที่ขายโดยทั่วไปจะมีวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แก่ขดลวดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับราคาและคุณภาพของเครื่องตรวจจับโลหะ

ในงานวิจัยฉบับนี้จะออกแบบและนำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แก่ขดลวด (Coil Driver) ขึ้นมาใหม่โดยอ้างอิงหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และวิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM อีกด้วย ซึ่งในที่นี้ จะนำรูปวงจรที่ 2.8 และ 2.11 มาเชื่อมต่อกันเพื่อที่จะ

¹ J. A. Corbyn. (1980). Pulse Induction Metal Detector – 1 and 2. **Wireless World**.

² DeepTech Metal Detectors. (2007). Coil and Search Head Design – Patents and Utility Models (Part 1). from



รูปที่ 2.14 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (Coil Driver)

ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (ตัว L) ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้วงจรเปิด/ปิดพัลส์ใหม่ที่น่าสนใจคือ การออกแบบวงจรกระทำได้ง่าย มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง บำรุงรักษา ง่าย โดยลดความยุ่งยากในการปรับจูนวงจรแอนะล็อกแบบเดิมที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้

วงจรเปิด/ปิดพัลส์ (Coil Driver) ทำหน้าที่เปิดและปิดสัญญาณพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวด และส่งผ่านผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับได้จากโลหะแต่ละ ชนิดที่ทดสอบไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรูปวงจรที่นำมาเสนอเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยอ้างอิงหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และวิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังแสดง ไว้ในรูปที่ 2.14

2.6.1 หลักการทำงานของวงจรมีดังนี้

(1) เริ่มต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 จะสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไทเมอร์ 0 ไปกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ L298 ทำงานในสภาวะปิดวงจร ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรให้แก่ขดลวดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

(2) เมื่อไทเมอร์ 0 สร้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกเสร็จสิ้นตามค่าความ กว้างพัลส์บวกที่กำหนด ใน ณ ขณะนั้น ทรานซิสเตอร์จะทำงานในสภาวะเปิดวงจร นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดหรือวงจรจะเริ่มลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลใน ขดลวดมีค่าเท่ากับ 0

(3) ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มมีค่าลดลง AVR ATmega168 จะเริ่มต้นสั่งการให้ไทมเมอร์ 1 ทำการจับระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงไปจนถึงเวลาที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0

(4) เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดมีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้เอาต์พุตของวงจรที่ต่ออยู่กับขาพอร์ตอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน (ในที่นี้ กำหนดโหมดทำงานของสัญญาณอินเทอร์รัปต์เป็นแบบขอบขาลง) ซึ่งจะไปสั่งการให้ไทมเมอร์ 1 หยุดจับเวลา

(5) หลังจากนั้น AVR ATmega168 จะทำการบันทึกค่าระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด โดยในที่นี้ ค่าระยะเวลาที่ตรวจจับได้จะเป็นจำนวนคล็อกที่นับได้ในช่วงเวลาดังกล่าวในหน่วยเวลาของไทมเมอร์ 1 ซึ่งค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณและขั้นตอนวิธี (อัลกอริทึม) ในการเขียนโปรแกรมใช้งานไทมเมอร์ 0 และไทมเมอร์ 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 จะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ (Pulse Induction <PI> Metal Detector) นั้น ได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในหนังสือต่างประเทศที่แต่งขึ้น โดย I. Grant, F.S. และ West, G.F.¹ ต่อมา J. A. Corbyn² ได้พัฒนาและนำเสนอวงจรตรวจจับโลหะขึ้นมาใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วยตัว R ตัว, C และทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก ทำให้การทดสอบคุณสมบัติในการใช้งานนั้นกระทำได้ยากมาก ต้องเสียเวลาปรับจูนหลายครั้ง ก่อนที่จะใช้งานได้จริงและมีคุณสมบัติใช้งานที่เป็นไปตามความต้องการ ต่อจากนั้น ยังมีนักวิจัยและบริษัทต่างๆ หลายประเทศจำนวนมากได้ทำการวิจัย พัฒนา รวมไปถึงสร้างเพื่อขายเครื่องตรวจจับโลหะออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การสร้างเพื่อขายและเน้นจดสิทธิบัตรเพื่อขายลิขสิทธิ์ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ โดยในที่นี้ จะขอกกล่าวถึงบทความวิจัยที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ดังนี้

Dr. Salman *et. al.*³ ได้นำเสนอเครื่องตรวจจับโลหะแบบการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ขึ้นมา โดยเครื่องดังกล่าวประกอบไปด้วยวงจรที่ใช้ในการสร้างพัลส์ที่มีค่าความถี่และความกว้างของพัลส์คงที่โดยใช้ไอซีไทมเมอร์ LM555 4 ตัว, วงจรที่ใช้ในการตรวจจับโลหะโดยใช้วงจรขยายสัญญาณและวงจรอินทิเกรเตอร์, แหล่งกำเนิดไฟฟ้า +5V, -5V และ -10V และขดลวดที่ใช้ตรวจจับ 1 วง

¹ I. Grant, F. S. and West, G. F. (1965). **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. McGraw-Hill.

² J. A. Corbyn. (1980). Pulse Induction Metal Detector – 1 and 2. **Wireless World**.

³ Salman Durrani, James Boxall, Stephen Purvis, Garrick Madge, and Tathagat Banerjee. A Pulse Induction Metal Detector

โดยค่าความถี่และความกว้างของพัลส์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการปรับจูนค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ หลักการทำงานคือ หลังจากที่พัลส์ถูกส่งออกไปภาคส่งแล้ว วงจรซั๊กตัวอย่าง (Sampling Circuit) ที่อยู่ในวงจรตรวจจับโลหะจะทำการมอดูเลตตรวจจับระยะเวลาของพัลส์ที่สะท้อนกลับมา (Reflected Pulse หรือ Echo) ซึ่งในสภาวะปกติที่ไม่มีโลหะ ระยะเวลาการลดลง (Delay) ของพัลส์ที่สะท้อนกลับมาและตรวจจับได้ จะถูกกำหนดเป็นค่าระยะเวลาการลดลงที่เริ่ม (Expected Length) ซึ่งมีค่าประมาณ 30 μs แต่ถ้ามีการตรวจจับพบโลหะ ระยะเวลาการลดลงของพัลส์ที่สะท้อนกลับมาและตรวจจับได้ จะมีค่าที่มากกว่าค่าระยะเวลาการลดลงที่เริ่มประมาณ 2 – 3 μs โดยได้สรุปประเด็นสำคัญที่น่าเสนอไว้ว่า ถึงแม้ว่า PI Metal Detector จะไม่สามารถใช้งานในการจำแนกชนิดของโลหะได้ แต่ก็มีข้อดีคือสามารถตรวจจับโลหะภายใต้สภาพแวดล้อมหรือพื้นที่ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงและสามารถตรวจจับโลหะที่อยู่ลึกกว่าเครื่องตรวจจับโลหะชนิดอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้ไม่ได้แสดงผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับเลย นอกจากนี้ ข้อเสียของ PI Metal Detector ที่พบจากการนำเสนอดังกล่าวคือ เครื่องตรวจจับโลหะดังกล่าวประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC และไอซีจำนวนมาก ซึ่งจะเสียเวลาในการปรับจูนเวลานาน จนกระทั่งได้ค่าความถี่และความกว้างพัลส์ตามที่ต้องการ, ต้องใช้ไฟเลี้ยงจำนวน 3 ค่า ซึ่งเป็นการยุ่งยากในการใช้งาน อีกทั้งไม่สามารถแยกแยะโลหะที่ต้องการจะตรวจจับได้

Nina Gajjar ¹ ได้นำเสนอเครื่องตรวจจับโลหะอย่างง่ายที่ใช้อุปกรณ์ RLC ไอซีขยายสัญญาณเสียงออกดีโอ ร่วมกับสายอากาศแบบลูป (Loop Antenna) 2 ตัว โดยเครื่องตรวจจับโลหะนี้จะประกอบไปด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ 2 วงจรที่เป็นแบบปรับค่าความถี่ได้และเป็นแบบที่มีค่าความถี่ตายตัว สัญญาณเอาต์พุตของทั้งสองวงจรออสซิลเลเตอร์นี้จะถูกนำมาผสมกันด้วยวงจร Mixer ที่ซึ่งจะสร้างสัญญาณผลต่างออกมาเท่านั้น และในตอนแรก ทั้งสองวงจรมีจะต้องถูกปรับจูนให้มีค่าความถี่ตรงกันเสียก่อน (Zero Beat) โดยใช้วงจรควบคุมการปรับจูนความถี่และจะต้องปรับจูนในสภาวะที่ไม่มีโลหะ ซึ่งจะไม่มีการเกิดเสียงออกดีโอเกิดขึ้น แต่ถ้านำไปทดสอบและตรวจจับพบโลหะ ค่า Zero Beat จะไม่เกิดขึ้นและมีเสียงออกดีโอเกิดขึ้นที่ลำโพง โดยผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากสิ่งประดิษฐ์นี้ก็เป็นเพียงแต่การตรวจจับพบกับไม่พบโลหะ และมีเสียงเท่านั้น ไม่สามารถแยกชนิดของโลหะที่ตรวจพบได้

Michael R. Starcher ² ได้นำเสนอ Blind Squirrel PI Metal Detector ที่ซึ่งเครื่องตรวจจับโลหะที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC, MOSFET และไอซีจำนวนมาก ได้แก่ LM318, LM555, 4N35 ฯลฯ และขดลวดตรวจจับ 1 วง โดยพัลส์ที่มีช่วงเวลา ON สั้นๆ มีความถี่ที่และมีความ

¹ Nina Gajjar. FET Metal detector with IC Audio Amplifier. from <http://nina.foxdelta.com/detector.html>.

² Michael R. Starcher. Blind Squirrel PI Metal Detector. from <http://oldradiobuilder.com/MDET.html>.

กระแสไฟฟ้าสูงได้ถูกสร้างขึ้นตลอดเวลาและส่งไปยังขดลวดโดยใช้ไอซีไทเมอร์ 555 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Dr. Salman *et. al.* แต่ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ความถี่ใช้งานมีค่าไม่เท่ากันด้วย โดยค่าความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าอยู่ระหว่าง 75 Hz และ 225 Hz ด้วยค่าความกว้างพัลส์ที่มีค่าประมาณ 100 -175 μ s เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกของขดลวดที่ใช้ในการตรวจจับโลหะมีค่าเท่ากับ 6.5 นิ้ว (16.51 ซม.) และ 9.5 นิ้ว (24.13 ซม.) ตามลำดับ โดยงานวิจัยที่นำเสนอนี้ก็ไม่ได้แสดงผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับเช่นกัน แต่เข้าใจว่า เครื่องดังกล่าวสามารถตรวจจับโลหะ แต่ไม่สามารถแยกชนิดของโลหะที่ตรวจพบได้เช่นกัน

นอกจากนี้ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขายในประเทศไทย พบว่า เครื่องตรวจจับโลหะส่วนใหญ่จะนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีอยู่หลายบริษัท และหลายรุ่น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการใช้งานและคุณสมบัติในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น

เครื่องตรวจจับโลหะแบบพกพา (Handheld Metal Detector) รุ่น MD-1001¹ เป็นเครื่องตรวจจับโลหะที่สามารถพกพาติดตัวได้เพื่อใช้ในการตรวจจับโลหะในงานรักษาความปลอดภัยตามสถานที่ที่ต้องการปลอดภัยจากอาวุธ อาทิ สถานที่ราชการ สนามบิน สถานบันเทิง ฯลฯ ซึ่งมีคุณสมบัติในการใช้งานคือ สามารถปรับความไวในการตรวจจับโลหะ เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะเป้าหมายได้, มีสวิตช์เปิดปิดเพื่อการประหยัดแบตเตอรี่ในกรณีที่พักการใช้งานและมี Buzzer เตือนเมื่อมีการตรวจจับโลหะได้ หลักการทำงานของ Handheld Metal Detector รุ่นนี้ก็คือ ตัวเครื่องจะให้กำเนิดสนามแม่เหล็กออกมา เมื่อมีโลหะที่เป็น Ferrite มาตัดผ่านก็จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าค่าน้อยๆ ขึ้นในวงจรตรวจจับ แล้วส่งเสียงเตือนออกมา โดยปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อเครื่องตรวจจับโลหะนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะ, ขนาดของโลหะ และความห่างจากผิวหน้าของเครื่อง

เครื่องตรวจค้นวัตถุโลหะรุ่น Garrett Super Scanner² สามารถตรวจจับวัตถุจำพวก ปืนพกขนาดกลาง, มีดขนาดใหญ่, มีดคัตเตอร์, ฟอยล์ห่อยาเสพติด/เพชรเม็ดเล็กๆ ได้ในระยะทาง 9 นิ้ว, 6 นิ้ว, 3 นิ้ว และ 1 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้งานในอากาศเท่านั้น ยังไม่ทราบผลการตรวจจับโลหะที่วางในพื้นที่ดิน ซึ่งตรงข้ามกับเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้งานในทางทหาร VMH3CS Mine Detector รุ่น VMW1 กับ VMW3 ของบริษัท Vallon³ ที่นำเข้ามาจากประเทศเยอรมนี เพื่อใช้ในการตรวจจับกับดักระเบิดและวัตถุต้องสงสัยที่เป็นโลหะต่างๆ ที่วางอยู่ในพื้นดิน

¹ Handheld Metal Detector (MD-1001). from <http://www.gunkamoy.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=352431&Ntype=4>.

² Garrett Super Scanner (PI Metal Detector). from http://www.garrett.com/security/s_superscanner_specification.pdf.

³ VMH3CS Mine Detector. from http://www.vallon.de/pdf/VMH3CS_leaflet_09_2010.pdf.

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการ ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใหม่เพื่อ ทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรพัลส์ให้แก่เครื่องตรวจจับโลหะแบบที่ใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และเขียน โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ขึ้นมาเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ PWM แทนการใช้อุปกรณ์ RLC และไอซีจำนวนมากที่มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ รวมถึงจัดเก็บค่า ระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด โดยจะทำการ ตรวจจับโลหะทั้งที่วางในอากาศและที่วางในพื้นดิน รวมถึงเสนอแนวความคิดใหม่ที่จะทำการปรับ ค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM (T_{on}) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แทนการปรับจูน ค่าความกว้างของพัลส์โดยใช้อุปกรณ์ RLC ที่มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้

โดยความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 9.636 μ s) ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 160.6 μ s) เพื่อที่จะทำให้รู้ได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อค่าความกว้างของพัลส์แต่ละค่าอย่างไร อีก ทั้ง เนื่องจากเทคโนโลยีการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะมักจะถูกปิดบังเป็นความลับและถูกจด สิทธิบัตร จึงทำให้กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจาก โลหะแต่ละชนิดที่ได้รับจากการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบผลการ ทดสอบของชิ้นงานนี้กับเครื่องอื่นๆ ที่ขายหรือที่ปรากฏในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ ได้ แต่ทั้งนี้ ผลการทดสอบหรือเป้าหมายที่ต้องการจะได้รับจะเหมือนกันก็คือ นำผลการทดสอบที่ ได้รับจากงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อเนื่องและนำไปสร้างชิ้นงาน เครื่องตรวจจับโลหะที่สามารถบอก ชนิดและระยะห่างระหว่างขดลวดกับโลหะที่ตรวจจับได้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบทีละขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM และขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทมเมอร์ 0 และไทมเมอร์ 1 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอและอัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์จะอธิบายในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ส่วนหัวข้อสุดท้ายจะนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี รายละเอียดของแต่ละหัวข้อย่อมีดังนี้

3.1 การคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM

อ้างอิงทฤษฎีในบทที่ 2 ที่มีการนำเสนอหลักการทำงานที่สำคัญงานวิจัยนี้ คือ การนำไทมเมอร์ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 มาใช้งานเพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่ซึ่งสัญญาณ PWM ดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรเปิด/ปิดพัลส์และขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งยังถูกกำหนดให้มีค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่มีค่าต่างๆ กัน เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่ค่าความกว้างของพัลส์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นอย่างไร

ในที่นี้ ค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นมีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 9.636 μ s) ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 160.6 μ s) โดยมีสมการที่ใช้ในการหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM จากการใช้ AVR ATmega168 และใช้ Prescaler (ตัวหารหรือลดทอนความถี่สัญญาณนาฬิกา) มีค่าเท่ากับ 64 ดังนี้

$$f_{PULSE} = 20 \text{ MHz} / (64 * 256) = 1.221 \text{ kHz}$$

$$\text{หรือ } T_{PULSE} = 1 / 1.221 \text{ kHz} = 8.192 * 10^{-4} \text{ s} \quad (3.1)$$

ในที่นี้ จะแบ่งสเกลออกเป็น 255 ส่วน (เนื่องจากใช้ไทมเมอร์ 0 ที่มีขนาด 8 บิต) ดังนั้น จะหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ไทมเมอร์ 0 นับได้ โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM พื้นฐานที่มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยไทมเมอร์ 1 นั้น หาค่าได้ดังนี้

$$T_{Unit_PULSE} = 1/255 * 8.192 * 10^{-4} = 3.212 \mu s \quad (3.2)$$

โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM อันดับแรก (3 หน่วยของไทมเมอร์ 0) และสัญญาณพัลส์ PWM อันดับสุดท้าย (50 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติเท่านั้น ดังนี้

$$W_{3_PWM} = 3/255 * 8.192 * 10^{-4} = 9.636 \mu s \quad (3.3)$$

$$W_{50_PWM} = 50/255 * 8.192 * 10^{-4} = 160.6 \mu s \quad (3.4)$$

ส่วนไทมเมอร์ 1 ที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์หรือทำการนับจำนวนคล็อกของพัลส์ที่รับได้นั้น จะนำจำนวนคล็อกที่รับได้คูณด้วย 50 ns (ไม่มี Prescaler) ดังแสดงในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} T_{Current_Drop} &= No. of CLKs * 1/20 MHz \\ &= No. of CLKs * 50 ns \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.2 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทมเมอร์ 0 และไทมเมอร์ 1

การใช้งานไทมเมอร์ 0 ในโหมด Fast PWM โดยกำหนดค่า Prescaler มีค่าเท่ากับ 64 เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดในงานวิจัยฉบับนี้ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

(1) เซต TCCR0A ให้มีค่าเท่ากับ 0x83 เพื่อให้ทำงานในโหมด Fast PWM โดยไทมเมอร์ 0 จะนับขึ้นจาก 0 ถึง 255 โดยทำให้พัลส์ On ตอนสตาร์ท แล้วเป็น Off เมื่อไทมเมอร์ 0 เปรียบเทียบตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ OCR0A ซึ่งทำให้สามารถปรับ ความกว้าง พัลส์ ได้อิสระเพื่อเก็บค่ามาวิเคราะห์ผล

(2) การปรับความกว้างพัลส์ช่วง On ด้วยการกำหนดค่าไปที่ รีจิสเตอร์ OCR0A

(3) เปิดการทำงานหน่วยเปรียบเทียบค่าไทมเมอร์ 0 กับค่าความกว้างพัลส์ช่วง On ด้วยการเซต TIMSK0 ให้มีค่าเท่ากับ 0x02 เมื่อไทมเมอร์ 0 นับค่าขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดใน OCR0A จะเกิด

Interrupt ซึ่งในส่วนของโปรแกรม เมื่อเกิด Interrupt จะส่งต่อการทำงานให้ไทมเมอร์ 1 เริ่มจับเวลาที่ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดจะลดลงจนเป็นศูนย์

(4) เริ่มการทำงานและทำการพรีสเกลไทมเมอร์ 0 ด้วยค่าตัวเลข 64 ด้วยการเซต TCCR0B ให้มีค่าเท่ากับ 0x03

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไทมเมอร์ 1 มีหน้าที่จับเวลาโดยนับค่าขึ้นไปเรื่อยๆ ทันทีที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลง และไทมเมอร์ 0 จะถูก Off จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า หากต่ออุปกรณ์ครบวงจรตามที่ออกแบบไทมเมอร์ 1 จะไม่นับจนถึงค่า 65535 โดยเหตุการณ์ที่จะสั่งให้ไทมเมอร์ 1 หยุดนับ จะเกิดขึ้นจาก External Interrupt ที่เข้ามาทางขา INTO

3.2.1 ส่วนขั้นตอนการทำงานของไทมเมอร์ 1 มีดังนี้

- (1) กำหนดให้ไทมเมอร์ 1 นับขึ้นแบบไม่ใช้ค่าพรีสเกล เซต TCCR1B เท่ากับ 0x00
- (2) เมื่อไทมเมอร์ 0 ทำการเปรียบเทียบค่าของ TCNT0 ตรงกับค่าใน OCR0A จะเกิดการ Interrupt โดยในฟังก์ชัน Interrupt จะสั่งให้ไทมเมอร์ 1 เริ่มนับ ด้วยการเซต TCCR1B ให้มีค่าเท่ากับ 0x01 ซึ่งในขณะนั้นกระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงจากค่าสูงสุด
- (3) ไทมเมอร์ 1 จะทำการนับขึ้นในรูปแบบปกติและรอจนกว่าจะมี Interrupt เข้ามาทางขา INTO ไทมเมอร์ 1 ก็จะหยุดนับด้วยการเซต TCCR1B ให้มีค่าเท่ากับ 0x00
- (4) การดึงค่าที่ได้จากการนับของไทมเมอร์ 1 สามารถเข้าถึงได้โดยตรงผ่านรีจิสเตอร์ TCNT1 เมื่อมีการดึงค่าจาก TCNT1 เสร็จแล้วโปรแกรมจะเซตค่าความกว้างพัลส์ On ในไทมเมอร์ 0 เพื่อเปลี่ยนค่าความกว้างพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบวัตถุโลหะ แล้วให้ไทมเมอร์ 0 เริ่มทำงานวนรอบใหม่อีกครั้ง

3.3 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอ

ในการทดสอบจะนำโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่ขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และ 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดลองหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการเซตค่าค่าเริ่มต้นก่อนเสมอ โดยจะเริ่มต้นจากการทดสอบชิ้นงานในสถานะที่ไม่มีโลหะที่จะตรวจจับ เนื่องจากแต่ละบริเวณที่ทำการทดลองได้รับผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกที่ไม่เท่ากัน เพื่อที่ว่าระยะเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะ (ทดสอบกับอากาศ) จะทำหน้าที่เสมือนเป็นค่าขีดเริ่ม (Threshold) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_{discharge_{air}}$ ซึ่งเป็นการทำงานในตอนเริ่มต้นเช่นเดียวกับการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะจริงในปัจจุบันนี้ หลังจากที่ได้ทำ

การหาค่า $T_{\text{discharge}_{\text{air}}}$ ได้แล้ว จะทำการตรวจจับและบันทึกค่าระยะเวลาของขบวนการของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_{\text{discharge}_{\text{metal}}}$ ณ ระยะห่างระหว่างขดลวดกับโลหะค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1 - 15 ซม. (ระยะห่างเพิ่มขึ้นทีละ 1 ซม.) โดยที่ระยะห่างแต่ละค่า จะทำการหาค่าผลต่างของระยะเวลาของขบวนการของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ($\Delta T_{\text{discharge}}$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (3.6)

$$\Delta T_{\text{discharge}} = T_{\text{discharge}_{\text{metal}}} - T_{\text{discharge}_{\text{air}}} \quad (3.6)$$

ในการเก็บค่าข้อมูลก่อนที่จะทำการแสดงชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะเพื่อสร้างเป็นเครื่องต้นแบบในการตรวจจับโลหะที่สมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนในการทำงานและมีวิธีการในการบอกชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะ ดังนี้

(1) AVR ATmega168 บนบอร์ด ET-EASY168 STAMP ถูกกำหนดให้สร้างสัญญาณ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (9.636 ไมโครวินาที) ถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (160.6 ไมโครวินาที) ป้อนให้กับวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่ต่อกับขดลวด

(2) ทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างเครื่องตรวจจับโลหะกับโลหะแต่ละชนิดที่ต้องการทดสอบ โดยมีค่าตั้งแต่ 1 - 15 ซม.

(3) หลังจากนั้น ทำการบันทึกค่าข้อมูล “ระยะเวลาของขบวนการของกระแสไฟฟ้าในขดลวด” ที่เกิดขึ้นไว้ในหน่วยความจำของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าสูงสุด แล้วมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งค่าระยะเวลาดังกล่าวจะถูกจัดเก็บทุกๆ ค่าของระยะห่างตั้งแต่ 1 - 15 ซม. โดยค่าข้อมูลที่ได้จากทดสอบและถูกจัดเก็บเหล่านี้จะถูกใช้งานเสมือนเป็นฐานข้อมูล

(4) โดยวิธีการที่นำเสนอเพื่อใช้บอกชนิด ของโลหะ คือ ในการทดสอบใช้งานจริง จะนำเครื่องตรวจจับโลหะที่สร้างขึ้นเสร็จแล้วนำไปทดสอบ โดยจะทำการส่งค่าสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกออกไป 15 ค่าและวัดค่าระยะเวลาของขบวนการของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้ทำการสอบเทียบไว้ก่อนหน้านี้โดยพิจารณาช่วงที่ $\Delta T_{\text{discharge}}$ เป็นลบ เป็นศูนย์ และ เป็นบวก ว่าคล้ายกับโลหะชนิดใดที่ทดสอบ

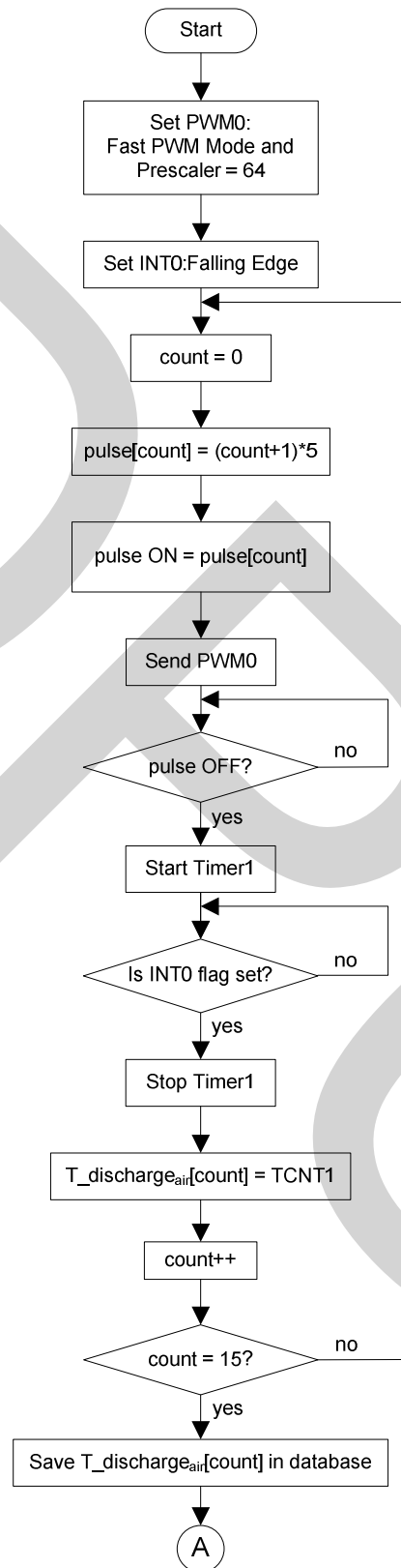
โดยในการทดสอบและในการใช้งานจริงนั้น จะกำหนดให้สัญญาณพัลส์ PWM มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกที่ต่างกันจำนวน 15 พัลส์ โดยมีหน่วยของค่าเวลาเป็น “จำนวนเท่าของหน่วยของไทมเมอร์ 0” ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความกว้างพัลส์ด้านบวกในหน่วยของไทเมอร์ 0 และหน่วยเวลา μs

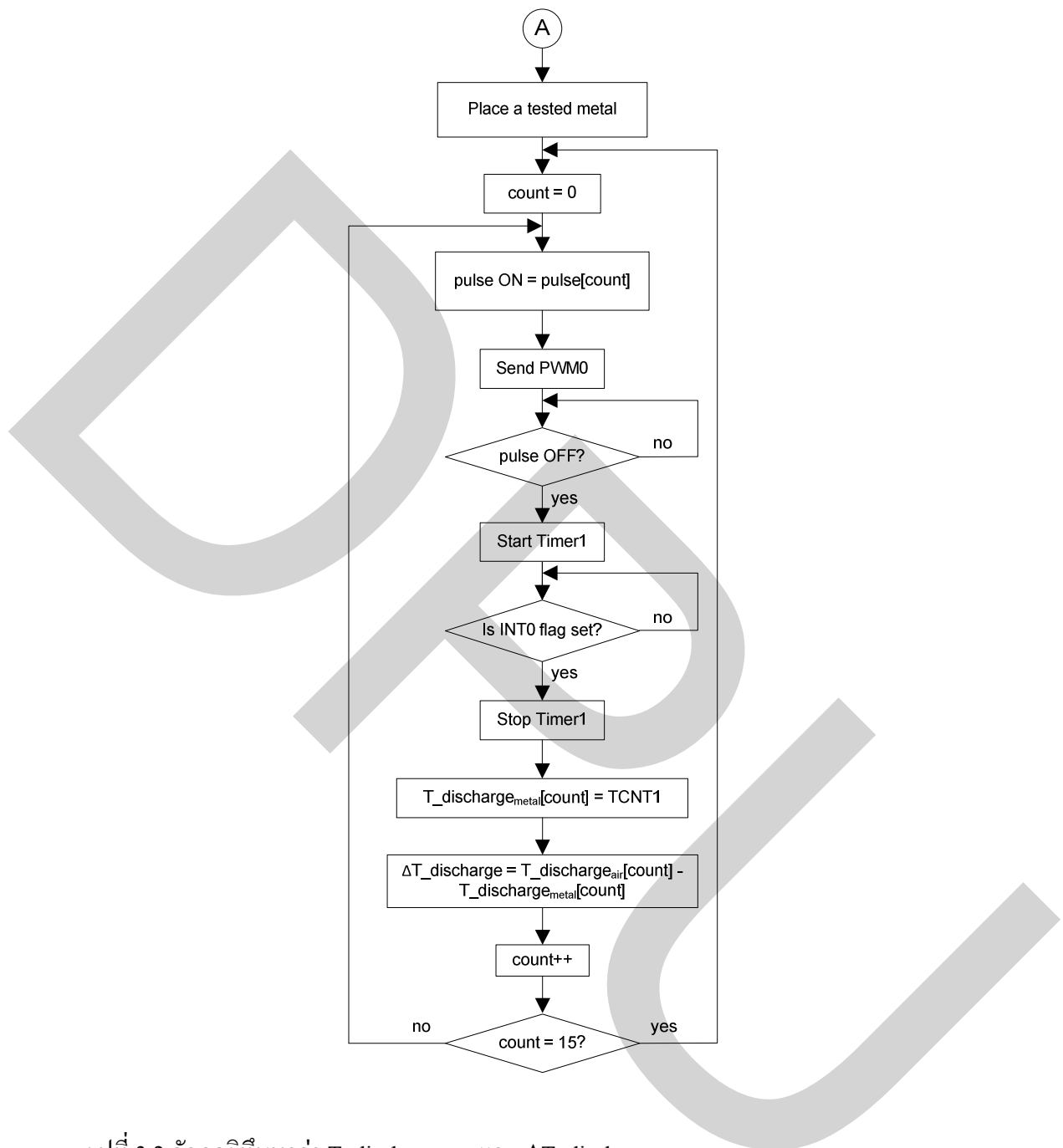
ความกว้างพัลส์ด้านบวก (หน่วยของไทเมอร์ 0)	ความกว้างพัลส์ด้านบวก (μs)
3	9.636
6	19.27
9	28.91
12	38.54
15	48.18
18	57.82
21	67.45
24	77.09
27	86.72
30	96.36
33	106.00
36	115.63
39	125.27
42	134.90
45	144.54

3.4 อัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

หลังจากที่ได้อธิบายแนวทางในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอแล้ว ในหัวข้อย่อๆนี้จะนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_{\text{discharge}_{\text{air}}}$ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_{\text{discharge}_{\text{metal}}}$ และ $\Delta T_{\text{discharge}}$ ตามลำดับ ส่วน Source Code ที่เขียนขึ้นตามอัลกอริทึมดังกล่าวที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์มีแสดงไว้ในภาคผนวก ฎ โดยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เขียนขึ้นมานี้อาศัยหลักการเขียนโปรแกรมตามมาตรฐาน ANSI-C



รูปที่ 3.1 อัลกอริทึมหาค่า $T_{\text{discharge}_{\text{air}}}$



รูปที่ 3.2 อัลกอริทึมหาค่า $T_{\text{discharge}_{\text{metal}}}$ และ $\Delta T_{\text{discharge}}$

3.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะทำการจำแนกโลหะแต่ละชนิดที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี ซึ่งในงานวิจัยที่น่าเสนอนี้ จะแสดงผลการทดลองที่จำแนกโลหะแต่ละชนิดที่มีขนาดใหญ่วางอยู่ในพื้นทรายที่ระยะทาง 5 cm ผ่านทางหลอด LED 3 สี และพิจารณาสัญญาณ PWM จำนวน 15

พัลส์ที่มีค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกเท่ากับ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42 และ 45 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เท่านั้น โดยหลักการที่ใช้ในการจำแนกโลหะแต่ละชนิดนั้นเกิดขึ้นจากการสังเกตค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแผ่นโลหะขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ณ ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่าหนึ่ง ซึ่งมีรายละเอียดในการพิจารณาเพื่อเขียนโปรแกรมเพื่อจำแนกโลหะโดยใช้ไทมเมอร์ 1 ของ AVR ATmega168 ดังนี้

3.5.1 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีแนวโน้มที่ค่าจะเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขของชุดคำสั่งที่ใช้ในการรับค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ (ตัวแปรอาร์เรย์ TCNT_value ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการและควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์) จากการใช้ความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่านั้น อยู่ในรูปแบบคือ

$$\text{TCNT_value}[i] > \text{min} - 2 \quad (3.7)$$

เมื่อ i เป็นดัชนีที่บอกอันดับของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ถูกสร้างขึ้น และ min เป็นค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มีค่าต่ำสุด ณ ระยะไกลสุดที่ตรวจจับได้ ยกตัวอย่าง เช่น จากการใช้ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกเท่ากับ $9.64 \mu\text{s}$ (ค่านี้เป็นความกว้างพัลส์ลำดับที่ 1 ดังนั้น i มีค่าเท่ากับ 0) ในการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ พบว่า ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากระยะไกลสุด 7 cm ไปถึงระยะใกล้สุด 1 cm มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น จากตารางที่ 3.2 พบว่า ค่า max ที่ตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 7 จึงทำให้ได้ชุดคำสั่งแรกที่ใช้ในการพิจารณาว่า “โลหะดังกล่าวเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ คือ $(\text{TCNT_value}[0] > 5)$ ”

3.5.2 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีแนวโน้มที่ค่าจะลดลง จึงทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขของชุดคำสั่งที่ใช้ในการรับค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ (ตัวแปรอาร์เรย์ TCNT_value ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการและควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์) จากการใช้ความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่านั้น อยู่ในรูปแบบคือ

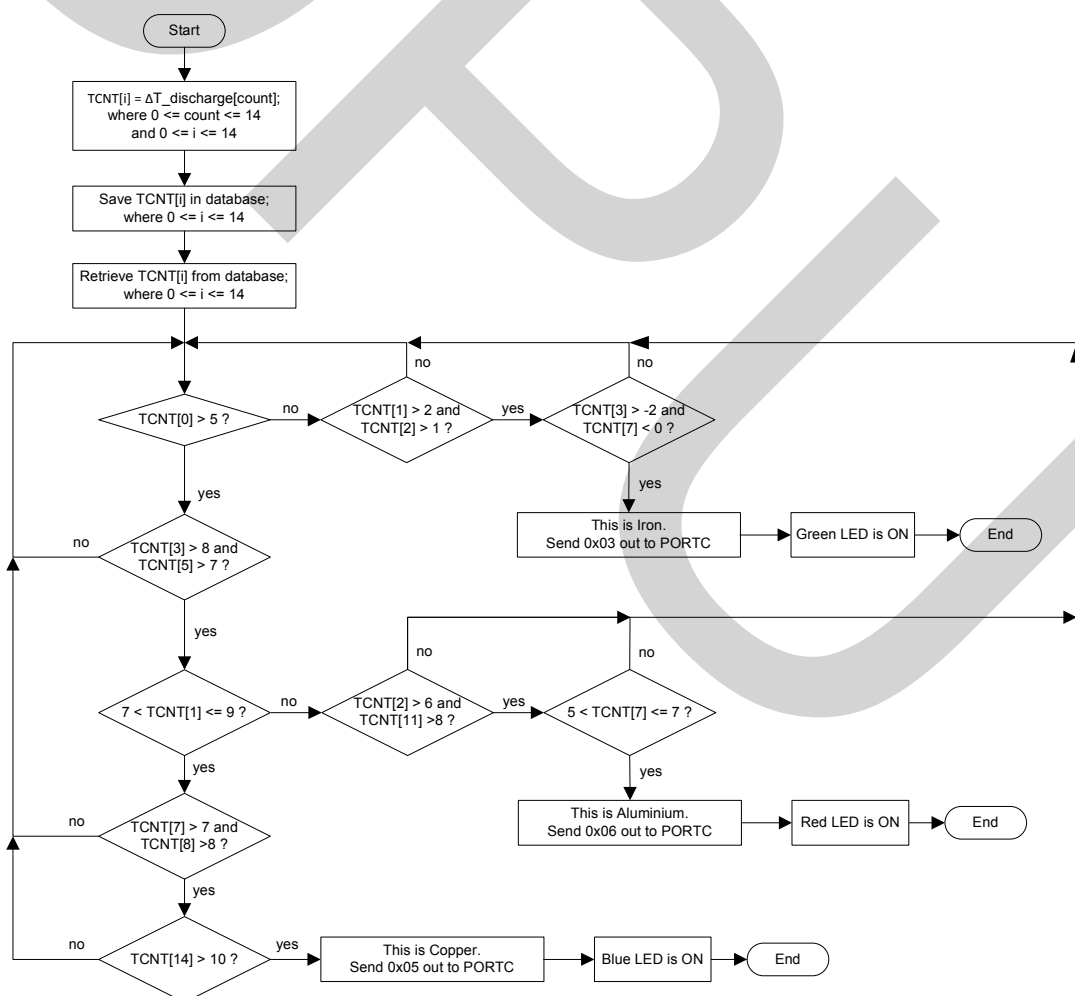
$$\text{TCNT_value}[i] < \text{max} - 2 \quad (3.8)$$

เมื่อ i เป็นดัชนีที่บอกอันดับของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ถูกสร้างขึ้น และ max เป็นค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มีค่าสูงสุด ณ ระยะไกลสุดที่ตรวจจับได้ เช่นกัน ยกตัวอย่าง เช่น จากการใช้ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกเท่ากับ $144.54 \mu\text{s}$ (ค่านี้เป็นความกว้างพัลส์ลำดับที่ 15 ดังนั้น i มีค่าเท่ากับ 14) ในการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ พบว่า ค่า

$\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากระยะไกลสุด 7 cm ไปถึงระยะใกล้สุด 1 cm มีค่าลดลง ดังนั้น จากตารางที่ 3.2 พบว่า ค่า max ที่ตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 0 จึงทำให้ได้ชุดคำสั่งแรกที่ใช้ในการพิจารณาว่า “โลหะดังกล่าวเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ คือ $(TCNT_value[0] < -2)$ ”

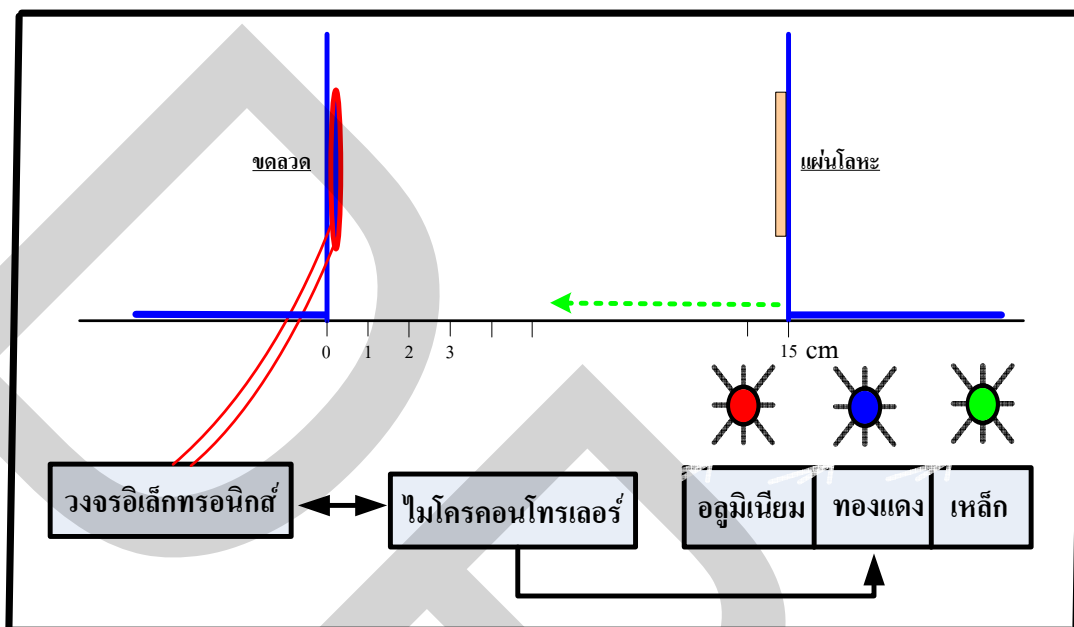
3.5.2 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้รับมีค่าไม่แน่นอน ในการเขียนโปรแกรมจะไม่นำค่านั้นมาพิจารณา

3.5.3 หลังจากนั้น จะนำชุดคำสั่งที่ได้รับในข้อ 1 และ ข้อ 2 มากระทำกันโดยใช้เครื่องหมาย “AND” ภายใต้ชุดคำสั่งเงื่อนไข if ถ้าค่าความจริงที่ได้รับเป็นจริงทุกกรณี คำตอบที่ได้รับก็จะแสดงชื่อของโลหะชนิดนั้นออกมาได้ รวมถึงมีการแสดงชนิดของโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สีอีกด้วย อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี โดยอาศัยหลักการที่กล่าวไปแล้วข้างต้นนี้มีแสดงไว้รูปที่ 3.3

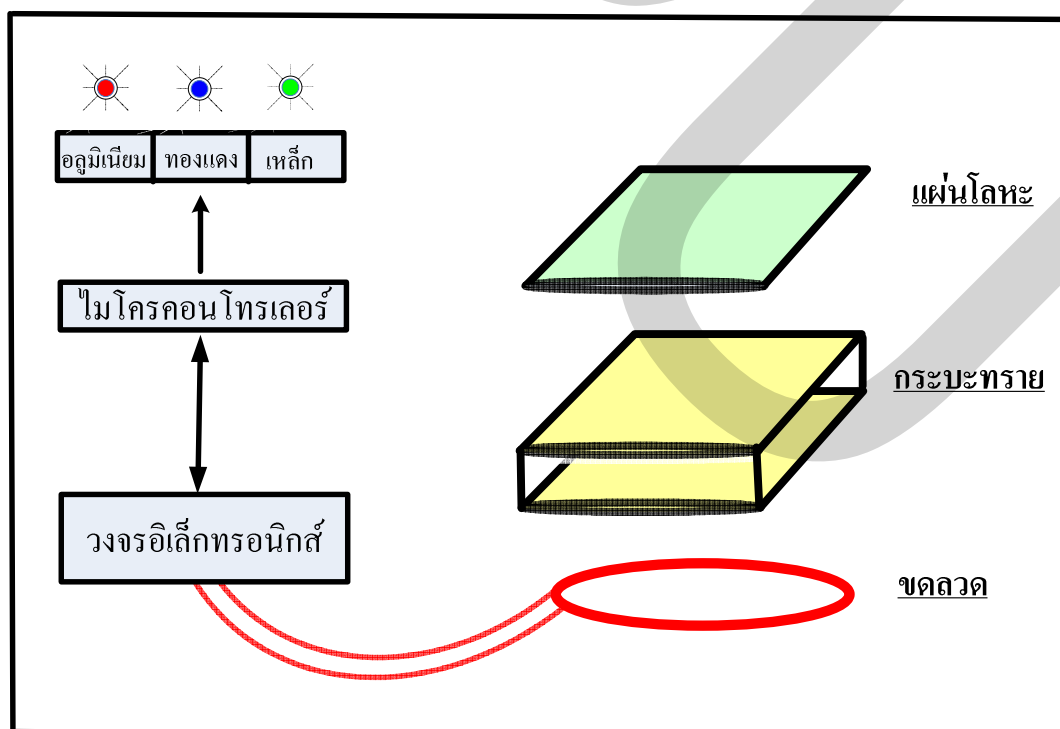


รูปที่ 3.3 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี

โดยลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศและที่วางในพื้นที่ทรายของงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศ

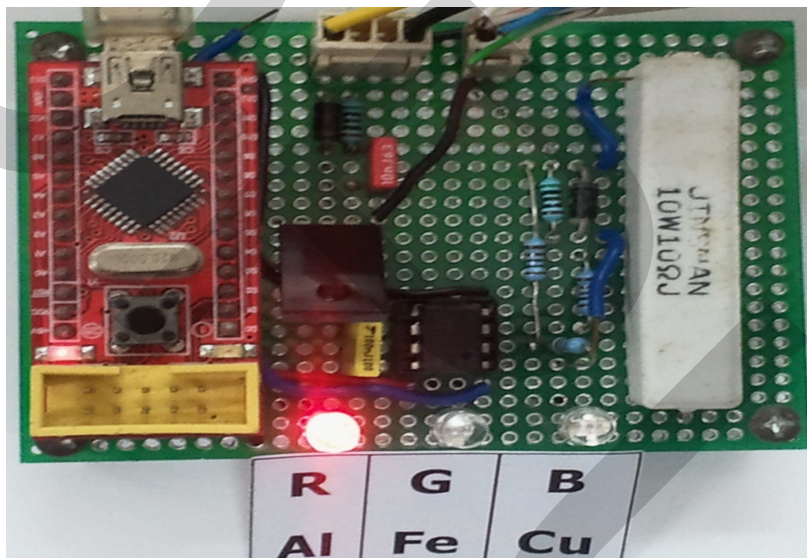


รูปที่ 3.5 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในพื้นที่ทราย

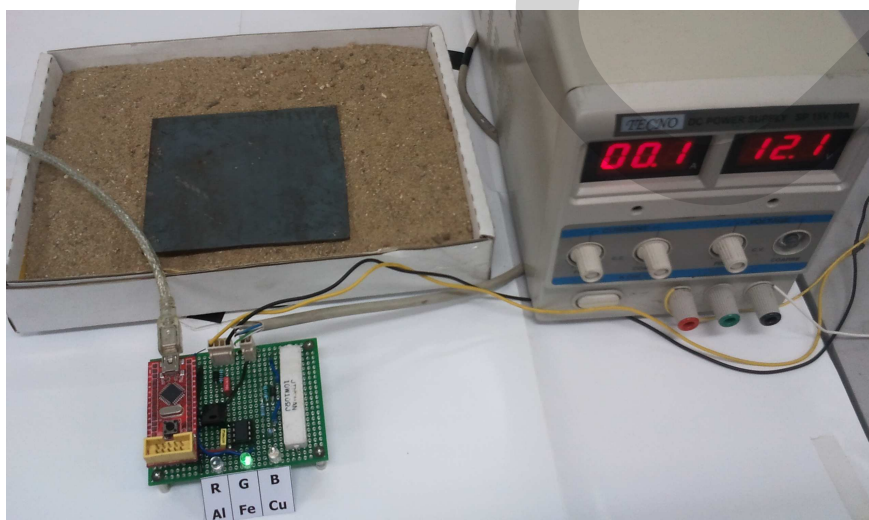
บทที่ 4

ผลการศึกษา

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรเปิด/ปิดพัลส์ PWM พ้นขดลวดตรวจจับ และเขียนโปรแกรมใช้งาน เสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้ทำการประกอบโมดูลต่างๆ เข้าด้วยกัน ผ่านสายส่งสัญญาณ ก่อนที่จะทำการทดสอบการทำงานและเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP



รูปที่ 4.2 เครื่องมือวัดและการเชื่อมต่อในการทดสอบ

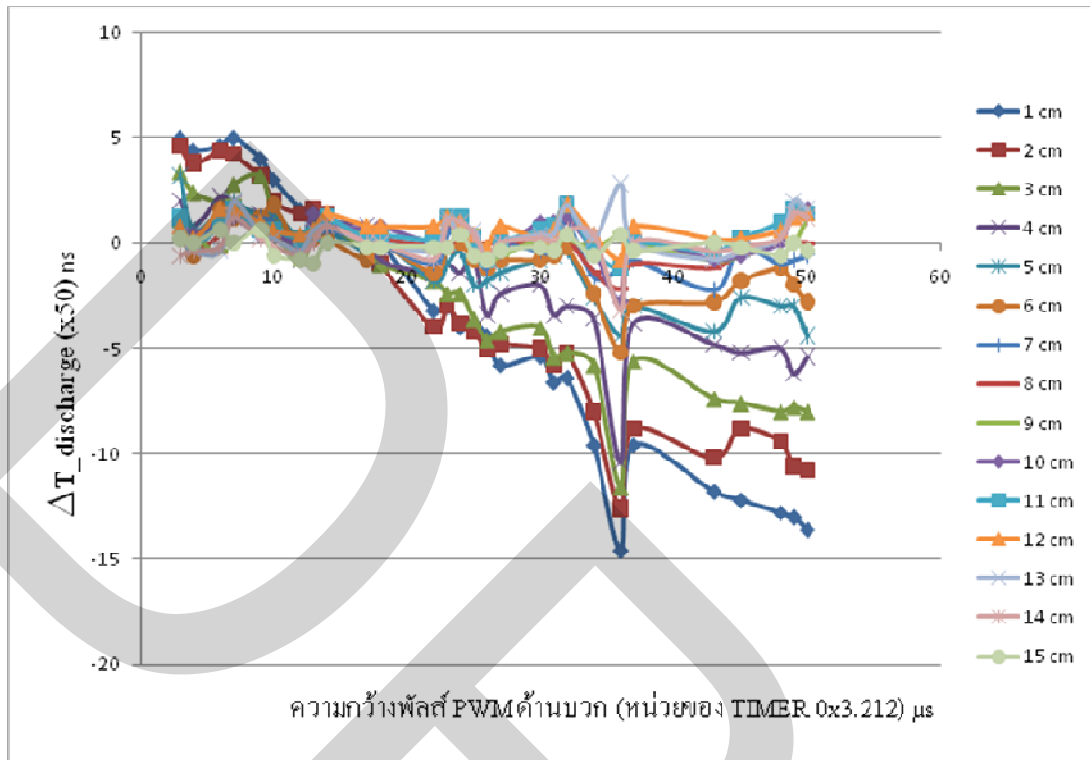
โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะนำโลหะมาทดสอบจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และขนาด 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดสอบหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยการทดสอบในอากาศ ระบายของแผ่นโลหะและระบายของขดลวดจะวางในแนวตั้งฉากกับระนาบของพื้นโลก ส่วนการทดสอบในพื้นที่ดิน ระบายของแผ่นขดลวดจะวางขนานกับพื้นโลกและระบายของแผ่นโลหะ ในการทดสอบแต่ละครั้ง จะต้องทำการตั้งค่าเริ่มต้นก่อน โดยจะเริ่มต้นจากการทดสอบชิ้นงานในสถานะที่ไม่มีโลหะที่จะตรวจจับ ระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะ ($T_{\text{discharge}_{\text{air}}}$) จะทำหน้าที่เสมือนเป็นค่าขีดเริ่ม (Threshold) ที่ใช้เปรียบเทียบกับค่าระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ ($T_{\text{discharge}_{\text{metal}}}$) ณ ระยะห่างค่าต่างๆ กันที่มีค่าตั้งแต่ 1 - 15 ซม. โดยในที่นี้ กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ได้จากการทดสอบจะถูกพล็อตออกมาดังแสดงในรูปที่ 4.3 – 4.8 ซึ่งแกน x คือค่าความกว้างของพัลส์ PWM ด้านบวก ในหน่วยไมโครวินาที และแกน y คือค่าผลต่างของระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะกับระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ ในหน่วยนาโนวินาที ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$\Delta T_{\text{discharge}} = T_{\text{discharge}_{\text{air}}} - T_{\text{discharge}_{\text{metal}}} \quad (4.1)$$

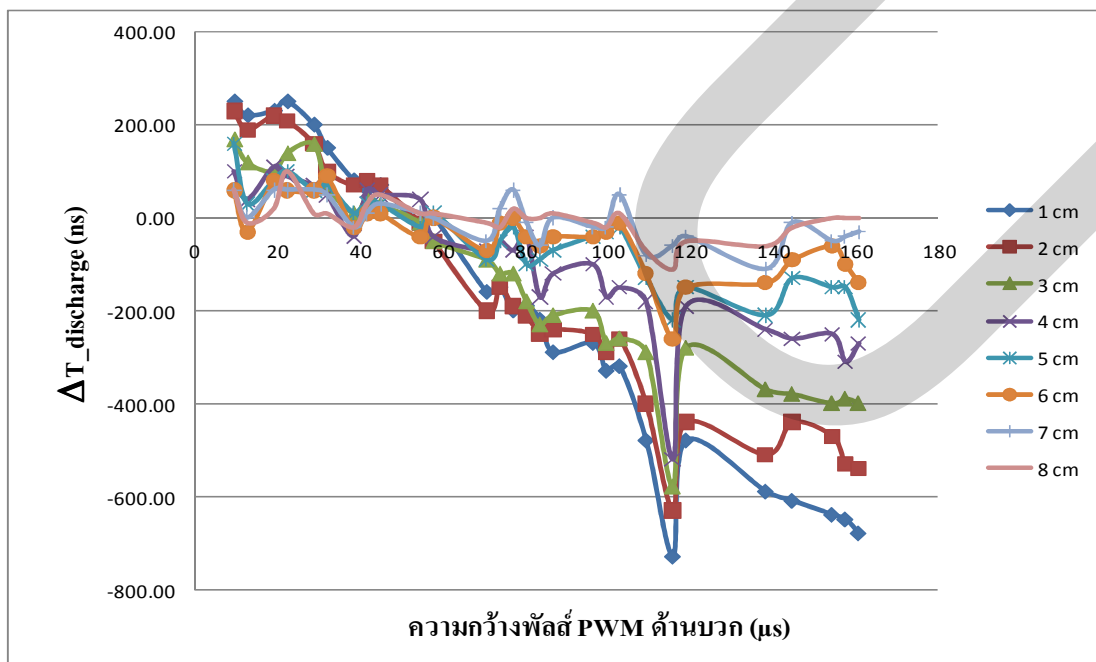
โดยรูปกราฟผลตอบสนองระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ได้จากการทดสอบแผ่นโลหะแต่ละชนิดและแต่ละขนาดมีดังนี้

4.1 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นอลูมิเนียมที่วางในอากาศ

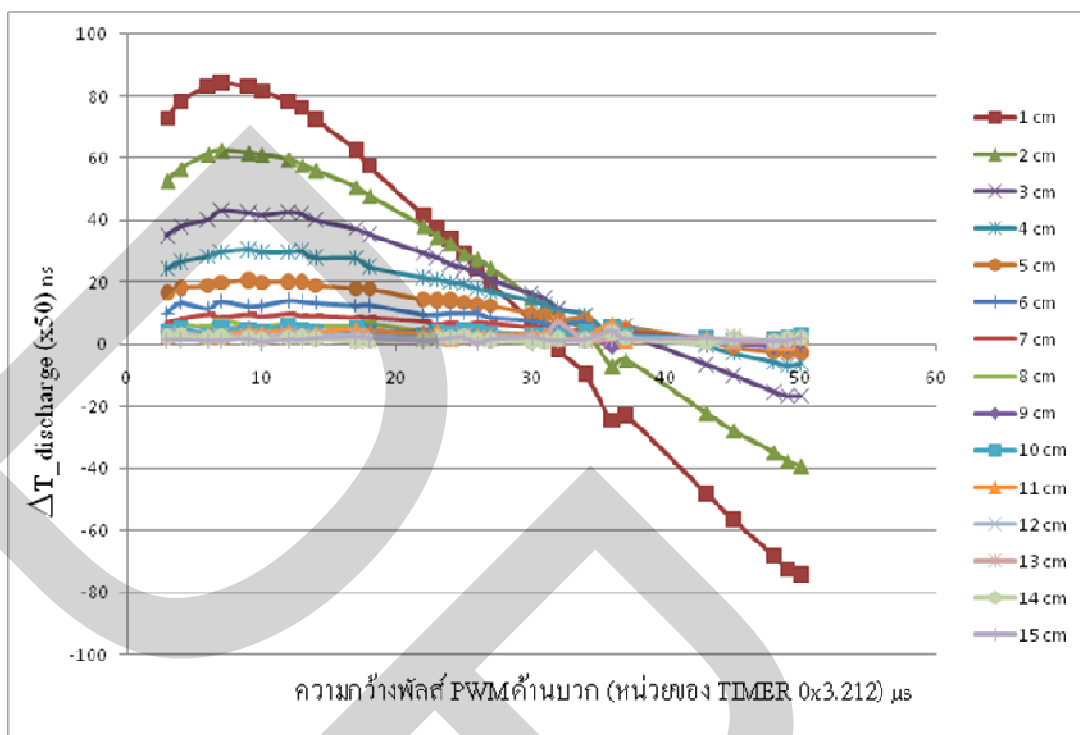
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. (ระยะห่างมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ซม.) แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 8 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ (แกน y) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและมีความชันเป็นลบ เมื่อความกว้างพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าโดยประมาณน้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จะมีค่าเป็นบวก แต่เมื่อค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 48.19 ไมโครวินาทีขึ้นไป ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้กลับมีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. ให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นค่าบวกที่มากที่สุด (Upper Bound) แต่จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นค่าลบที่มีค่าน้อยที่สุด (Lower Bound)



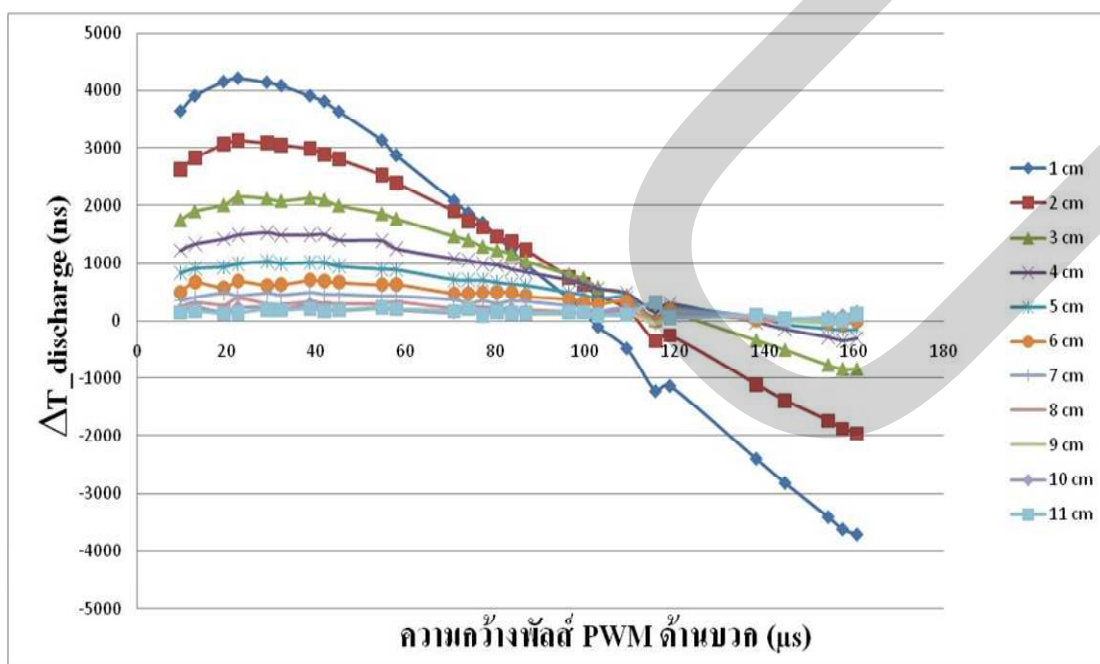
รูปที่ 4.3 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



รูปที่ 4.4 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 8 ซม.



รูปที่ 4.5 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



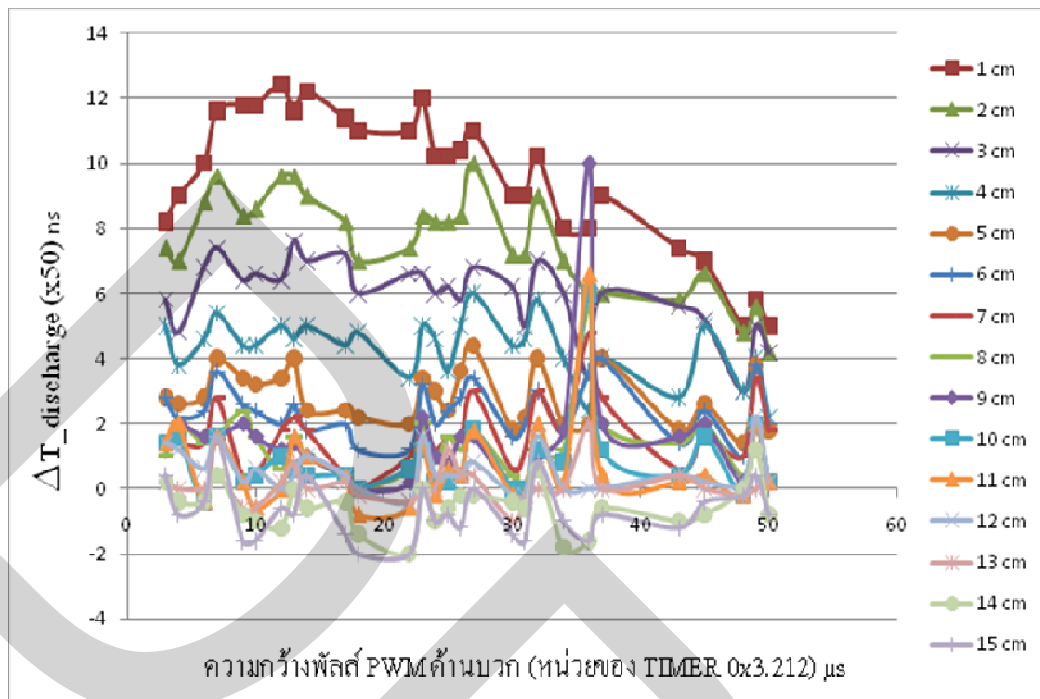
รูปที่ 4.6 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.

อ้างอิงรูปที่ 4.5 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. เช่นกัน แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 11 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีลักษณะเป็นรูปตัวยูคว่ำ ในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 48.19 μs (15 หน่วยของไทมเมอร์ 0) โดยจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าเท่ากับ 25.7 μs (8 หน่วยของไทมเมอร์ 0) หลังจากนั้น ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้รับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นบวกมากที่สุด แต่จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นลบน้อยที่สุด เช่นเดียวกับผลที่ได้รับจากแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้ว นอกจากนี้ เมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 9 - 11 ซม. และค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 128.5 μs (40 หน่วยของไทมเมอร์ 0) จะได้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มีค่ามากกว่าศูนย์เพียงเล็กน้อยและใกล้เคียงกัน และเมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-11 ซม. และค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 128.5 μs จะได้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีค่าเกือบจะเป็นศูนย์

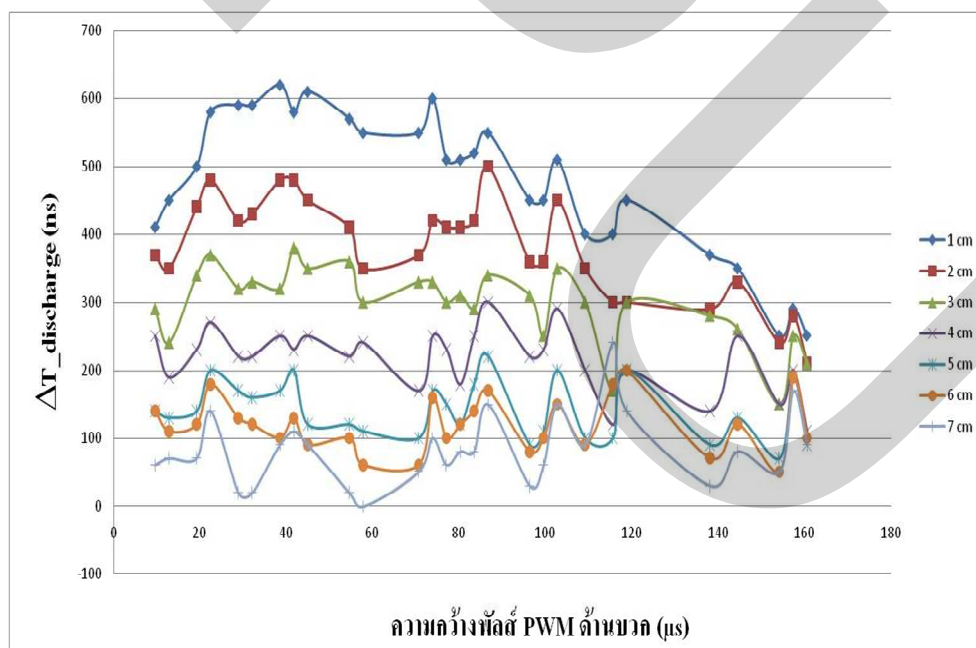
4.2 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงที่วางในอากาศ

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 7 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลาและมีค่าเป็นบวกทุกๆ ค่าความกว้างพัลส์ โดยระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มากที่สุดทุกๆ ค่า ส่วนระยะตรวจจับได้เท่ากับ 7 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่น้อยที่สุดเกือบทุกค่า กล่าวคือ เมื่อระยะตรวจจับได้มีค่ามากขึ้น ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้รับจะมีค่าที่ลดลง

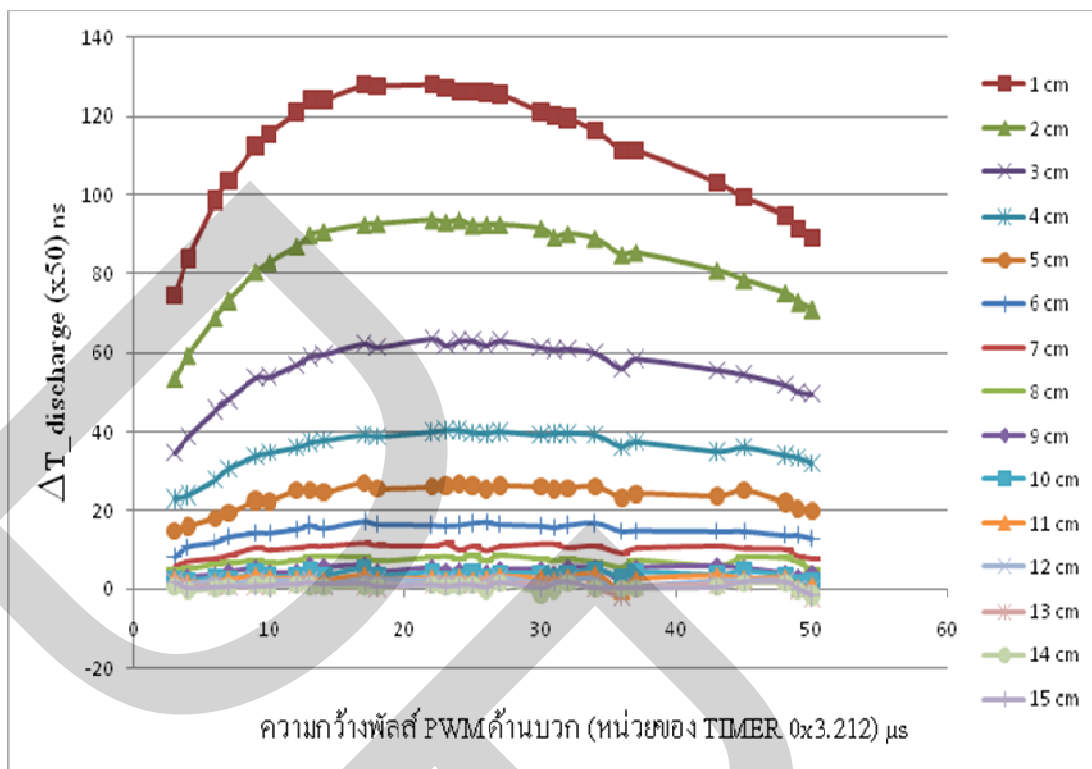
อ้างอิงรูปที่ 4.9 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. เช่นกัน แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 11 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีค่าเป็นบวกทุกๆ ค่า โดยมีลักษณะเป็นรูปตัวยูคว่ำและมีจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์เท่ากับ 64.25 μs (20 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ซึ่งเส้นกราฟที่ได้รับมีความแตกต่างจากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้ว อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. ยังคงให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มากที่สุดทุกๆ ค่า ส่วนระยะตรวจจับได้ตั้งแต่ 7 ซม. ขึ้นไป จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่น้อยที่สุดเกือบจะมีค่าเป็นศูนย์และมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับผลที่ได้รับจากแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้ว



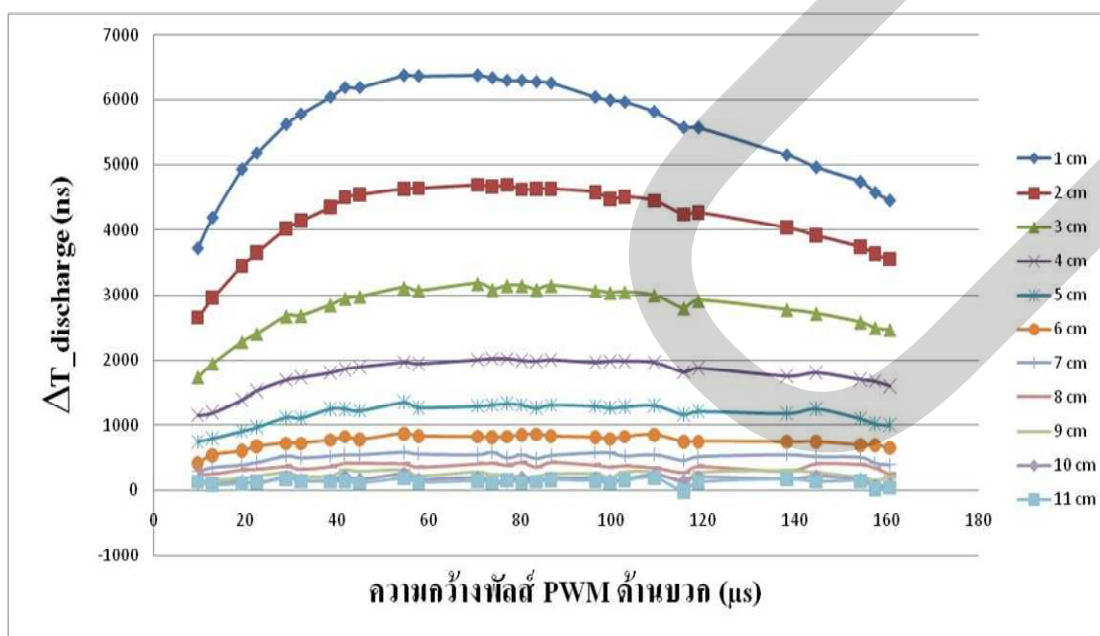
รูปที่ 4.7 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



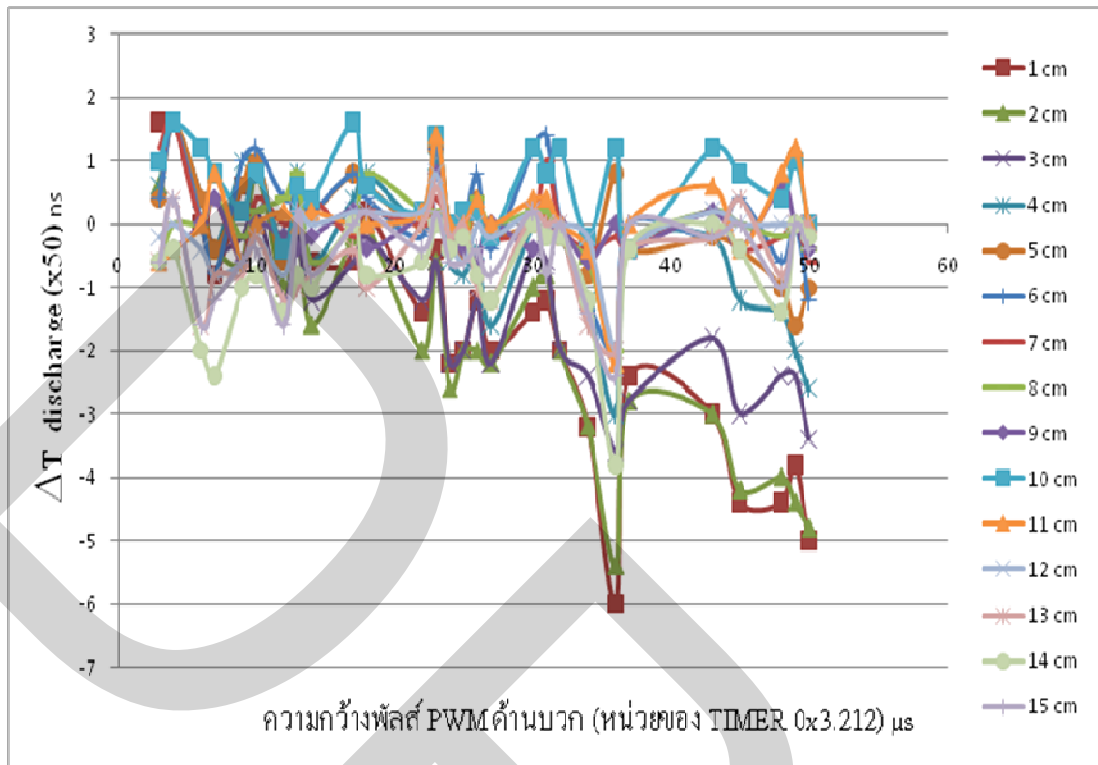
รูปที่ 4.8 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 7 ซม.



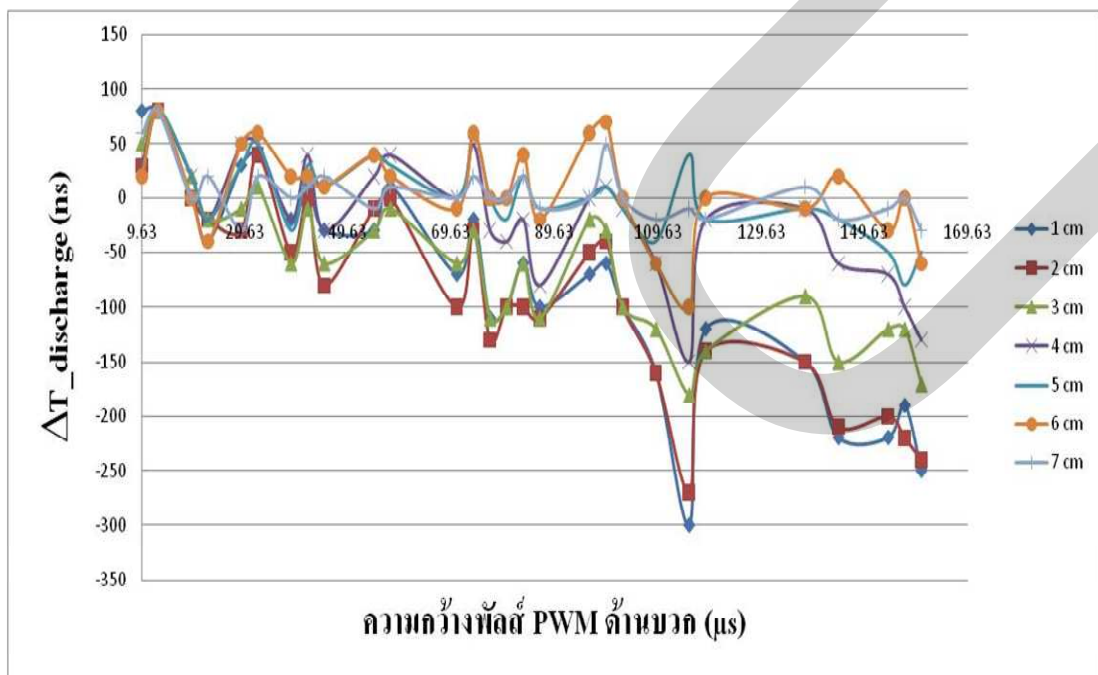
รูปที่ 4.9 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นทองแดง 4x4 ตารางนี้ไว้ระยะ 1 – 15 ซม.



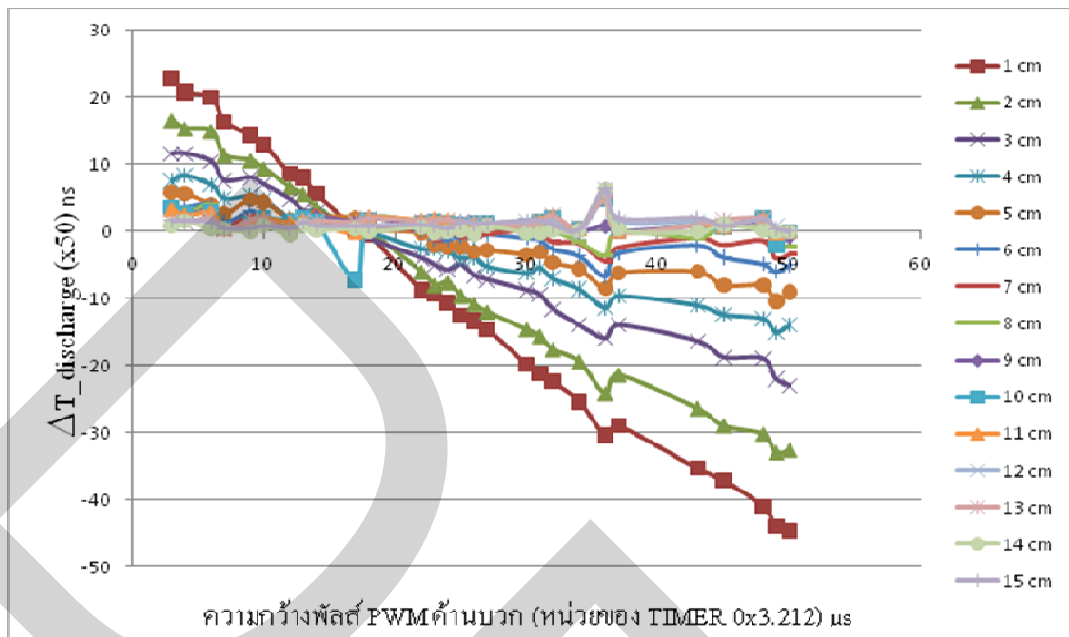
รูปที่ 4.10 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนี้ที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.



รูปที่ 4.11 กราฟคุณลักษณะจากการตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 ซม.



รูปที่ 4.12 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นเหล็กขนาด 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 7 ซม.



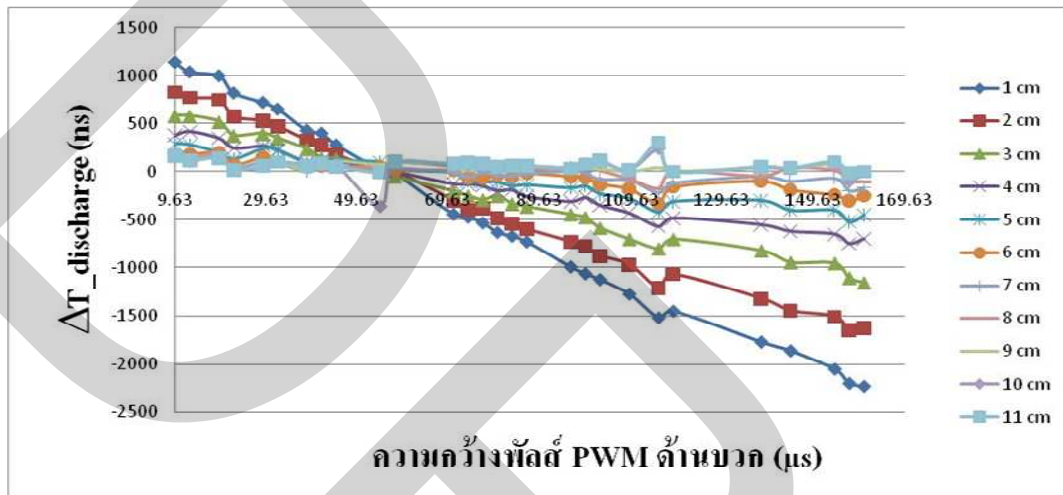
รูปที่ 4.13 กราฟคุณลักษณะจากการตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 ซม.

4.3 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กที่วางในอากาศ

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 7 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลา มีทั้งค่าบวกและลบ โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทเมอร์ 0) ที่ระยะตรวจจับได้ค่าใดๆ ก็ตามจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 48.19 ไมโครวินาที ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้รับจะมีค่าแตกต่างกันมาก โดยระยะตรวจจับได้เท่ากับ 7 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่มากที่สุด แต่ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่น้อยที่สุด

อ้างอิงรูปที่ 4.13 แสดงกราฟค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. เช่นกัน แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 11 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ที่วางในอากาศพบว่า กราฟผลตอบสนองที่ได้รับจะมีลักษณะที่คล้ายกับกราฟของแผ่นอลูมิเนียม กล่าวคือ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ มีการเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและความชันเป็นลบมาก

ขึ้น โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าโดยประมาณน้อยกว่า 57.83 ไมโครวินาที (18 หน่วยของไทเมอร์ 0) ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จะมีค่าเป็นบวก และตั้งแต่ค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 57.83 ไมโครวินาที ขึ้นไป ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้กลับมีค่าเป็นลบ อีกทั้ง ระยะเวลาตรวจจับได้ระหว่าง 8-11 ซม. ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้รับจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 4.14 ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ของแผ่นเหล็กขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.

4.4 ผลการทดสอบการจำแนกโลหะที่วางในพื้นที่

จากการทดสอบการจำแนกโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ที่วางในพื้นที่ พบว่า ระยะเวลาที่ตรวจจับโลหะได้ผ่านพื้นที่ของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5 ซม. ซึ่งมีค่าที่สั้นกว่าระยะที่ตรวจจับได้ในอากาศ โดยการจำแนกโลหะแต่ละชนิดผ่าน LED 3 สีมีแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 - 4.17 เหตุผลที่ระยะทางในการตรวจจับพบแผ่นโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ที่วางในพื้นที่มีค่าที่สั้นกว่าระยะที่ตรวจจับได้ในอากาศ คือ

4.4.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพัลส์กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นทราย ไม่ใช่ในอากาศ จึงทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ช้าลง

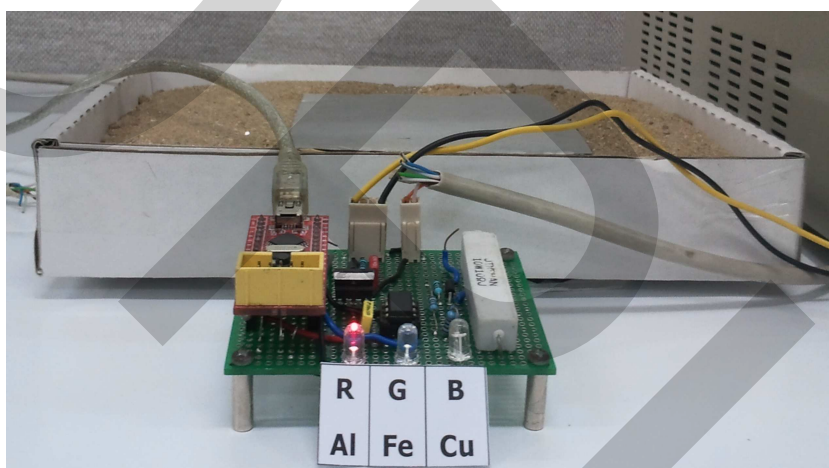
4.4.2 สนามแม่เหล็กถูกดูดกลืนพลังงานด้วยอนุภาคขนาดเล็กและความชื้นที่อยู่ในทราย รวมถึงทรายมีค่าสภาพความชื้นซบ (μ) ที่สูงกว่าอากาศ จึงทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปได้ในระยะเวลาที่สั้นลง

4.4.3 ขดลวดที่ใช้ตรวจจับโลหะสามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ในระยะเวลาที่สั้นลง

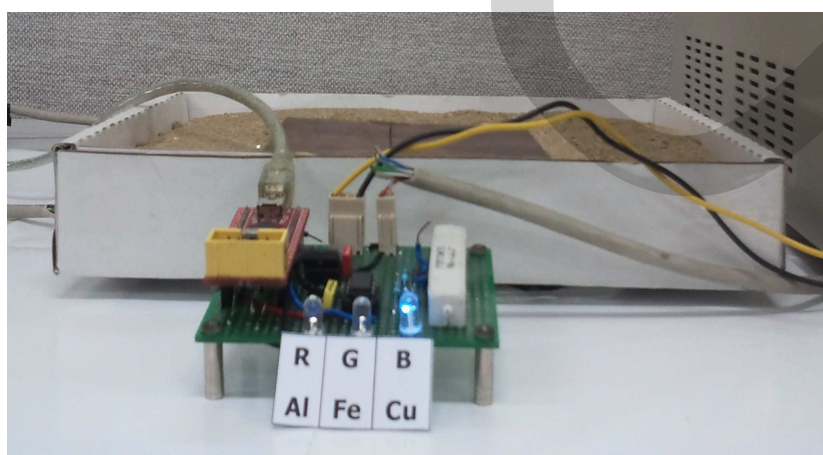
ในที่นี้ สีของหลอด LED ที่เลือกใช้งานในการแสดงผลการตรวจจับพบแผ่นโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว แต่ละชนิดจะมีจำนวน 3 สี แยกตามโลหะแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของแผ่น โลหะและสีของหลอด LED ที่ใช้แสดงผลการตรวจจับพบโลหะ

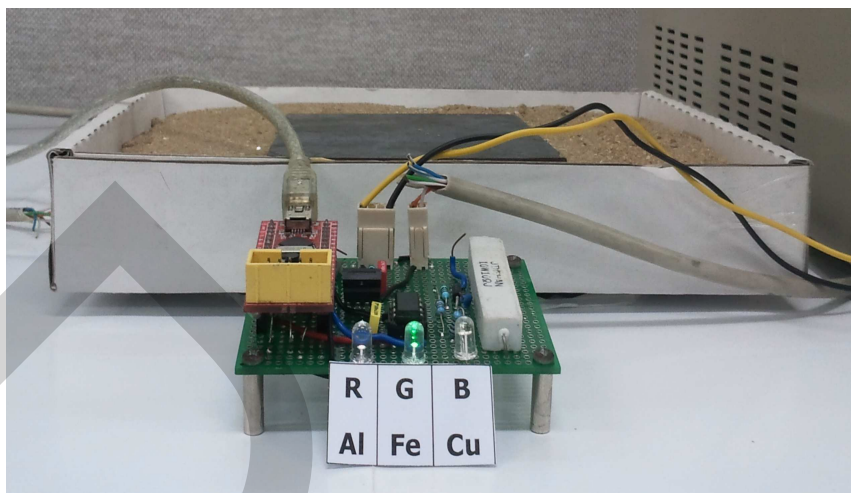
ชนิดของแผ่นโลหะ (ขนาด 4x4 ตารางนิ้ว)	สีของหลอด LED
แผ่นอลูมิเนียม	สีแดง
แผ่นเหล็ก	สีเขียว
แผ่นทองแดง	สีฟ้า



รูปที่ 4.15 ผลการตรวจจับพบแผ่นอลูมิเนียมที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีแดงสว่าง



รูปที่ 4.16 ผลการตรวจจับพบแผ่นทองแดงที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีฟ้าสว่าง



รูปที่ 4.17 ผลการตรวจจับพบแผ่นเหล็กที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีเขียวสว่าง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ พบว่า วงจรเปิด/ปิดพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่สามารถส่งสัญญาณพัลส์ PWM ไปยังโลหะและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ โดยในเบื้องต้น จะทำการทดสอบโลหะ 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก อีกทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 สามารถทำงานตามต้องการและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ด้านบวกต่างๆ กันได้เป็นอย่างดี โดยในงานวิจัยนี้เลือกอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะของโลหะจากการใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยใช้ค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด หลังจากนั้นได้ทำการจัดเก็บค่าและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับ เพื่อสร้างกราฟผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า โลหะแต่ละชนิดให้เส้นกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งกราฟผลตอบสนองของโลหะเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สัญญาณพัลส์ PWM ที่สร้างขึ้นสามารถส่งออกไปและตรวจจับโลหะแต่ละชนิดได้ในระยะทางไกลสุดเท่ากับ 7 - 8 ซม. และ 11 ซม. สำหรับโลหะขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และขนาด 4x4 ตารางนิ้วตามลำดับ 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 $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับจากแผ่นทองแดงก็จะยังมีค่าเข้าใกล้ศูนย์กลางมากขึ้นเท่านั้น นั่นคือขดลวดไม่สามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ นอกจากนี้ ระยะห่างในการทดสอบยังขึ้นอยู่กับขนาดของโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบด้วย และ ยิ่งถ้าขนาดของโลหะและขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้งานมีค่ามากขึ้นเท่าใด ระยะทางที่ตรวจจับ โลหะ ได้ก็มีระยะทางที่ไกลมากขึ้นเท่านั้น

5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

ผลงานที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้ คือ วงจรเปิด/พัลส์สัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดที่ทำหน้าที่ส่งผ่านและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นจากโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก, โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM รวมไปถึงวิธีที่ใช้ในการอ่านและบันทึกค่าเพื่อนำไปสร้างกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะแต่ละชนิด ดังนั้นงานวิจัยต่อไปที่ควรจะทำเพิ่มเติมในช่วงเริ่มต้นต่อไป คือ การนำค่าข้อมูลหรือกราฟผลตอบสนองเหล่านี้ไปสร้างสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equations) ของโลหะทั้ง 3 ชนิด และการสร้างเครื่องตรวจจับ โลหะของประเทศไทยในอนาคตได้จริง เพื่อเป็นการออกแบบ การทำวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทยเอง ลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าอุปกรณ์และวงจรใช้งานที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บผลการทดสอบให้ครบตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัยในครั้งนี้แล้ว พบว่า การเพิ่มระยะทางในการตรวจจับ โลหะให้ไกลมากขึ้นสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

5.3.1 โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการพันขดลวดให้มากกว่า 35 รอบ แต่ยังคงใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเท่าเดิมคือเท่ากับ 15 ซม.

5.3.2 โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้มากกว่า 15 ซม. แต่ยังคงใช้จำนวนรอบของการพันขดลวดเท่าเดิมคือ 35 รอบ

การกระทำ 2 วิธีดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่จะส่งออกไปจากขดลวดนั่นเอง จึงทำให้สามารถตรวจจับ โลหะได้ไกลมากยิ่งขึ้น การเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้มากขึ้นนั้นไม่มีผลต่อการตรวจจับ โลหะให้ไกลมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า สัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) มีผลทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์กลางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนตลอดเวลา จึงทำให้ได้รับผลการทดลองที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นในการทดลอง ควรจะเลือกใช้แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 Vdc จะทำให้ได้รับผลการทดลองที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากความคิดเห็นของผู้วิจัยในกรณีทีโลหะที่นำมาใช้ในการทดสอบไม่ใช่ อลูมิเนียม, ทองแดง และเหล็ก คือ ถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบมีโลหะจำพวกเหล็กผสมอยู่ (Ferro-Magnetic Material) แนวโน้มของกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะมีแนวโน้มที่เหมือนกับกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับพบเหล็กบริสุทธิ์ในงานวิจัยฉบับนี้ แต่ถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบมีโลหะชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferro-Magnetic Material) แนวโน้มของกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะมีค่าแตกต่างกันไป เพียงแต่พยากรณ์ได้เลยว่า “วัสดุต่างชนิดกันที่มีโลหะเจือปนอยู่จะมีกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันแน่นอน” อีกทั้ง ปริมาณของเนื้อโลหะที่เจือปนอยู่ในวัสดุแต่ละชนิดก็มีผลต่อระยะเวลาในการตรวจจับได้และค่าระยะเวลาการตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดด้วย

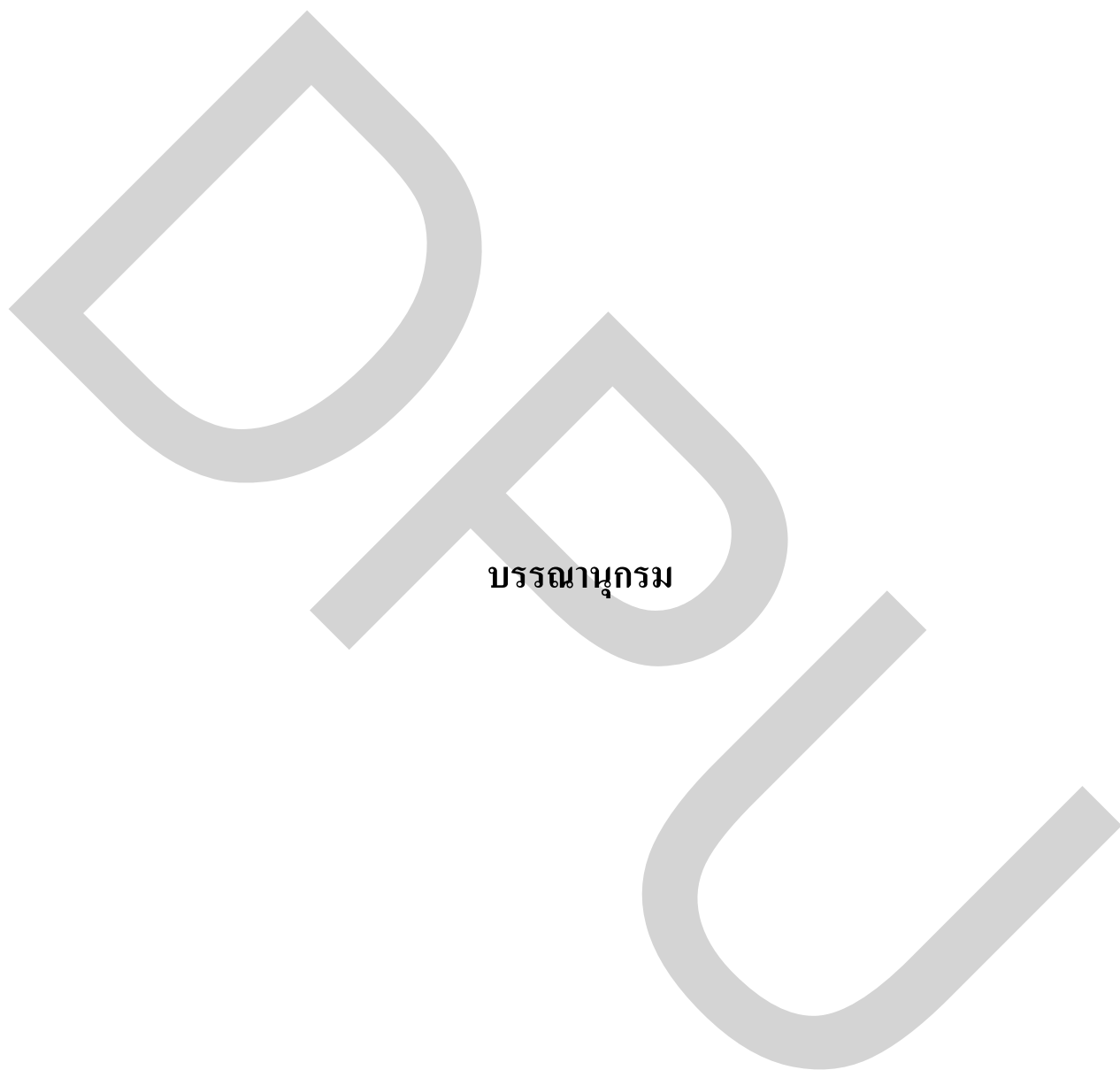
5.4 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัย

องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้ มีดังนี้

5.4.1 รู้และเข้าใจในหลักการออกแบบและหลักการทำงานที่ใช้ในการสร้างวงจรเปิด/พัลส์ สัญญาณ 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 แล้วนำไปสู่การพล็อตกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก ได้สำเร็จ โดยทำการตรวจจับโลหะที่วางอยู่ในอากาศและที่วางอยู่ใต้พื้นดินได้



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

หนังสือ

ประจัน พลังสันติกุล.(2549). **C Programming for AVR Microcontroller and WINAVR (C Compiler)** การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยภาษา C กับ WinAVR. กรุงเทพฯ: แอพซอพต์แวร์เทค.

สารสนเทศจากสื่ออิเล็กทรอนิกส์

บริษัท อีทีที จำกัด. (2000-2011). คู่มือการใช้งานบอร์ด ET-EASY168 STAMP. สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2553. จาก <http://www.ett.co.th>

ภาษาต่างประเทศ

BOOKS

I. Grant, F. S. and West, G. F. (1965). **Interpretation Theory in Applied Geophysics.** (1st ed.). New York, U.S.A. : McGraw-Hill.

S.R. Paranjothi. (2010). **Electric Circuit Analysis.** (3rd ed.). New Delhi, India : New Age International.

ARTICLES

J. A. Corbyn. (1980, March). "Pulse Induction Metal Detector." **Wireless World.** pp. 40 - 44.

J. A. Corbyn. (1980, April). "Pulse Induction Metal Detector – 2." **Wireless World.** pp.1 - 3.

ELECTRONIC SOURCES

Claudio Girardi.(2010).Single-layer Coil Inductance and Q. Retrieved October 16, 2010, from

<http://www.qsl.net/in3otd/indcalc.html>

DeepTech Metal Detectors. (2007). MEGAPULSE III - Pulse Induction Metal Detector.

Retrieved January 15, 2010, from **<http://www.deeptech-bg.com/megapulseIII/>**

MegapulseIII.pdf

DeepTech Metal Detectors. (2007). Coil and Search Head Design – Patents and Utility Models

(Part 1). Retrieved February 10, 2010, from **<http://www.deeptech->**

bg.com/search_coils.pdf

DSP,Lammert Bies.(1997-2010). Pulse induction metal detector. Retrieved August 14, 2010, from

http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.

Garrett Super Scanner.(2007). PI Metal Detector. Retrieved. March 19, 2010, from

http://www.garrett.com/security/s_superscanner_specification.pdf

Handheld Metal Detector.(2010). MD-1001. Retrieved April 1, 2010, from

<http://www.gunkamoy.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=352&Ntype=4>

James M.Ganby,Marcus Jackson.(March 7,1995). Patents of Metal Detector. Retrieved

July 25, 2010, from **<http://www.freepatentsonline.com/D356044.html>**

Michael R. Starcher.(2006). Blind Squirrel PI Metal Detector. Retrieved May 20,2010, from

<http://oldradiobuilder.com/MDET.html>

Nina Gajjar.(2006). FET Metal detector with IC Audio Amplifier. Retrieved June 11, 2010, from

<http://nina.foxdelta.com/detector.html>

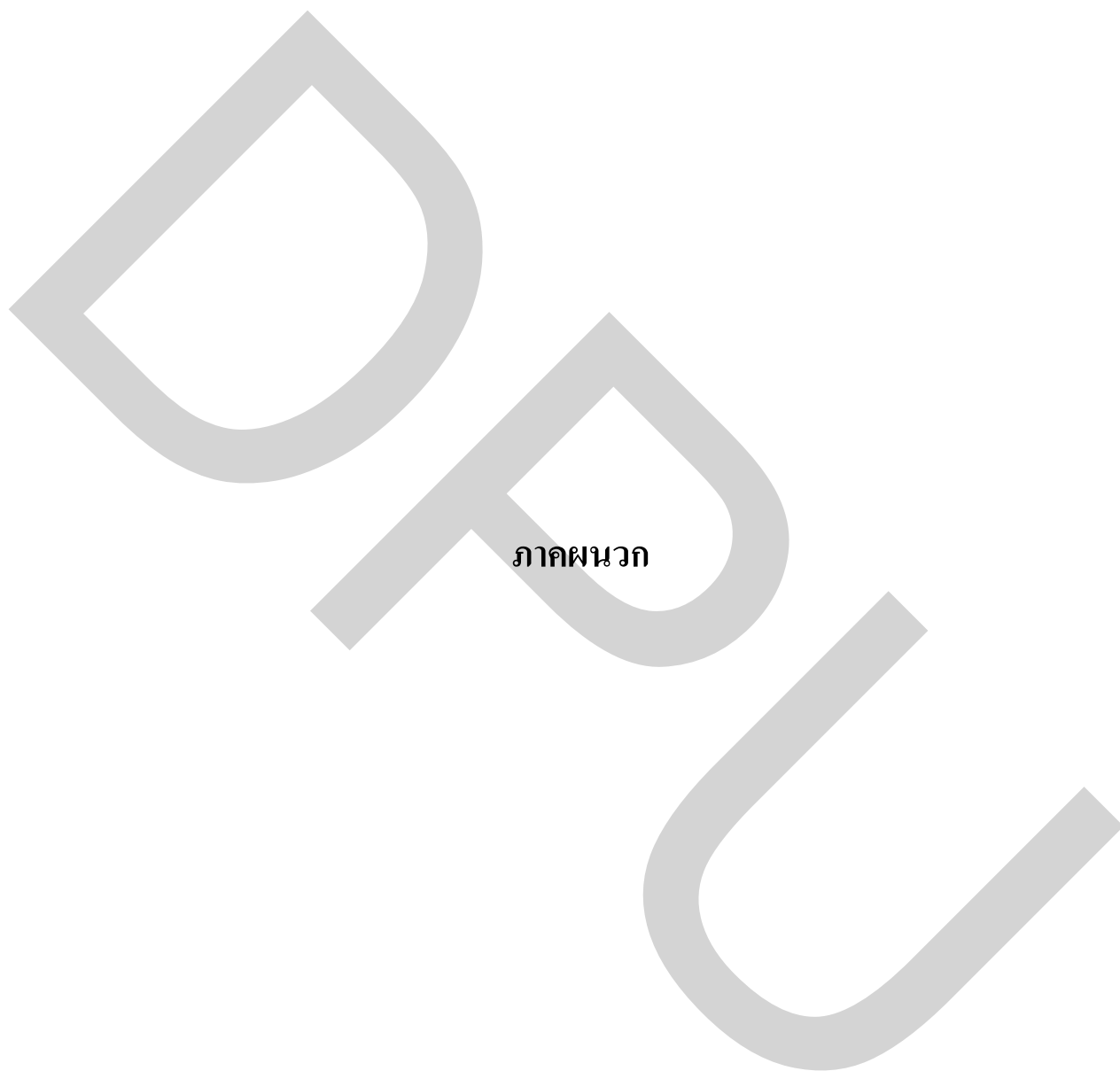
Salman Durrani, James Boxall, Stephen Purvis, Garrick Madge, and Tathagat Banerjee, .(2006).

A Pulse Induction Metal Detector (ENGN3227). Retrieved September 21, 2010, from

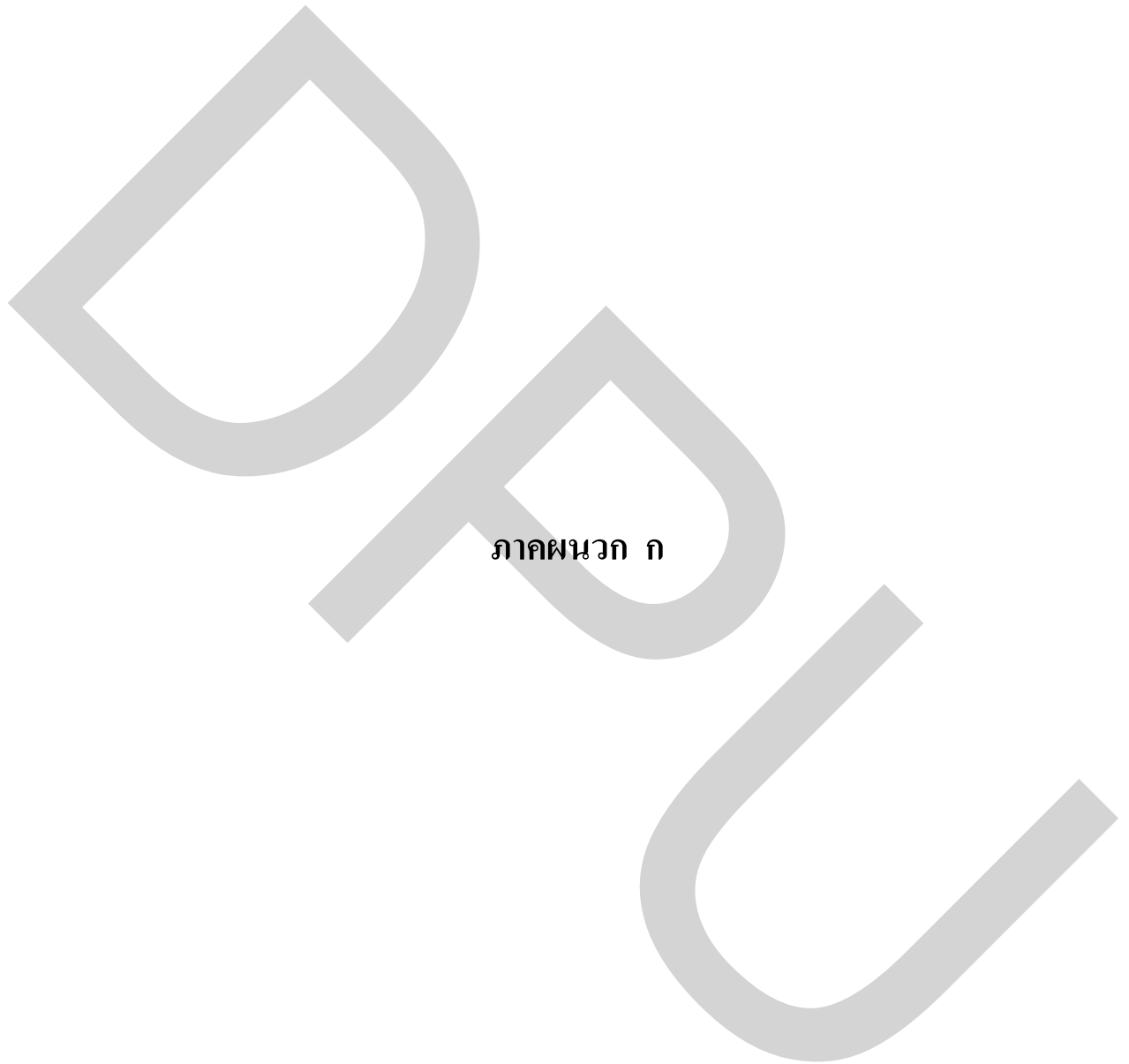
http://users.cecs.anu.edu.au/~Salman.Durrani/_teaching/TA5.pdf

Vallon.(2010). VMH3CS Mine Detector. Retrieved November 9, 2010, from

http://www.vallon.de/pdf/VMH3CS_leaflet_09_2010.pdf

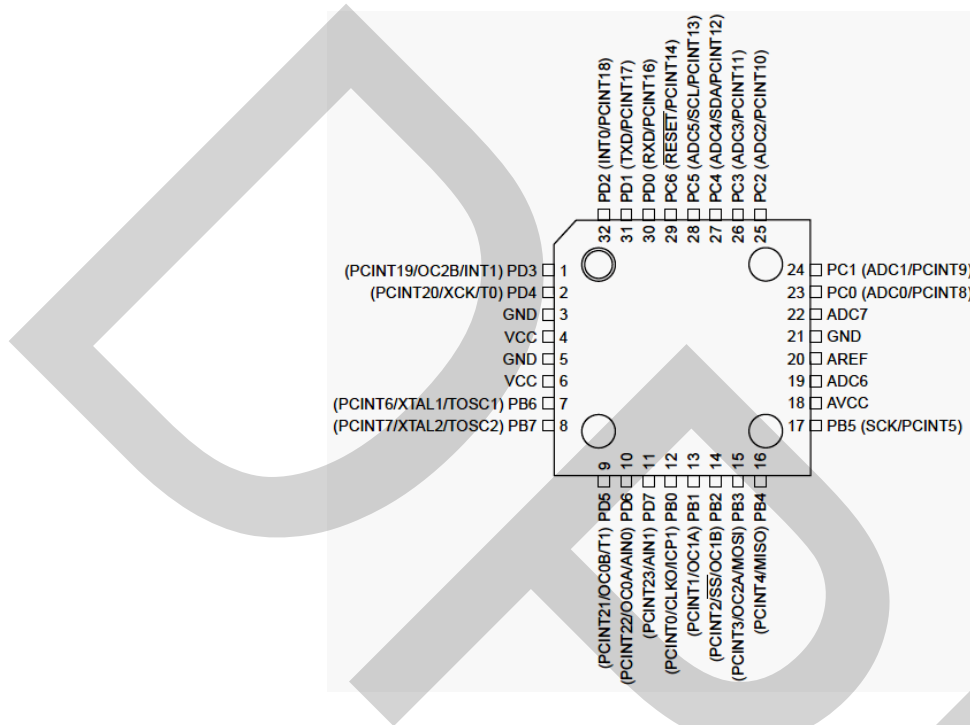


ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168¹



รูปที่ ก รูปร่างและตำแหน่งขาต่างๆ ของ AVR ATmega168 ชนิด 32 TQTF¹

ATmega168 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิตตระกูล AVR ของบริษัท Atmel ที่มีรูปร่างไอซีเป็นตัวถังแบบ 32 TQTF ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และทำงานที่ความถี่คล็อก 20 MHz มีขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต มี GPIO ใช้งานจำนวน 22 บิต และมี Digital GPIO จำนวน 14 บิต มีไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ใช้งานทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 2 ที่ทำงานแบบ 8 บิต และไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ที่ทำงานแบบ 16 บิต โดยในงานวิจัยนี้จะใช้งาน โมดูลและฟังก์ชันที่สำคัญ ดังนี้

1) ไทมเมอร์ 0 ถูกใช้งานเพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ซึ่งจะถูกส่งผ่านวงจรเปิด/ปิดพัลส์ แล้วส่งต่อไปยังขดลวด

¹ Atmel Corporation. (2009). Data Sheet - 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash for ATmega48/V, ATmega88/V, and ATmega168/V.

2) ไทเมอร์ 1 ถูกใช้งานเพื่อตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์หรือระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะ ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าเริ่มมีค่าลดลงไปจนถึงเวลาที่มีค่าเท่ากับ 0

3) ขาสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 0 ถูกใช้งานเพื่อไปสั่งการให้ไทเมอร์ 1 หยุดจับเวลา โดยถูกกำหนดโหมดการทำงานเป็นแบบตัดศูนย์ หรือ Falling Edge

4) ค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นจะมีค่าต่างๆ กัน เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่ค่าความกว้างของพัลส์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นอย่างไร โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM จากการใช้ AVR ATmega168 และค่าเวลาของความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีหน่วยวัดเป็นจำนวนเท่าของหนึ่งหน่วยของไทเมอร์ 0 และใช้ Prescaler (ตัวหารความถี่สัญญาณนาฬิกา) มีค่าเท่ากับ 64 จะแสดงไว้ในหัวข้อย่อยที่ 3.1 ของบทที่ 3

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 ของ AVR ATmega168

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 ของ AVR ATmega168 มีขนาด 8 บิต โดยมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1. ทำงานในโหมดไทเมอร์และเคาน์เตอร์ขนาด 8 บิต
2. เคลียร์ค่าไทเมอร์เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลตรงกัน พร้อมกับทำ Auto Reload
3. สร้างสัญญาณ Pulse Width Modulator (PWM) ที่เป็นแบบ Phase Correct PWM
4. สร้างสัญญาณความถี่ได้
5. มีปริสเกลเลอร์ (Prescaler)
6. สร้างสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้ เมื่อเกิดโอเวอร์โฟลว์หรือเปรียบเทียบข้อมูลตรงกัน

กลุ่มรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 ดังนี้

1. รีจิสเตอร์ TCCR0A (Time/Counter Control Register Channel A) เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแหล่งนาฬิกาที่ใช้และกำหนดโหมดการทำงาน

2. รีจิสเตอร์ TCNT0 (Time/Counter Register) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการนับ โดยค่าของการนับขึ้นอยู่กับการเซตบิตในรีจิสเตอร์ TCCR0A

3. รีจิสเตอร์ OCR0A (Output Compare Register Channel A) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในกำหนดค่าเพื่อเปรียบเทียบกับค่าในรีจิสเตอร์ TCNT0 เมื่อตรงกัน จะให้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในรีจิสเตอร์ TCCR0A

4. รีจิสเตอร์ TIFR (Time/Counter Interrupt Flag Register) เป็นรีจิสเตอร์แฟล็กแสดง การเกิดอินเตอร์รัปต์ของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0

5. รีจิสเตอร์ TIMSK (Time/Counter Interrupt Mark Register) เป็นรีจิสเตอร์เอ็นเอเบิลการใช้งานอินเตอร์รัปต์ของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 โดยกำหนดเงื่อนไขการเกิดอินเตอร์รัปต์ได้

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ของ AVR ATmega168

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ของ AVR ATmega168 มีขนาด 16 บิต โดยมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1. ทำงานในโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์ (Normal Mode) ขนาด 16 บิต
 2. มีโหมดเปรียบเทียบข้อมูลอิสระ 3 ช่อง
 3. มีโหมดตรวจจับสัญญาณอินพุตพร้อมกับมีโมดูลป้องกันสัญญาณรบกวน
 4. เคลียร์ค่าไทเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลตรงกัน (Clear Timer on Compare Match หรือ CTC) พร้อมกับทำ Auto Reload
 5. สร้างสัญญาณ PWM รูปแบบต่างๆ ได้แก่ แบบ Fast PWM Mode, แบบ Phase Correct Fast PWM Mode และ แบบ Phase and Frequency Correct PWM Mode
 6. สร้างสัญญาณอินเตอร์รัปต์ เมื่อเกิดโอเวอร์โพล์หรือเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลตรงกัน
- กลุ่มรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 มีดังนี้**

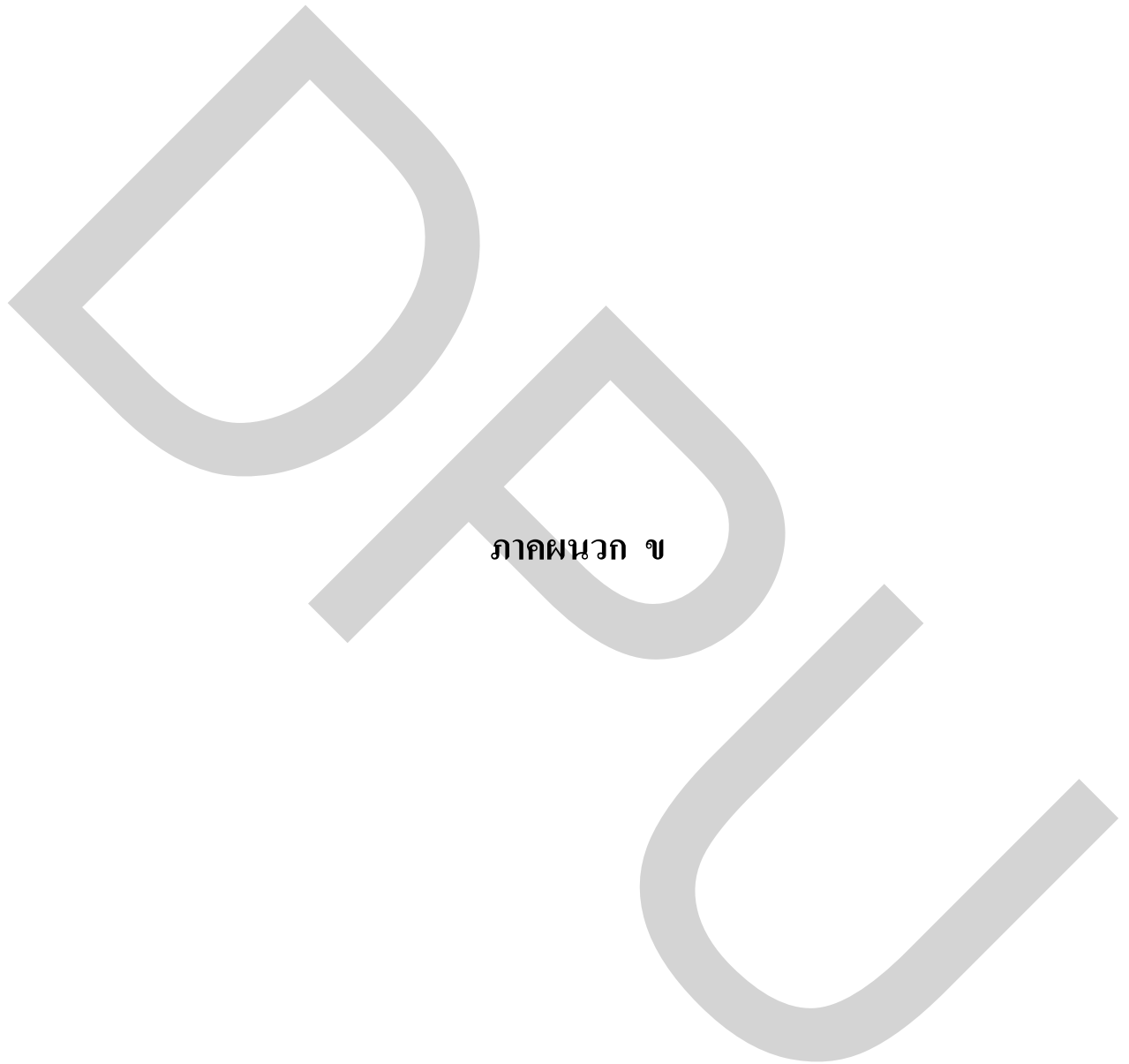
1. รีจิสเตอร์ TCCR1A (Time/Counter1 Control Register A) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดโหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 โดยจะใช้งานร่วมกับรีจิสเตอร์ TCCR1B

2. รีจิสเตอร์ TCCR1B (Time/Counter1 Control Register B) เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดโหมดตรวจจับสัญญาณอินพุตที่ขาพอร์ต PD4 (ICP1) สำหรับอินพุตตัวจับสัญญาณช่องที่ 1 และขาพอร์ต PE7 (ICP3) สำหรับอินพุตตัวจับสัญญาณช่องที่ 2

3. รีจิสเตอร์ TCCR1C (Time/Counter1 Control Register C) เป็นรีจิสเตอร์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสร้างสัญญาณในรูปแบบ non-PWM

4. รีจิสเตอร์ TCNT1H และ TCNT1L (Time/Counter 1) ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นในการนับ

5. รีจิสเตอร์ OCR1AH และ OCR1AL (Output Compare Register 1A) ใช้กำหนดค่าสิ้นสุดในการนับเพื่อเปรียบเทียบค่าข้อมูลตรงกัน
6. รีจิสเตอร์ OCR1BH และ OCR1BL (Output Compare Register 1B) ใช้กำหนดค่าของ Prescaler ที่ใช้งานเมื่อใช้งาน ไทเมอร์/เคาน์เตอร์
7. รีจิสเตอร์ OCR1CH และ OCR1CL (Output Compare Register 1C) ใช้กำหนดค่าของ Prescaler ที่ใช้งานเมื่อใช้งาน ไทเมอร์/เคาน์เตอร์
8. รีจิสเตอร์ ICR1H และ ICR1L (Input Capture Register 1) ใช้กำหนดค่าเพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณอินพุต



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองตรวจจับอนุภาคนิยมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

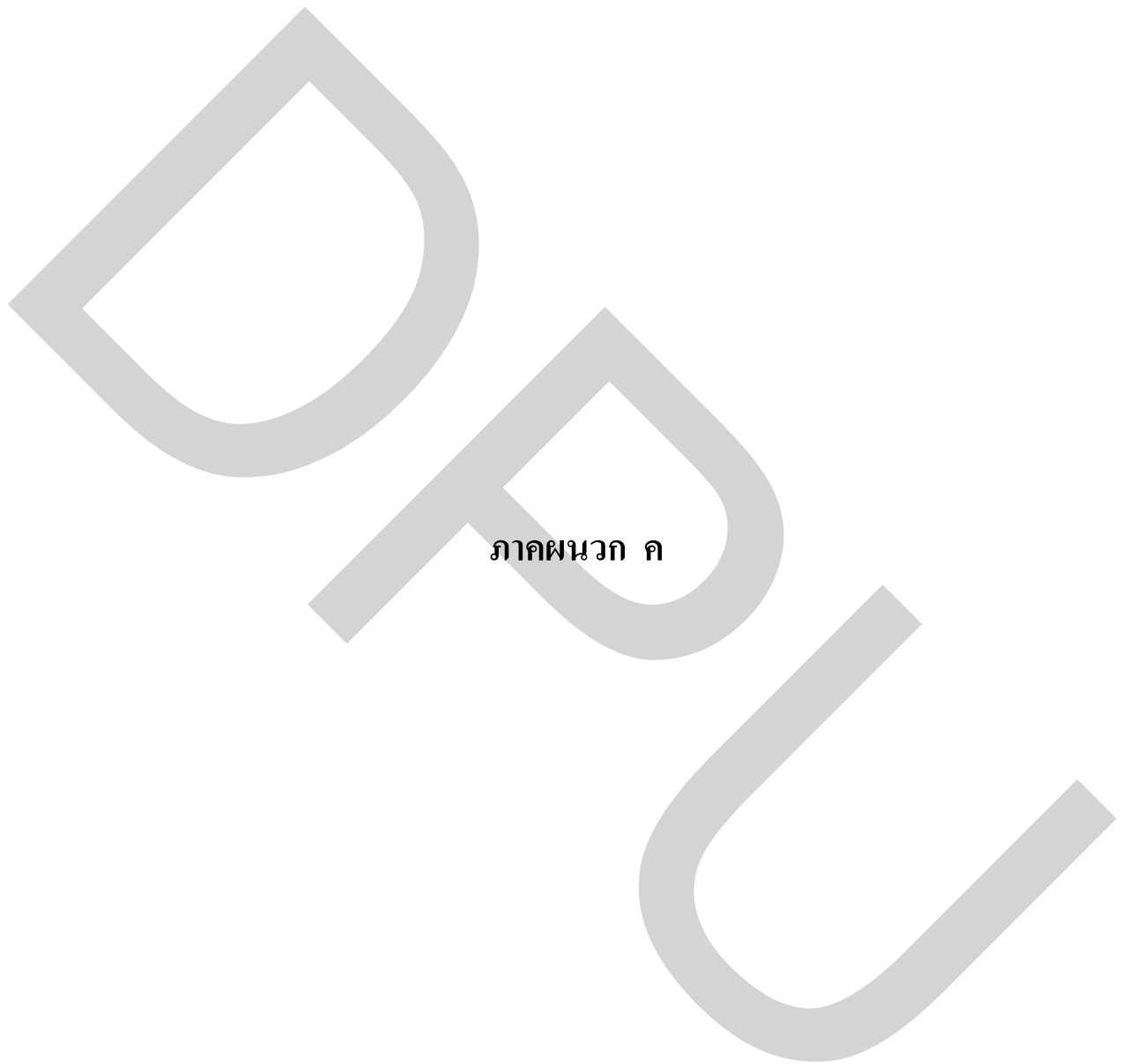
ผลการทดลองตรวจจับอนุภาคนิยมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ ก ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0

ตารางที่ ข ค่า $\Delta T_{discharge}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอนุภาคนิยมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว

ความกว้างพัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบอนุภาคนิยมขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	5	4.6	3.4	2	3.2	1.2	1.2	1.2	0.8	1.2	1.2	0.8	0.4	-0.6	0.2
4	4.4	3.8	2.4	0.8	0.6	-0.6	0	-0.2	0.4	0.4	0	0.2	-0.4	-0.4	0
5	4.4	3.2	2.6	1.2	2.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4
6	4.6	4.4	2	2.2	1.6	1.6	1.2	0.4	-0.4	1.2	0.8	1.6	-0.4	-0.2	0.6
7	5	4.2	2.8	1.8	2	1.2	1.2	2	2	1.2	1.6	1.6	2	1.2	0
8	3.8	2.8	2.4	1.4	0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	0.4	1.2	0.8	0.4	0.4	-0.4
9	4	3.2	3.2	1.4	1.2	1.2	1.2	0.2	0.4	0.4	0.6	1	0.4	0.2	0.6
10	3	2	1.4	1	1.4	1.8	1	0.2	0.6	0.4	0.6	0.6	0.2	-0.2	-0.6
11	3.2	3.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.8	0.6
12	1.6	1.4	0.2	-0.8	0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-1	0	0.2	0.4	-0.4	-0.6	-0.8
13	1.2	1.6	0.8	1.2	0.6	0.2	0.2	0.6	0.6	1.4	0.4	0.6	0.6	0	-1
14	1.4	1.4	0.6	1	0.6	0.2	0.6	1	1	1	1.2	1.4	0.8	0.8	0
15	0.2	-0.6	-1.4	-1.4	-0.6	-0.4	0.4	0.2	-0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	0.2	0
16	-0.8	-0.8	-0.6	0	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	0.6	1.4	1	1	0.8	0.4
17	-0.4	-0.2	-0.2	0.8	-0.4	-0.8	0.2	0.2	0.4	0.6	0.2	0.8	0	0	-0.2
18	0	-1	-1	-0.8	0.2	0	0	0.2	0	0.8	0.4	0.8	0	0	-0.2
19	-1.4	-1	-2	-0.6	0	0	1.2	0.8	0.6	0.8	0.8	1	0.6	0.6	-0.6
20	-2.4	-1.6	-1.2	-1.2	-0.2	-0.2	0.6	0.4	1.6	1.4	1.4	1.2	1.4	1.8	-0.2
21	-2.8	-2	-2	0	0.2	0.2	0.6	0.4	1	1	1	1	1	1	0.2
22	-3.2	-4	-1.8	-1.4	-1.8	-1.4	-1	-0.2	-0.2	0	0.2	0.8	-0.4	-0.8	-0.2
23	-3	-3	-2.4	-1	-1	-0.2	0.4	-0.4	1	1	1.2	1.2	1.2	1	-0.2
24	-4	-3.8	-2.4	-1.4	-0.4	0	1.2	0.4	0.4	1	1.2	1	0.4	1	0.4
25	-3.8	-4.2	-3.6	-0.8	-2	-0.8	-0.2	0	0.6	0.2	0.2	0.4	0.6	0.4	-0.6

ตารางที่ ข ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง พัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบอุณหภูมิขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	-4.4	-5	-4.6	-3.4	-1.8	-1.2	-1.2	0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.2	-0.8	-0.8	-0.8
27	-5.8	-4.8	-4.2	-2.4	-1.4	-0.8	0	0.2	-0.6	-0.4	0	0.8	0	0	-0.4
28	250	251.2	252	150.6	151.2	202.2	-0.8	-0.4	0.8	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8	-0.4
29	-6.6	-5	-3.6	-1.4	-1.6	-1.6	0	0	2	0.8	0.8	1.8	0.8	1.2	0
30	-5.4	-5	-4	-2	-0.8	-0.8	-0.4	-0.2	0.2	1	0.6	0.2	0.4	0.2	-0.2
31	-6.6	-5.8	-5.4	-3.4	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	0	1	0.8	0.6	0.4	0	-0.4
32	-6.4	-5.2	-5.2	-3	-0.4	-0.2	1	0.2	0.2	1.2	1.8	1.8	1.8	0.6	0.4
33	-9	-7.2	-6.8	-3.6	-3	-2.8	-1.2	-0.4	0	0.2	0.4	1	0.6	0.6	-0.4
34	-9.6	-8	-5.8	-3.6	-2.6	-2.4	-1.6	-1.4	-0.2	-0.4	-0.4	0.4	0.2	0.4	-0.6
35	-8	-7.2	-4.4	-2.4	-2.2	-2	0	0	0.2	0.2	0.4	0.2	0	0	-0.2
36	-14.6	-12.6	-11.6	-10.4	-4.4	-5.2	-1.2	-2.2	0.4	-2.8	-1.2	-0.8	2.8	-3.2	0.4
37	-9.6	-8.8	-5.6	-3.8	-3	-3	-0.8	-1	0	0	0	0.8	0	0	-0.4
38	-9	-8.4	-6.6	-4	-3.8	-2.4	-1	-0.8	-1.4	0.2	0.2	0	0.4	0	-0.8
39	-112	-214	-6.8	-5.2	-1.8	-0.8	-1	-0.6	-0.6	-0.2	0.4	0	-0.2	-0.6	-0.2
40	245	247	146	-5.6	-2.4	-2	-0.8	-1.6	-0.4	0	0.2	0.6	0	0	-0.2
41	-11	-8.2	-6.8	-4.2	-3	-3	-0.2	0	0.4	2	0.8	1.2	2	1.2	0
42	-10.6	-9.4	-6.6	-4.6	-3.2	-2.6	-1.2	-0.4	1.2	1.4	1	0.8	1.4	1	0
43	-11.8	-10.2	-7.4	-4.8	-4.2	-2.8	-2.2	-1.2	-0.8	-0.8	-0.4	0.2	-0.8	-0.4	0
44	-10.6	-10	-7.6	-5.2	-3.2	-1.8	-0.8	-1.2	0	0	0	0.4	0	0	0
45	-12.2	-8.8	-7.6	-5.2	-2.6	-1.8	-0.2	-0.4	-0.6	-0.6	0.2	0.2	-0.4	-0.2	-0.2
46	-12.6	-10.8	-8.6	-5.6	-4	-3.4	-1.8	-1.2	-1.8	-0.2	0	-0.4	0.2	0.2	-0.2
47	-4.4	-11	-9	-6	-3.4	-3	-1.6	-1.2	-1.6	0	0	0	0	-0.4	-0.4
48	-12.8	-9.4	-8	-5	-3	-1.2	-1	0	0	0	1	0.6	0.2	0.2	-0.6
49	-13	-10.6	-7.8	-6.2	-3	-2	-0.8	0	0	1.6	1.6	1.2	2	1.4	0
50	-13.6	-10.8	-8	-5.4	-4.4	-2.8	-0.6	0	1.2	1.6	1.4	1.4	1.6	1.2	-0.4



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองตรวจจับอนุภาคนิยมขนาดใหญ๋ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

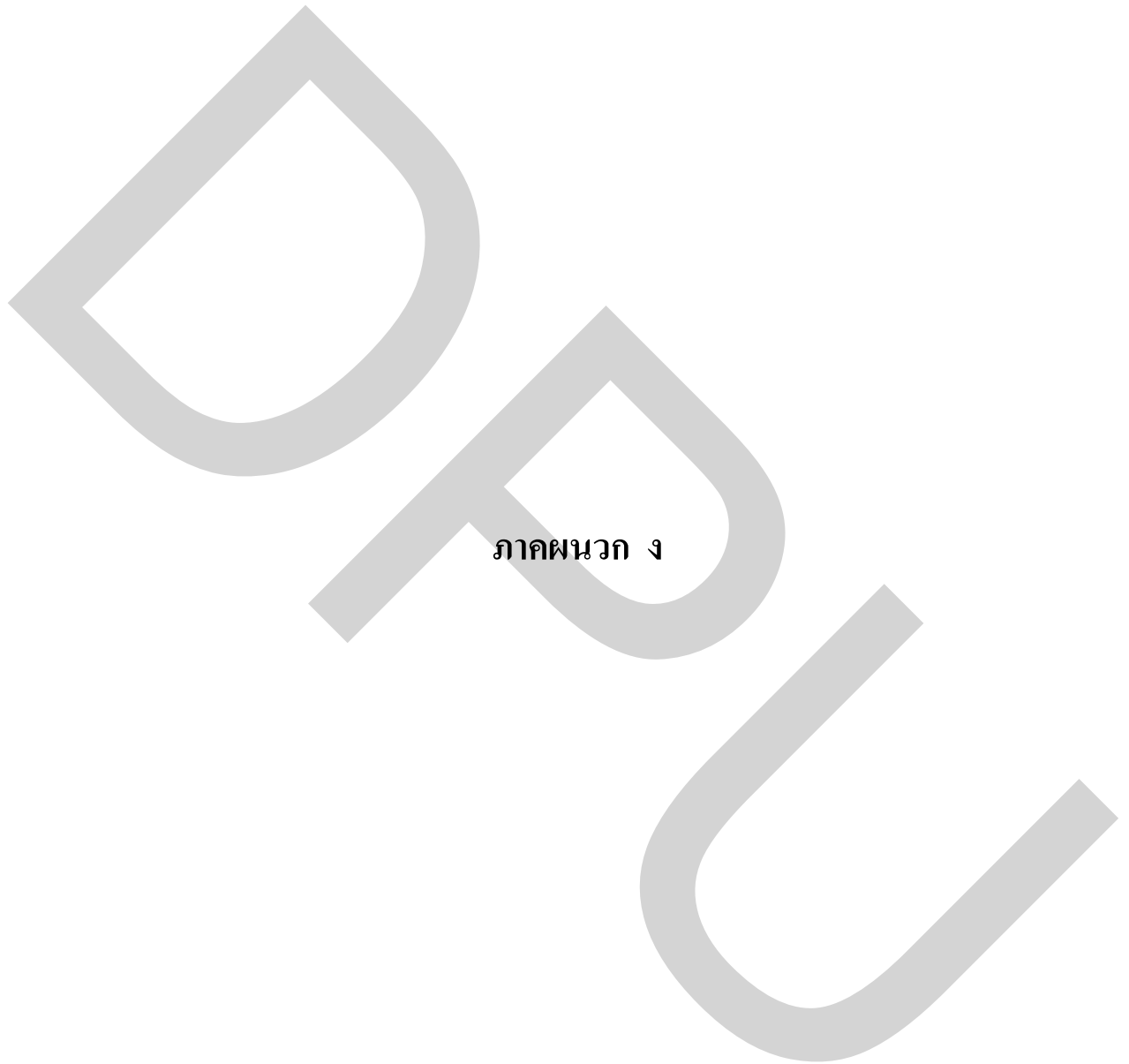
ผลการทดลองตรวจจับอนุภาคนิยมขนาดใหญ๋ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ ข ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไมโคร 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไมโคร 0

ตารางที่ ค ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอนุภาคนิยมขนาดใหญ๋ 4x4 ตารางนิ้ว

ความกว้างพัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบอนุภาคนิยมขนาดใหญ๋ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	72.8	52.6	35	24.4	16.6	10	7	5	3.8	4	3	3	2.6	2.4	1.4
4	78.2	56.4	38	26.6	18.2	13.4	8.2	6.4	4.6	5	3.4	3.6	3.4	3	1.4
5	81.4	59	40.4	27.6	18	-243	-246	5.6	4	4.8	3.6	2.4	1.6	1.6	1.6
6	83.2	61.2	40.2	28.4	18.8	11.6	9.6	5.6	2.8	3.2	2.6	2.6	2.6	2.2	1
7	84.4	62.4	43	29.8	19.8	13.8	8.8	7.8	4.8	4.8	2.8	2.8	2.8	2.4	1
8	84	61.8	43	30.2	20.6	13.2	9.4	6.2	4.4	5	3	1.8	2	2.2	1.6
9	83	61.6	42.4	30.6	20.6	12.4	9.6	6	5.2	4.6	4	2.4	2.4	2	1.6
10	81.8	61	41.6	29.8	20	12.6	9	5.8	4.2	4.2	3.8	2	2	1.6	0.6
11	79.6	-196	41.6	30	20.2	13.6	9.4	6.6	4	4.4	3.6	3	3.2	2.2	1.8
12	78.2	59.6	42.6	29.8	20.2	14.2	9.8	6.6	5.2	6	4.2	3.4	2.2	2.2	1.4
13	76.2	57.8	42	30	20.2	13.8	9.2	6.2	4.4	4.6	3.4	2.6	2	2.4	1.4
14	72.6	56	40	28	19	13.4	9.2	6	3.8	3.8	3.8	2.6	2	1.8	1.8
15	69.6	55.2	-216	28.6	19	13.6	9.8	7	4.4	4.8	4.6	3	2.2	1.8	1.8
16	66.8	52.8	37.2	28	18.6	12.8	8.2	5.4	3.4	4	2.8	2	1.8	1.8	1.6
17	62.6	50.6	37.2	27.8	18	12.6	8.6	6	4.4	4.8	4.8	2.8	0.8	1.2	2.2
18	57.4	47.8	35.4	25	17.8	12.8	8.6	6.6	4.2	4	4.2	2.6	1.4	1.2	1.8
19	53.6	44.6	32.8	23.6	16.8	10.6	7.6	4.6	3	3.8	2.6	2.2	2.6	2.2	1
20	49.4	42.6	32	24.2	16.2	-244	-248	-251	-252	-251	-253	-253	-253	-253	-203
21	-209	-215	30	22.6	15	12	7.2	5	3	4.4	3	1.8	1.8	1.2	0.4
22	41.6	38	29.4	21.6	14.4	9.6	7.4	4.4	3.8	3	3.4	1.8	1.6	1.6	0.8
23	37.4	34.6	28	21	14.2	9.6	6.2	5.2	4	4.2	4.2	2.2	2.6	2.2	1.2
24	34	32.4	25.8	20	14.2	10	7	4.8	3.2	3.4	2	1.8	2	2	1.8
25	29.4	29.2	24.6	19.4	13.4	10	6.2	4.4	3.6	4.6	3.2	2.8	2.8	2.6	2

ตารางที่ ค ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง พัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบอุณหภูมิขนาดใหญ่ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	24.6	27.4	23.2	18	12.8	10	7	3.6	3.4	4.2	2.8	1.8	1.8	1.6	0.2
27	19.6	24.6	20.8	17	12.4	8.6	6.8	3.8	2.6	3.6	2.8	2.2	1.8	1.4	1.4
28	271.6	277	274.8	272.4	266.8	7.6	5.4	3.8	2.4	3	1.8	1.8	1.8	1.8	0.2
29	12.2	17.6	17.4	14.8	10.2	5.8	5.2	4.2	2.4	3.4	2.6	1.8	1.4	1	1.6
30	7.8	15.2	16.2	14.2	10	7.6	5.4	3.2	2.6	3	3	2	2.2	0.8	2.2
31	3.4	12.6	14.8	12.8	9.2	6.6	4.8	3	2.6	3	3	1.8	2	0.8	1.4
32	-2	8.8	11.6	11.2	7.8	5.8	3.4	2.6	1.8	3	2	1.6	7.2	1.8	1
33	-4.2	6.4	11.2	11.6	8	6.2	5.2	4	2.8	4.4	3	3	3	3	1.4
34	-9.6	4.2	9	9.6	8	6.8	4.4	3.6	2.8	4	2.2	1.4	1.4	1.4	1.4
35	-23	1.2	7.6	8.6	7.2	4.6	5.2	2.6	2.6	3	2.4	1.4	1	2.6	2.2
36	-24.6	-7	0.6	3	0.2	-0.2	-1	0	-0.6	5.6	6.6	3.4	1.8	3.8	4.2
37	-22.8	-5	3	6	4.8	4	3.4	2.4	1.4	2.8	1.2	2	2	2	1.6
38	-181	-7.2	2.6	5.6	4	4.6	3.6	2	2	2.6	3.2	1.6	1.6	1.6	1.6
39	-32.8	-11.8	-0.8	2.6	3.4	2.2	1.4	1.4	1.2	1.2	1.4	-0.6	-0.2	-0.2	0
40	219.8	241.8	-2.6	2.2	2.2	2.2	1	1	-0.6	1.8	1.4	2	2.2	2.2	0.2
41	-39.6	-16	-2.4	2.4	2.4	2.6	2.6	2.2	1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	0.6
42	-44.2	-18	-5	1.4	2	2.8	2.8	0.6	0.6	1.8	1.8	0.8	1.4	1.6	1.8
43	-48	-22.2	-6.6	-0.4	1.4	0.4	1.8	0.6	2	2	2	0	0.8	0.6	2
44	-52.6	-24.2	-8.6	-1.4	-0.2	0.6	0.6	1	1	1.6	2.2	0.6	0.6	0.8	0.6
45	-56.4	-27.8	-10	-2.8	-1	0.4	0.4	0.4	0.4	1	0.8	1.4	2.4	2.2	1
46	-59.6	-29	-11.2	-3	-0.6	1.8	1.2	1	1.6	2.8	2.4	2	2.8	2.8	1.4
47	-64	-31.8	-13.6	-5.2	-1.8	0.4	1	0.4	0.6	2	0.6	1	1	0.8	0.4
48	-68.2	-34.8	-15.4	-5.6	-2.4	-0.6	-0.2	0	-0.6	1.4	0.6	1.2	1.2	1.2	0.8
49	-72.4	-37.6	-16.8	-6.8	-3	-0.8	-0.4	0	0	2	0.4	2	2	1.8	0.8
50	-74.2	-39.2	-16.8	-6	-2.6	-0.2	0.6	0.6	1.2	3.2	2.4	1.6	1.6	2	2



ภาคผนวก ง

ผลการทดลองตรวจจับทองแดงขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

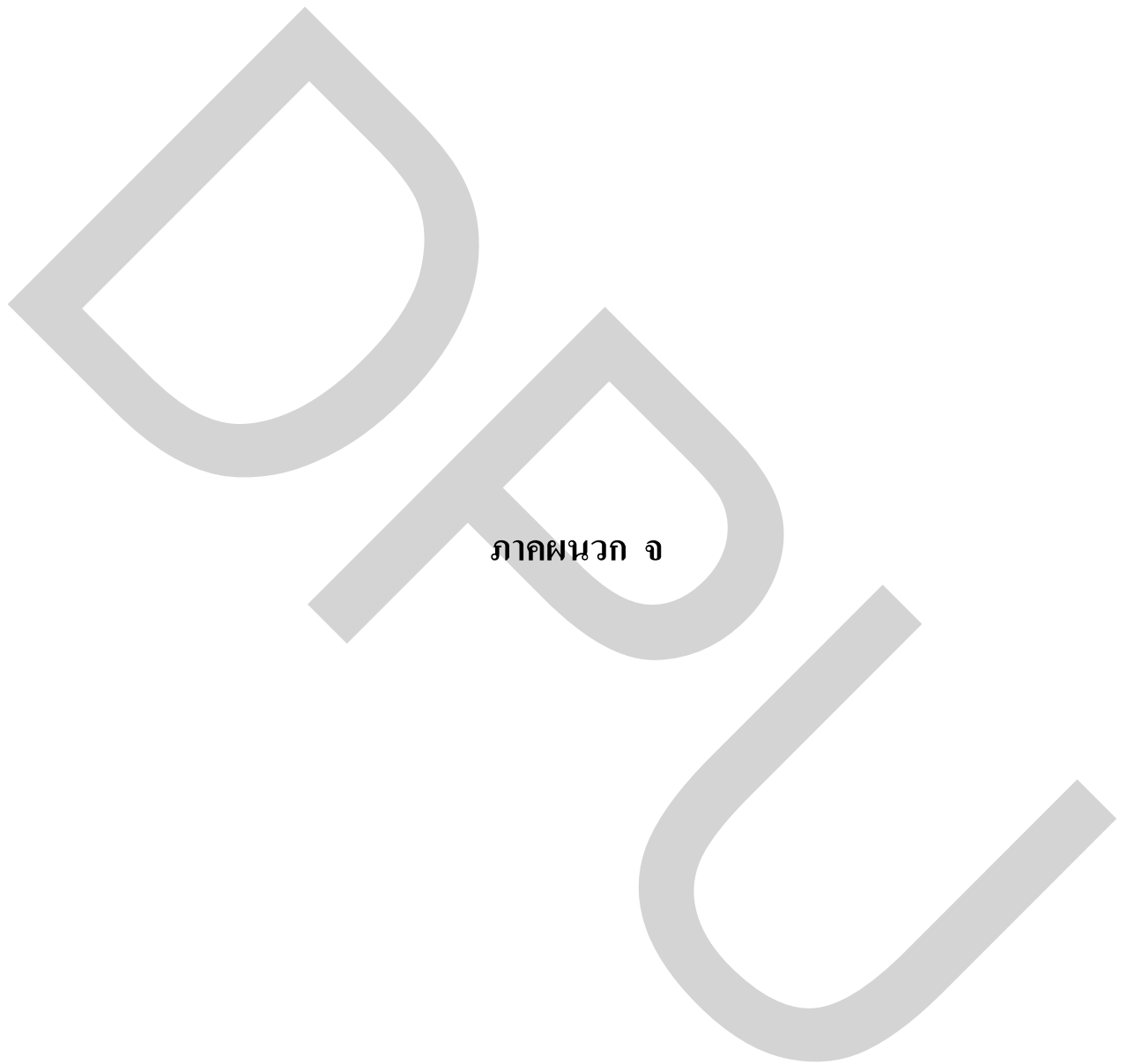
ผลการทดลองตรวจจับอูมิเนียมขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ ค ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มี การเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0

ตารางที่ ก ค่า $\Delta T_{discharge}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว

ความกว้างพัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบทองแดงขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	8.2	7.4	5.8	5	2.8	2.8	1.2	1	1.4	1.4	1.4	1.4	0.2	0.2	0.4
4	9	7	4.8	3.8	2.6	2.2	1.4	2	2	1.6	2	1.2	0	-0.4	-0.8
5	9.2	7.6	5.4	4.8	3	2.2	2.4	1.8	2	2	2	1.6	0	0	0
6	10	8.8	6.8	4.6	2.8	2.4	1.4	1.4	1.6	-0.4	-0.4	0.6	0	-0.4	-0.4
7	11.6	9.6	7.4	5.4	4	3.6	2.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	0.4	0.4	1.6
8	11.6	8.8	6.8	4.8	4.4	3.8	1.8	1.8	1.8	0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.6	-1.2
9	11.8	8.4	6.4	4.4	3.4	2.6	0.4	2.4	2	0.2	0.2	0.2	-0.6	-0.8	-1.6
10	11.8	8.6	6.6	4.4	3.2	2.4	0.4	1.6	1.6	0.4	-0.6	0.6	-0.6	-1	-1.6
11	12.2	10.4	7.2	5.2	3	2.6	2.2	1.2	1.6	1.8	2	1.6	1	0	0.2
12	12.4	9.6	6.4	5	3.4	2	1.8	0.6	1.2	1	0	0	0.2	-1.2	-0.6
13	11.6	9.6	7.6	4.6	4	2.6	2.2	1.6	1.4	0.6	1.6	0.4	0.8	0	-0.8
14	12.2	9	7	5	2.4	1.8	1.8	1	1	0.4	1	1	0	-0.6	0.4
15	12	9.2	6.6	3.8	3.4	2.2	1.8	0.6	1	-0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.6	-0.4
16	11	8.6	6.8	4.8	2.8	2.2	2.8	1.2	0.6	0.6	0.2	0	-0.2	-1.6	-1.4
17	11.4	8.2	7.2	4.4	2.4	2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	-0.4	-1.4
18	11	7	6	4.8	2.2	1.2	0	0	0	0	-0.8	0	-0.2	-1.4	-2
19	11.6	10.6	6.6	5	2.6	2.8	1.6	1.6	1.6	0.6	0.8	0.6	0.2	-0.2	0.4
20	-243	-244	-248	-46.2	4.6	4.6	3.6	3	3	1.6	1.8	1.6	0.8	0.8	1.2
21	12	9.4	8.4	4.6	4.2	3.6	2.2	1.8	1.8	1	1.2	0.6	0.4	-0.2	-0.6
22	11	7.4	6.6	3.4	2	1.2	1	0.6	0.2	0.6	-0.6	-0.4	-0.4	-2	-2
23	12	8.4	6.6	5	3.4	3.2	2	2	2.2	1.2	1.4	1.6	0	0	0
24	10.2	8.2	6	4.6	3	2	1.2	0.8	1	0.2	-0.2	0.4	0	-1	-1
25	10.2	8.2	6.2	3.6	2.4	2.4	1.6	1.6	0.8	0.2	0.6	0.4	1.2	-0.6	-0.8

ตารางที่ ๓ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง พัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบทองแดงขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	10.4	8.4	5.8	5	3.6	2.8	1.6	1.2	1.6	0.4	0.4	0.4	0.4	-0.2	-1.2
27	11	10	6.8	6	4.4	3.4	3	1.8	1.6	1.8	1.8	0.8	0.4	-0.2	0
28	11	8.8	6	4.2	3	2.4	1.4	1.2	1.6	0.8	0.4	0.8	0.2	50.4	0.2
29	10.2	8.2	6.8	4.8	3.8	3.2	2.4	2	2.2	0.6	1	1	0.2	-0.4	-0.2
30	9	7.2	6.2	4.4	1.8	1.6	0.6	0.4	0	0	-0.2	-0.2	-1	-0.4	-1.4
31	9	7.2	5	4.6	2.2	2	1.2	0.2	0	0	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-1.6
32	10.2	9	7	5.8	4	3	3	1	1	1.2	2	1.6	0	0.6	0.8
33	8.2	8	6	3.2	3	2.8	2.6	1.8	1.8	1.8	1.2	1	0	0	0
34	8	7	6	4	2	1.8	1.8	1.2	1.8	0.8	0.2	0	0	-1.8	-1
35	10	8	6	3.8	3	2.2	1.2	1.4	1	0.6	0.2	0	0	0	0
36	8	6	3.4	2.4	2	3.6	4.8	5.6	10	6	6.6	0	2	-1.6	-1.6
37	9	6	6	4	4	4	2.8	2	2	1.2	0.4	0	0	-0.6	-0.8
38	9	7	5	3	2	2	2	1.6	0.4	1.2	2	2	0	0	0
39	8.2	6.2	4.2	4	2.2	0.6	0.4	0.6	0.8	0.2	0.4	0.4	0.2	-1.6	-1.4
40	6	6	4	4	2	1.6	1	1	1	0.4	0.2	0	0	-0.4	-0.4
41	8.6	6.6	4.6	3.6	3.6	3.6	3.6	1.6	2.4	1.6	1.6	1.6	-0.4	1.2	1.2
42	6.2	5.2	5	3	3	2.6	2	1.2	1.6	0.4	0	0	-0.8	-1.2	-1
43	7.4	5.8	5.6	2.8	1.8	1.4	0.6	1.4	1.6	0.4	0.2	0.4	0.4	-1	-1.2
44	5.8	4	3	2.8	0.8	1.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0	-1.2	-1.2
45	7	6.6	5.2	5	2.6	2.4	1.6	2	2	1.6	0.4	0.2	0	-0.8	-0.4
46	5.2	4.8	3.2	2.2	1.2	1	0.8	1.2	1.2	0.8	1	0.8	-0.8	-0.8	-0.8
47	5.6	4.6	3.8	3.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.6	-0.2	-0.2	-0.2
48	5	4.8	3	3	1.4	1	1	0.4	0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0	-0.2
49	5.8	5.6	5	4	3.8	3.8	3.4	2	2	2	2	2.2	0	1.2	0.4
50	5	4.2	4.2	2.2	1.8	2	1.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.8	-0.8



ภาคผนวก จ

ผลการทดลองตรวจจับทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

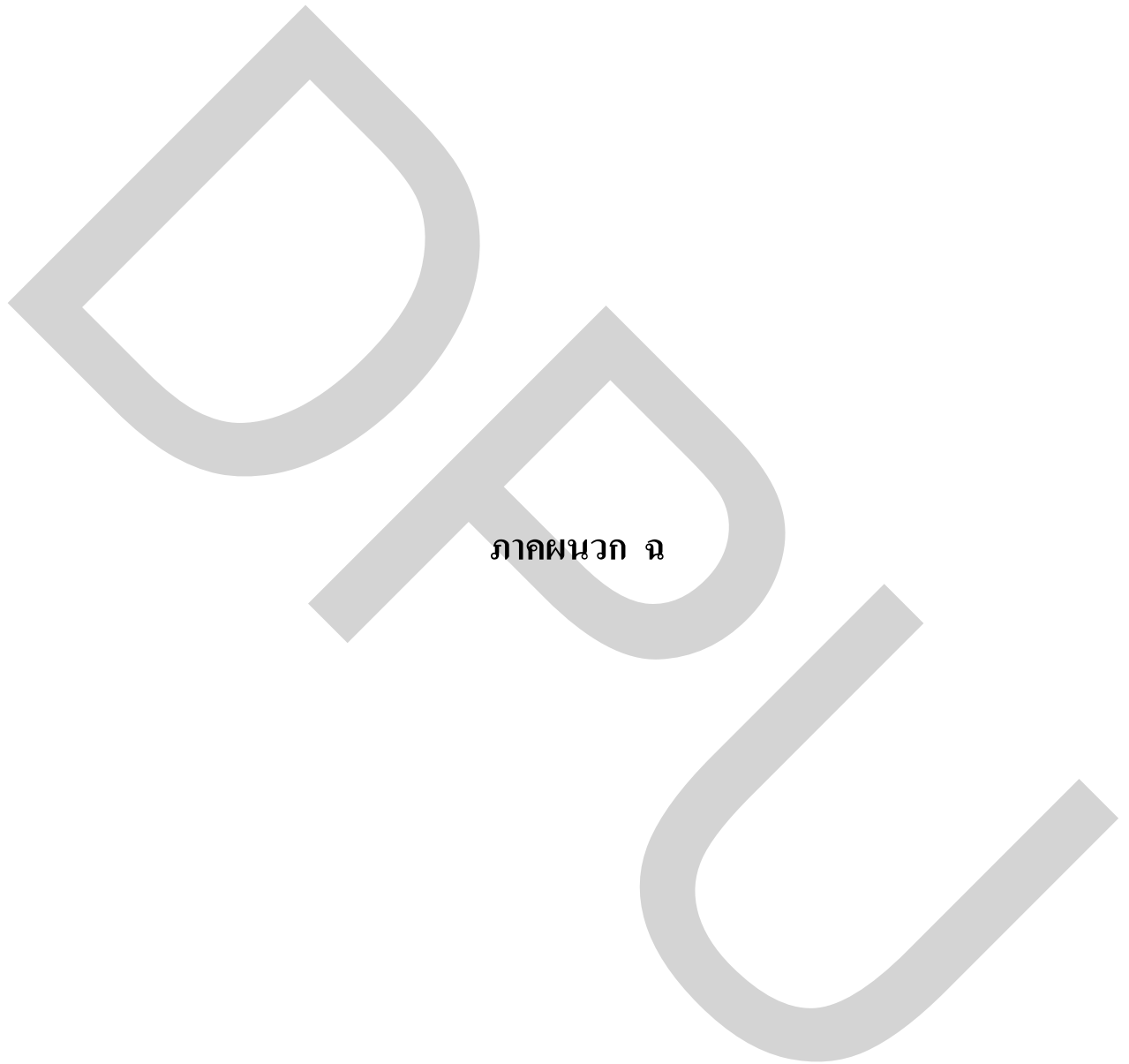
ผลการทดลองตรวจจับทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ ง ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0

ตารางที่ จ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว

ความกว้างพัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบทองแดงขนาดใหญ่ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	74.4	53.2	34.6	23	15	8.2	5.8	5	3	2.4	2.6	2	2	0.4	1.6
4	83.8	59.2	38.8	23.8	16	10.8	7	5.2	3	2	1.6	1	1	-0.4	0.2
5	92	65.6	43.6	27	-33.4	-244	7.4	6	3	3	2.6	2.2	2	1.4	1.8
6	98.6	69	45.6	27.8	18.2	12	7.8	6.4	3.6	2.8	2	2	0.4	0	0.4
7	103.6	73.2	48.2	30.6	19.4	13.4	8.6	6.6	4.4	2.2	2.4	0.6	0.6	0.6	0.6
8	107.8	-179	50.4	32.8	20.4	13.8	9.2	6.2	4.2	3	2.4	1.2	0.4	-0.4	-0.4
9	112.4	80.4	53.6	33.8	22.4	14.4	10.6	7.4	5.4	4.2	3.4	2.4	0.4	1	0.6
10	115.6	82.8	53.8	34.6	22.2	14.4	10	6.6	4.2	3.2	2.8	2	0.8	0.8	0.8
11	118.2	85	-200	35.6	24	14.6	10	6.8	4.6	4	2.6	1.8	1.4	1.4	1
12	121	87	57	36	25	15.4	10.6	7.4	4.4	3.2	2.6	2	1	1	1.2
13	124	90	59	37.2	25	16.4	11	8.4	6.2	4.4	2.8	2.2	2	0.8	1.6
14	124	90.8	59.6	37.8	24.4	15.6	11	8.4	5.8	3.4	2.2	1	0.8	0.6	1.2
15	125.8	90.6	59.2	-218	25.2	16.2	11.2	7.4	5.4	3.6	2.2	2	1.2	0.4	1
16	125.6	-165	60.8	38.6	25.2	15.4	10.6	7.4	4.8	3.6	2.8	1.2	1	0.8	1.2
17	127.8	92.6	62.4	39.2	27	17.4	11.8	8.2	6.2	5.2	3.6	2.4	0.4	0.6	1.4
18	127.6	92.8	61.4	38.8	25.4	16.6	11.2	7.2	4.4	3.4	2.4	2.2	0.2	0.4	0.6
19	126.6	92.2	61.2	38.2	25.2	14.4	10.2	7.8	3.4	1.2	1.2	1.2	0.4	0.6	1
20	128.4	93.2	62.6	39.6	27.6	16.8	-244	-247	-251	-253	-151	1.6	1.6	0.6	1.2
21	128	94.6	63.8	-165	27	17.6	12	8.6	6.8	4	3.6	2	1.6	0	1.2
22	127.8	93.8	63.6	40	25.8	16.4	11	8.2	5.6	4	2.8	2	1.2	1	1
23	127	93.2	61.8	40.4	26.2	16.2	11.8	8.4	4.6	2.2	2.2	2.2	1.4	0.4	0.6
24	126.2	93.8	63	40.4	26.6	16.4	10	7.8	4.8	2.8	3	2	1	0.8	1
25	126.2	92.4	63	39.8	26.2	17	11	8.6	4	4	2.2	1.2	1	1	1

ตารางที่ จ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง ฟุตส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบทองแดงขนาดใหญ่ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	125.8	92.6	61.8	39.6	25.2	17.2	9.8	7.2	4.2	2.8	2.6	1.8	1.2	-0.4	0.4
27	125.4	92.6	63	40	26.2	16.6	10.8	8.6	5	3.8	3.2	2.8	1.6	1.6	1.6
28	380.4	348	318	295.8	282	272.8	267.2	8	5	4.2	1.6	1.4	0.2	0.2	0.2
29	122.4	91.8	61.6	38.8	-231	16.6	10.2	7.2	4.6	3	2.6	0.8	0.6	0	0.6
30	121	91.6	61.4	39.2	25.8	16.2	11.6	7.8	5	3.8	2.8	1.2	1	-1	0.2
31	120	89.4	60.8	39.6	25.2	15.8	11.6	7.2	3.8	3	2.2	1.2	1.4	-0.2	1.4
32	119.4	90.2	61	39.6	25.6	16.4	10.6	7.6	5.6	3.6	3	2.2	1.8	1.6	1.8
33	-137	89.6	60	38.2	25.4	17	10.4	8.4	5.4	3.4	2	0.6	0.4	0.4	0.4
34	116.4	89	60	39.2	26	17	11	7	5.4	4.8	3.8	2.2	0	0	0.2
35	106	78.6	58.4	37.2	24.4	15.8	12	7.8	6	3	2.8	1.2	1.2	0.2	1.2
36	111.4	84.8	56	36.2	23.2	14.8	9.2	5.6	2.4	3	-0.4	-1.6	-1.6	0	0.2
37	111.4	85.4	58.4	37.4	24.2	15	10.4	7.4	5.4	4.2	2.4	0.4	0.4	0.2	0.2
38	112	85.4	58.6	36.8	26.4	16	12.4	7.4	5.8	4.4	2.6	0.6	1	0.8	0.6
39	109.2	84.2	57.8	36.2	25	16.4	12	7.2	4.2	3.2	2.8	2.4	2	1.6	2
40	364.2	339.6	313	293	281	271.4	267	265	4	4	2.4	2	1.6	1.6	2
41	105.8	81.8	56.8	36	23.8	-241	-246	-248	4	2.8	1	0.2	0.2	0.2	0
42	103.8	80.4	55.6	36	-233	15.4	9.8	7	4.4	3.4	2.4	0.4	0.4	0.4	0.2
43	103	80.8	55.6	35	23.6	14.8	11	6	6	3.6	3.4	1.8	1	0.4	0.4
44	101.4	79.4	-201	35.8	22.8	15.2	10.6	7.8	4.8	4.2	2.8	2.8	0.8	0.8	0.8
45	99.2	78.4	54.4	36	25	14.8	10.4	8.2	5.4	4.4	2.6	2	1.6	1.4	1.8
46	99.2	-178	54	36	25	16.4	10.6	8	6.4	4	2.6	1.4	1	1.2	1.2
47	-159	78	54.2	35	24	16	11.2	8	5	4.4	2.4	2	2	1.6	2
48	94.8	75	51.8	34	22	13.8	10.2	8	4	3.4	2.8	2	1.8	1.4	1.8
49	91.4	72.8	50	33.4	20.4	13.8	8.4	7	3	1.4	0.4	0	-0.4	-0.4	0
50	89	71	49.4	32	20	13	7.8	5	4	2	0.8	0	-2	-1.6	-1.6



ผลการทดลองตรวจจับเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

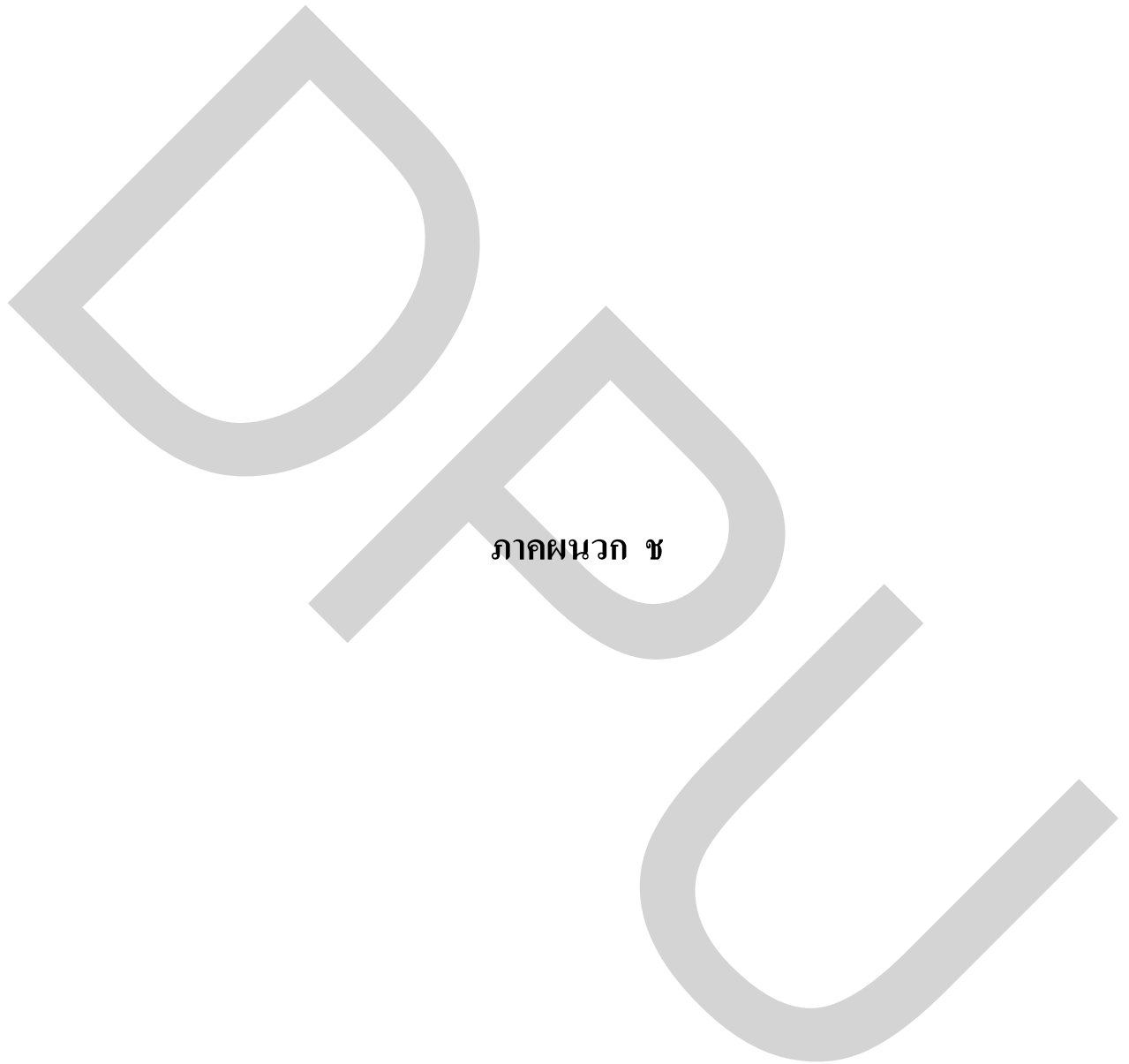
ผลการทดลองตรวจจับเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ จ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0

ตารางที่ จ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว

ความกว้าง พัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบเหล็กขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	1.6	0.6	1	0.6	0.4	0.4	1.2	-0.6	-0.6	1	-0.6	-0.2	-0.6	-0.6	-0.6
4	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	0	-0.4	1.6	-0.4	0	0.4	-0.4	0.4
5	2	2	2	2	2	2	2	1.2	0.2	2	0.4	0.2	0.4	-1	-0.6
6	0	0	0.4	0.4	0.4	0	0	0	0	1.2	0	-0.4	-1.6	-2	-1.6
7	-0.8	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.8	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	-0.8	-0.8	-2.4	-1.2
8	0.6	0.2	0	0.4	0.4	0.2	0	-0.6	-0.4	0.2	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	-0.8
9	0.6	-0.6	-0.2	1	0.6	1	-0.6	-0.2	-0.6	0.2	-0.6	-0.6	-0.8	-1	-0.6
10	0.8	0.8	0.2	1	1	1.2	0.4	0.2	0	0.8	0	-0.2	-0.2	-0.8	-0.4
11	0	0	-0.2	0.2	0.6	0.2	0	-0.2	0	0.8	0.2	0	-1	-1.6	-1.2
12	-0.4	-1	-1.2	-0.4	-0.6	0.4	0	0.4	-0.2	-0.4	0.2	-0.8	-1.2	-1.4	-1.6
13	0.2	0	-0.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.8	-0.4	0.6	0	0.2	-1	-0.8	0.2
14	-0.6	-1.6	-1.2	-0.6	0.2	0.2	0.4	-0.6	-0.2	0.4	0.2	0	-0.8	-1	-0.8
15	-1.4	-1.6	-2.6	-0.6	-0.2	-0.2	0	-0.8	-0.6	0.2	-0.8	-0.4	-1.6	-2.2	-1.8
16	-0.8	-0.8	-1.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.6	0.8	-0.4	0	0.2	-0.6
17	-0.6	-0.2	-0.6	0.4	0.8	0.8	-0.2	0	0.2	1.6	0	0.2	-0.4	0	0
18	-0.4	-0.4	-0.8	0	0	0.2	0.4	-0.4	0	0.6	-0.4	-0.2	-1.2	-1	-1
19	-1.6	-2	-2.2	-13.8	0	0	0	0	0	0	0.2	-0.2	-0.8	-1	-0.6
20	-2.4	-2.8	-2.4	-0.8	-0.8	-0.4	-0.2	1	-0.8	-0.6	0.8	-0.8	-0.8	-1.4	-0.8
21	-1.4	-2	-1.4	0	0.2	0	0.2	0	0	1.2	0.4	0	0	-0.4	0
22	-1.4	-2	-1.2	0	0	-0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	-0.6	-0.4
23	-0.4	-0.6	-0.6	1	1.2	1.2	0.4	0.2	0.8	1.4	1.4	0.8	0.6	0	0.2
24	-2.2	-2.6	-2.2	-0.6	0	0	0	0	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6
25	-2	-2	-2	-0.8	-0.4	0	0	0	-0.4	0.2	0	-0.6	0	-0.2	-0.6

ตารางที่ ๓ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 2x2 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง ปลั๊ก	ระยะทางที่ตรวจจับพบเหล็กขนาดเล็ก (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	-1.2	-2	-1.2	-0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	-0.6	0.2	0.4	0	-1	-0.8	-0.4
27	-2	-2.2	-2.2	-1.6	-0.2	-0.4	-0.2	0	0	-0.2	0	-0.2	-1.2	-1.2	-0.8
28	202	202.2	203	204	204	102	-51	152.8	0	0.4	-50.4	-51	51	152.8	152.8
29	-1	-1	-0.4	0.8	0.8	1	0.2	0.4	0	2	1.4	0	0	1.2	1
30	-1.4	-1	-0.4	0	0	1.2	0	0.2	-0.4	1.2	0.4	0.2	0.2	0	0.2
31	-1.2	-0.8	-0.6	0.2	0.2	1.4	1	0.2	-0.2	0.8	0.4	0	0	-0.2	-0.8
32	-2	-2	-2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0	1.2	0	0	0	-0.2	0
33	-2.6	-3.4	-2.6	-1.4	-0.4	-0.6	0	-0.2	-0.2	0.8	0.4	0.4	-0.2	-0.8	-0.2
34	-3.2	-3.2	-2.4	-1.2	-0.8	-1.2	-0.4	-0.6	-0.6	-0.2	-0.4	-0.2	-1.6	-1.2	-1.4
35	-2.6	-3	-2.6	-1	-0.8	-0.4	0.2	0	0.4	0.4	0.4	0.4	-0.8	-1.2	-1.2
36	-6	-5.4	-3.6	-3	0.8	-2	-0.2	-2	0	1.2	-2.2	-2	-2	-3.8	-2.4
37	-2.4	-2.8	-2.8	-0.4	-0.4	0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0	-0.4	-0.4	-0.4	0
38	-1.4	-2.2	-1.4	0.6	1.2	1.6	-0.4	0	-0.4	1.6	0.6	-0.4	1.2	0.8	0.8
39	-2	-2.4	-0.8	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	0.6	0.8	0.8	0.6	-0.2	-0.2	0.2
40	-3.4	-4.2	-3.4	-1.4	-1.4	-1.4	0.2	-0.4	0.2	0.4	0.2	0.6	-1.2	-1.4	-0.4
41	-3	-3	-1.8	-1	0	0	0	0	0	1.6	1.2	0	0	0	-0.2
42	-3.8	-4	-3.6	-1.4	-1.6	-1.6	-0.4	-0.2	-0.8	0	0.4	-0.6	0	0	-0.6
43	-3	-3	-1.8	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	1.2	0.6	0.2	-0.2	0	-0.2
44	-2.8	-3.2	-2.4	-0.6	-0.2	0.2	0.2	-0.4	0.2	1	0.2	0	-0.8	-0.8	-0.8
45	-4.4	-4.2	-3	-1.2	-0.4	0.4	-0.4	0	-0.4	0.8	-0.4	0	0.4	-0.4	0
46	-1.8	-2.2	-2.2	0.2	1	1.2	-0.4	-0.2	-0.6	1.2	1	0	1	1.2	0.8
47	-1.2	-2	-2.4	0.8	1.8	1.8	-0.2	0.4	-0.2	1.6	1.4	0	0.6	0.8	0.6
48	-4.4	-4	-2.4	-1.4	-1	-0.6	-0.2	-0.2	0.6	0.4	0.8	0	-0.8	-1.4	-1
49	-3.8	-4.4	-2.4	-2	-1.6	0	0	0	0	1	1.2	0	0	0	0
50	-5	-4.8	-3.4	-2.6	-1	-1.2	-0.6	-0.4	-0.4	0	0	0	0	-0.2	-0.4



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองตรวจจับเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm

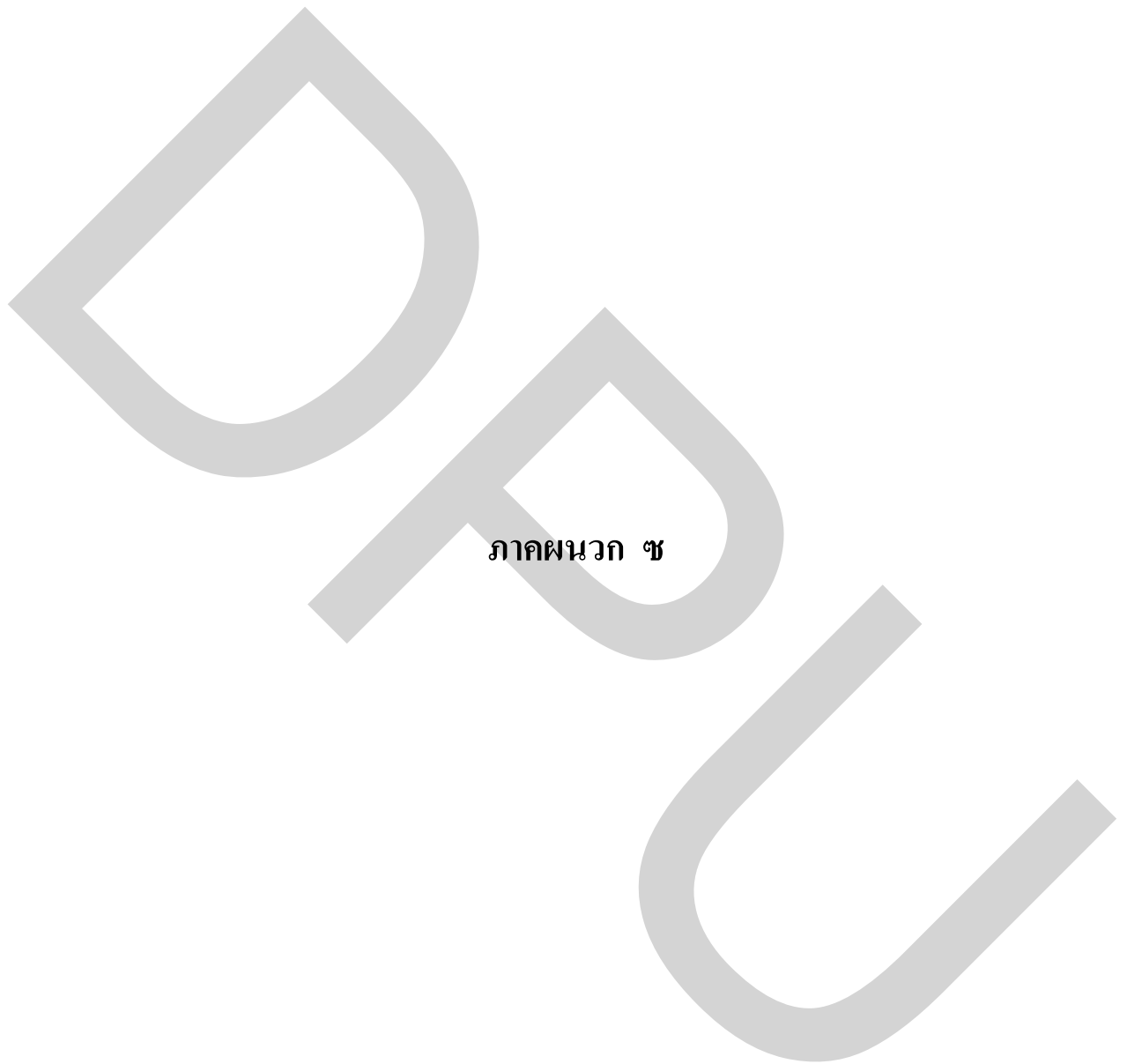
ผลการทดลองตรวจจับเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 cm มีแสดงไว้ในตารางที่ ๓ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการส่งสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ด้านบวกตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0

ตารางที่ ๓ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว

ความกว้างพัลส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบเหล็กขนาดใหญ่ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	22.8	16.6	11.6	7.6	5.8	3.6	3.8	3.6	3.4	3.6	3.267	1.6	1.6	0.8	1.6
4	20.8	15.4	11.6	8.4	5.6	3.6	2.2	2.6	2.6	2.6	2.433	1.4	1.4	1.6	1.6
5	19	-242	-93	7	4	2.2	1.2	2	1.8	2	1.833	0	1.4	-0.4	0.2
6	20	15	10.4	7	4	4	3.6	4	2.8	2.8	2.8	2	2	0.4	1.4
7	16.4	11.4	7.6	5	2.6	1.4	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
8	17.2	11	7.8	5	3	2	1.6	1.2	0	0	0	1.2	0.4	0	0.6
9	14.4	10.6	8	5.4	4.8	3	2.2	1	1	1	1.167	0.6	1.8	0	0.4
10	13	9.4	7	4.6	4.4	2	2	2	2	2	2	1.6	1.8	0.8	0.8
11	10.8	8.6	5.8	3.4	2.4	2.4	1.2	2.4	2.4	2.2	2.367	1.4	2	0.8	0.8
12	8.6	6.6	4.8	2	1.8	1.2	0	0.8	0.2	1.6	1.267	0.4	0.2	-0.4	0.4
13	8	5.6	3	2.2	2	1.2	1.4	1.6	1.4	2	1.667	1.6	1.2	0.8	1.4
14	5.6	3.6	2.8	2.2	2.2	1	1.4	0.8	2.2	1.4	1.067	0.8	1.6	0.2	0.8
15	2.6	1.4	2.4	1.2	1.2	0.2	0.2	0.6	0.4	0.4	0.9	0.2	0.8	0.2	0.2
16	1.4	1	0.4	1.4	0.4	0.8	1	0.6	0.6	1.2	1.367	1	0.6	0.4	1
17	0.4	0.2	0.6	0.6	2	1	0.4	1	1.4	-7.2	-0.2	1.2	1.4	0.4	0.8
18	-0.4	0	-1	0	0.4	0.4	0.8	2	2	1.8	2.133	1	2	0	0.8
19	-3.2	-2	-2	-1	-0.8	0.2	0.4	1.8	2	2	5.167	1.2	2	0	0.8
20	-5.6	-5	-3	-3	-2	-1.6	-0.8	-0.8	0	0.2	0.033	0.2	0	0	0
21	-7	-4.6	-3	-2.4	-2	-1.2	0	0	0.4	0.4	0.067	0.8	0.4	0	0
22	-8.8	-6	-4	-2.6	-0.2	0.2	0	1	1	1.2	1.7	1	1.6	0.6	1
23	-9.4	-8	-5	-2.6	-2	-1.2	-1.2	0	0.4	1.4	1.9	1.2	1.6	-0.2	0.8
24	-10.6	-7.6	-5.8	-3	-2.2	-1.2	0	1.6	1.4	1.2	1.7	-0.2	1.8	0	0.4
25	-12.6	-9.6	-5	-4	-2.2	-0.8	-0.8	0.2	1.2	1	1	1.4	1.4	0.2	1.4

ตารางที่ ๗ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 15 cm ของแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว (ต่อ)

ความกว้าง พืดส์	ระยะทางที่ตรวจจับพบเหล็กขนาดใหญ่ (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26	-13.4	-10.8	-6.6	-3.8	-3	-1	-0.8	0.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-0.4	1.2
27	-14.6	-12	-7.2	-5.2	-2.8	-0.4	-0.4	0.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	1.2
28	237.8	242.6	247.2	249.2	150.6	48.6	-2	-1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0	0.6
29	-18.6	-13.8	-9.8	-6.2	-4	-2.2	-1.2	-1	-1.2	1	1	1.2	1	0	1.4
30	-19.8	-14.6	-8.8	-6.2	-3.4	-1	0.2	0.6	0.6	0.8	0.633	1.4	0.8	-0.2	1.6
31	-21.2	-15.6	-9.4	-5.4	-3	-1.2	-0.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.4	1.6	-0.2	1.6
32	-22.4	-17.6	-11.6	-7	-4.6	-2.6	-1.6	0.2	0.6	2	2.333	1.8	2.4	0.2	1
33	-31	-20.2	-13.6	-8.8	-5.8	-4.8	-3.2	-2	-0.8	-0.6	-0.1	-0.4	0	0	-0.4
34	-25.4	-19.4	-14	-8.6	-5.6	-3.6	-1.8	-1.6	0	0.4	0.4	-0.2	0.6	0.2	0.2
35	-25.2	-19.4	-11.8	-7.8	-4	-2	-1.6	1	1	1	1.167	1.8	1.2	0	2
36	-30.4	-24.2	-16	-11.4	-8.4	-6.6	-4.4	-3.6	0.8	4.8	6.133	6.4	4.8	6.4	6.4
37	-29	-21.4	-14	-9.6	-6.2	-3.2	-2.4	0	0	0	0	1.6	0	0.4	2
38	-288	-23.2	-15.4	-10	-5.4	-4	-2	-1	-0.8	0.6	0.933	0.4	1	0	0.2
39	-31	-125	-271	-163	-5	-3	-0.6	0.8	1.6	2	2.167	2	2	0	2.2
40	223.2	231.6	240	245.6	-6	-3.6	-2.2	0	0	2	2	1.6	2.2	0.6	1.2
41	-35.6	-26.8	-18	-12	-8.6	-6	-2.6	-2	-1.6	-0.4	-0.07	0.2	0	0	0
42	-36	-27.4	-18.8	-11.4	-8	-4	-3	-2.6	-0.8	0	0	0.4	0.4	0	0.6
43	-35.4	-26.4	-16.4	-11	-6	-2	-1	-1	0.8	1	1	1.6	1	0	2
44	-37.4	-27.6	-18.4	-12	-7.4	-5.4	-2	-0.4	0	0.4	1.067	0	1.6	-0.4	0.6
45	-37.2	-29	-18.8	-12.4	-8	-3.8	-2	0.8	0.6	0.6	0.767	1	1.8	1	0.8
46	-40.6	-30.2	-19.8	-12.2	-8	-4.6	-3.6	-1	-0.6	0.2	0.7	0	1	0	0.8
47	-41.2	-31	-21	-12.8	-9	-5	-3	0	0	0.8	1.8	0.4	2	0	0.4
48	-41	-30.2	-19	-13	-8	-4.8	-1.4	0.2	1.4	2	2	2	2	0.2	1.8
49	-44	-33	-22	-15	-10.4	-6	-4	-2	-1.6	-2	-0.33	0.8	0	0	0.4
50	-44.6	-32.6	-23	-14	-9	-5	-3.4	-2.2	-0.8	0	0	0	0	0	0



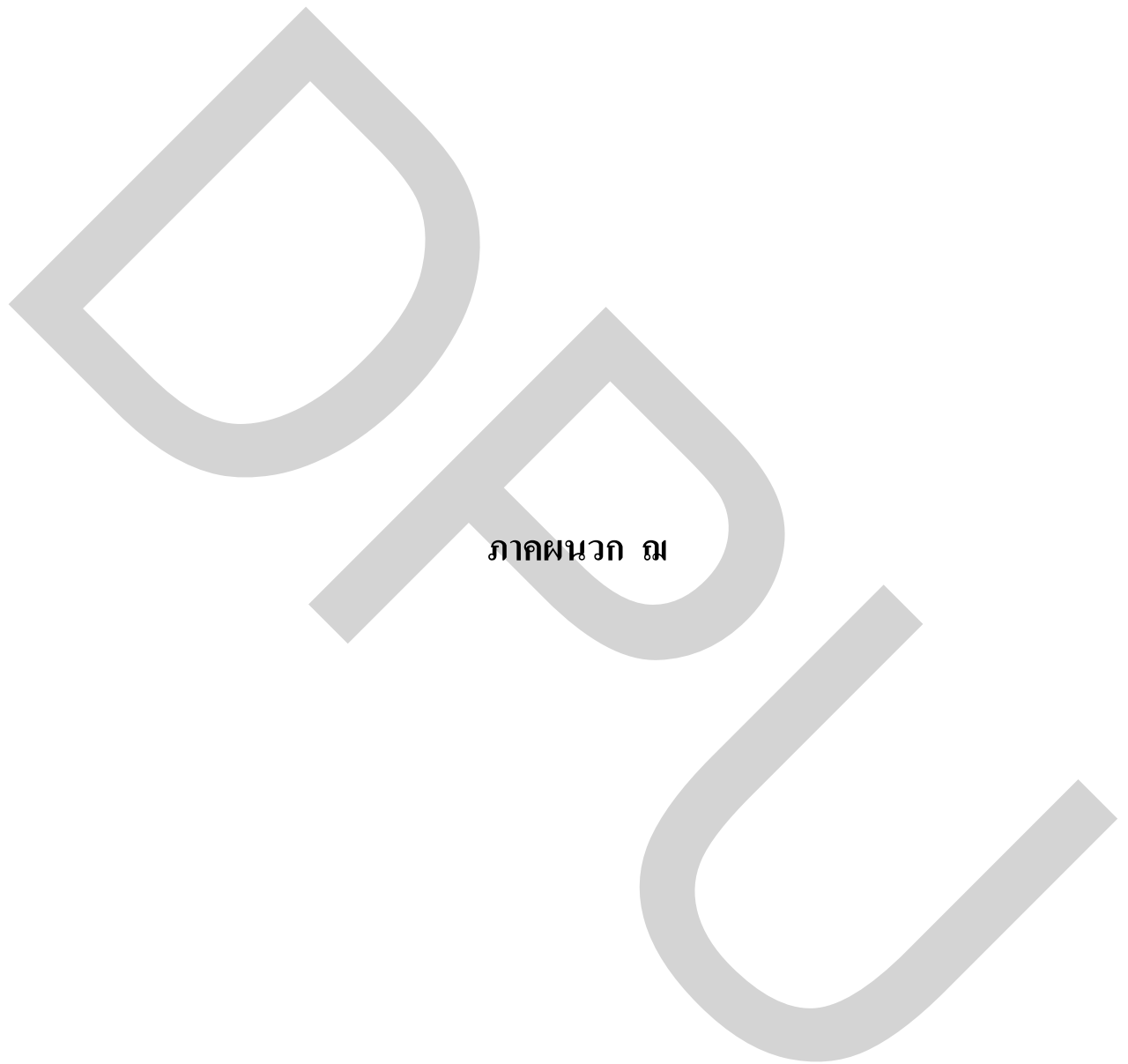
ภาคผนวก ข

ผลการทดลองตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นทราย

ผลการทดลองและเก็บค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นทราย โดยใช้อัลกอริทึมในการจำแนกชนิดของโลหะตามรูปที่ 3.3 ซึ่งกำหนดให้ใช้ค่าความกว้างพัลส์ด้านบนของสัญญาณ PWM จำนวน 15 พัลส์เท่ากับ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42 และ 45 หน่วยของไทมเมอร์ 0 และแสดงผลการจำแนกแผ่นอลูมิเนียมได้สำเร็จผ่านทางหลอด LED สีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ตารางที่ ๗ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว

ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$	ระยะทางที่ตรวจจับพบโลหะ (cm)						
ความกว้างพัลส์ (μs)	1	2	3	4	5	6	7
9.64	72	53	35	24	17	10	7
19.27	85	62	42	29	21	13	11
28.91	83	61	42	29	19	12	8
38.54	78	59	42	29	20	14	10
48.18	69	55	-217	28	19	13	10
57.82	57	48	35	25	19	13	9
67.45	-209	-216	29	21	15	12	8
77.09	33	32	25	20	14	10	7
86.72	19	24	20	16	11	8	6
96.36	9	17	17	15	11	9	7
106.00	-4	7	12	12	9	6	5
115.63	-19	-2	6	8	6	5	4
125.27	-33	-12	-1	3	4	2	1
134.90	-44	-19	-6	1	3	3	3
144.54	-58	-29	-11	-2	-1	0	0



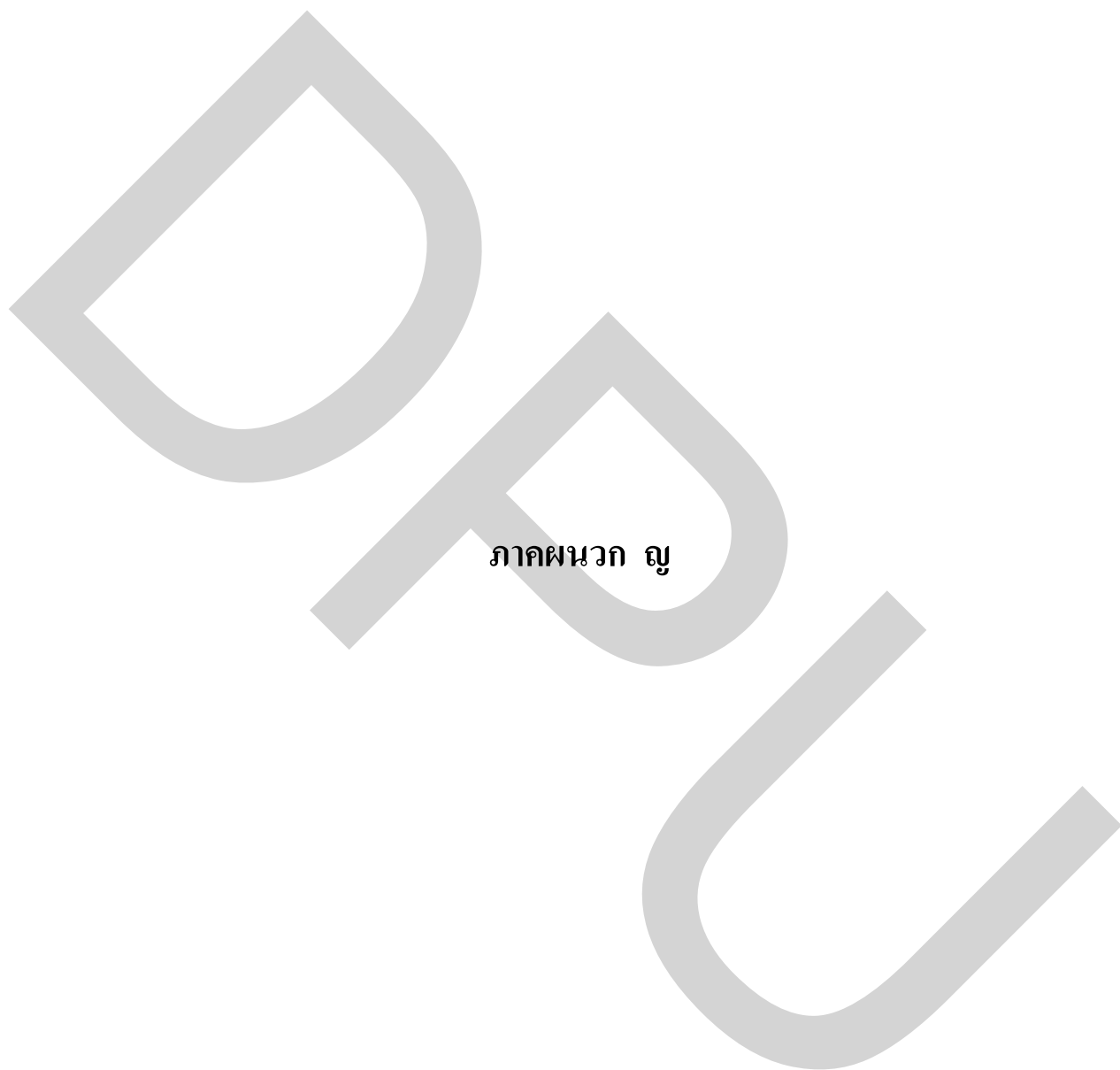
ภาคผนวก ฅ

ผลการทดลองตรวจจับแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นที่

ผลการทดลองและเก็บค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นที่ โดยใช้อัลกอริทึมในการจำแนกชนิดของโลหะตามรูปที่ 3.3 ซึ่งกำหนดให้ใช้ค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM จำนวน 15 พัลส์เท่ากับ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42 และ 45 หน่วยของไมโคร 0 และแสดงผลการจำแนกแผ่นอลูมิเนียมได้สำเร็จผ่านทางหลอด LED สีฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.16

ตารางที่ ๓ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว

ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$	ระยะทางที่ตรวจจับพบโลหะ (cm)						
ความกว้างพัลส์ (μs)	1	2	3	4	5	6	7
9.64	74	52	36	23	15	8	7
19.27	97	69	46	27	17	12	9
28.91	113	81	53	34	23	15	11
38.54	121	86	57	36	25	15	10
48.18	126	90	59	-217	25	16	11
57.82	126	92	61	38	25	16	9
67.45	128	95	64	-216	27	18	12
77.09	125	91	63	40	24	15	9
86.72	125	91	63	40	27	16	10
96.36	120	92	62	39	25	17	12
106.00	-139	89	59	38	25	15	10
115.63	105	79	50	29	17	9	3
125.27	109	84	58	36	25	17	11
134.90	103	80	56	35	-234	15	8
144.54	99	78	54	36	25	14	12



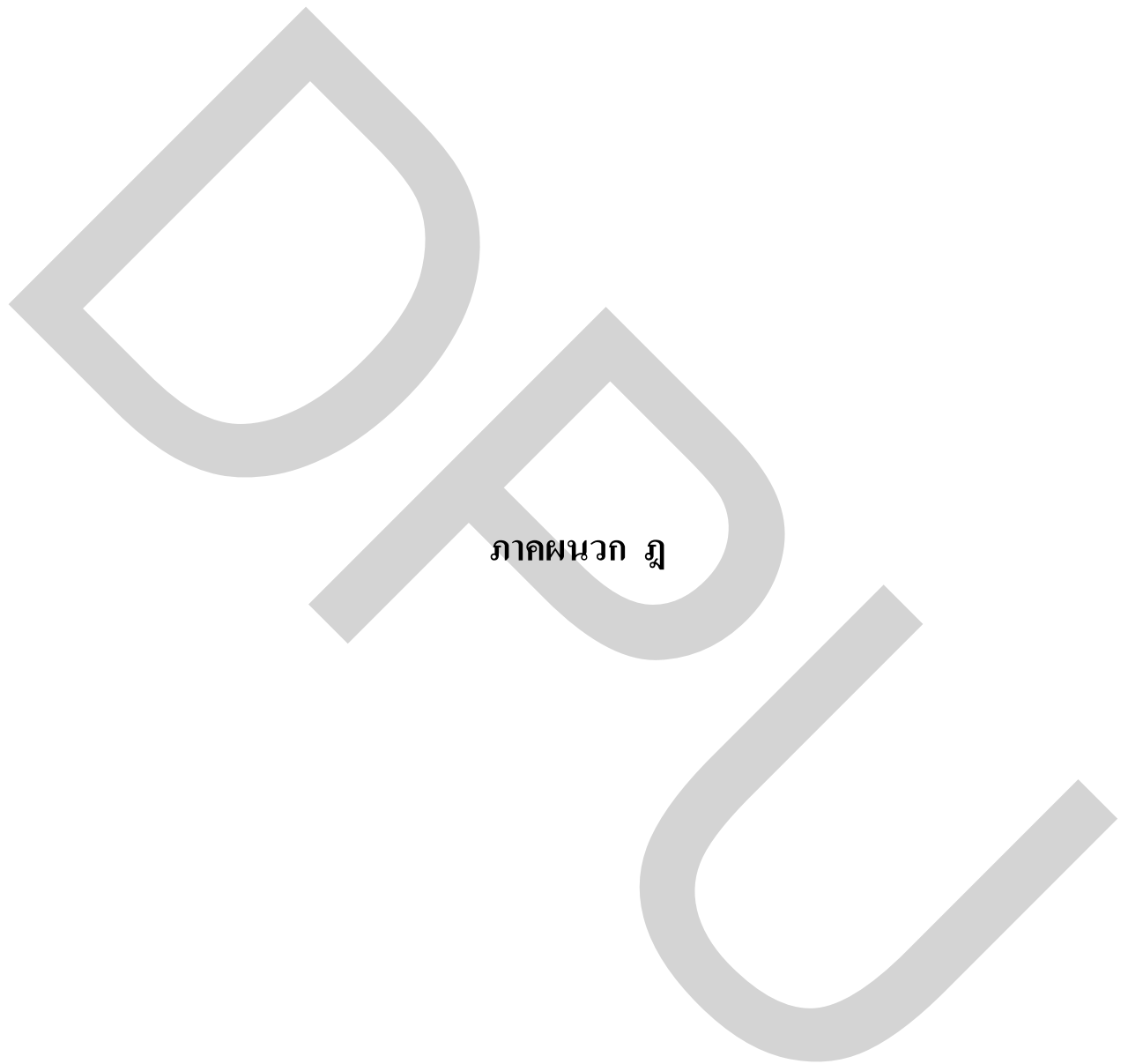
ภาคผนวก ๓

ผลการทดลองตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นที่ทราย

ผลการทดลองและเก็บค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่วางในพื้นที่ทราย โดยใช้อัลกอริทึมในการจำแนกชนิดของโลหะตามรูปที่ 3.3 ซึ่งกำหนดให้ใช้ค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM จำนวน 15 พัลส์เท่ากับ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42 และ 45 หน่วยของไทมเมอร์ 0 และแสดงผลการจำแนกแผ่นอลูมิเนียมได้สำเร็จผ่านทางหลอด LED สีเขียว ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ตารางที่ ๓ ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ในระยะ 1 – 7 cm ของแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว

ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$	ระยะทางที่ตรวจจับพบโลหะ (cm)						
ความกว้างพัลส์ (μs)	1	2	3	4	5	6	7
9.64	22	15	10	6	5	2	2
19.27	20	15	10	7	4	4	4
28.91	14	10	8	5	5	3	3
38.54	8	7	4	2	1	2	-1
48.18	2	2	2	1	1	0	0
57.82	-1	0	-1	0	0	2	2
67.45	-8	-5	-3	-3	-2	-1	0
77.09	-11	-7	-5	-2	-2	0	0
86.72	-14	-12	-8	-4	-1	0	2
96.36	-21	-15	-9	-6	-5	-1	-2
106.00	-26	-19	-12	-8	-5	-4	-3
115.63	-29	-23	-16	-9	-7	-5	-3
125.27	-31	-24	-27	-8	-5	-3	0
134.90	-36	-27	-19	-12	-8	-4	-3
144.54	-40	-31	-21	-15	-10	-5	-4



โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ PWM และใช้
 จำแนกชนิดของโลหะ

```
#define F_CPU 2000000UL // 20 MHz
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdio.h>
#include <compat/deprecated.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/eeprom.h>
#define BAUD 50000UL // 57600 BPS
#define MYUBRR F_CPU/8/BAUD-1
unsigned char rec;
unsigned long int x;
volatile unsigned int TCNT_value[15];
volatile unsigned int count, threshold_value[15];
volatile unsigned int i,j,l;
void delay_ms(unsigned int time) /* Delay Module */
{
    while(time-->0) { _delay_ms(1.0); }
}
void init_serial(unsigned int ubrr) /* Initial UART */
{
    UBRR0H = (unsigned char)(ubrr>>8); /* Set baud rate */
    UBRR0L = (unsigned char)ubrr;
    UCSR0A = (1<<U2X0); /* double speed */
    UCSR0B = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0)|(1<<RXCIE0); /* Enable Rx and Tx */
    UCSR0C = (3<<UCSZ00); /* Set frame format: 8data, 1stop bit */
}
```

```

/***** MAIN *****/
int main(void)
{
    EICRA = 0x0A;    // Falling Edge Triggered for Ext' INT. 0
    EIMSK = 0x01;   // Enable INT0
    TCCR0A = 0x83;  // timer0 fast PWM mode
    TIMSK0 = 0x02;  // Enable Timer0 compare match
    DDRC = 0x0F;    // PC0 PC1 PC2 PC3 as output
    DDRD = 0x40;    // PD6 OC0A as output
    init_serial(MYUBRR); // Initial serial port
    SREG |= 0x80;   // Enable Interrupt
    while(1)
    {
        for (h = 0 ; h < 15 ; h++)
            pulse[h]=((h+1)*5);
        TCNT0=0;    // Initial timer0 value
        OCR0A = pulse[h]; // set switch time on maximum value =255
        TCCR0A = 0x83; // timer0 fast PWM mode
        TCCR0B = 0x03; // start timer0 prescale 64
    }
    if((TCNT_value[0]>5)&&(TCNT_value[1]>9)&&(TCNT_value[2]>6)&&(TCNT_value[3]
>8)&&(TCNT_value[4]>8)&&(TCNT_value[5]>7)&&(TCNT_value[7]>5)&&
(TCNT_value[8]>4)&&(TCNT_value[9]>8)&&(TCNT_value[10]>5)&&(TCNT_value [11]
>8)&&(TCNT_value[14]<-2))
    {
        fprintf(&mystdout,"A1");          PORTC=0x06;
    }
    else

```

```

if((TCNT_value[0]>5)&&(TCNT_value[1]>7)&&(TCNT_value[2]>9)&&(TCNT_value[3]>
8)&&(TCNT_value[5]>7)&&(TCNT_value[7]>7)&&(TCNT_value [8]>8)&&(TCNT_value
[9]>10)&&
(TCNT_value[10]>8)&&(TCNT_value[11]>2)&&(TCNT_value
[12]>9)&&(TCNT_value[14]>10))
    {
        fprintf(&mystdout,"Cu");          PORTC=0x05;          }
    else
if((TCNT_value[0]>0)&&(TCNT_value[1]>2)&&(TCNT_value[2]>1)          )&&
(TCNT_value[3]>-2)&&
(TCNT_value[6]<1)&&(TCNT_value[7]<0)&&(TCNT_value[8]<4)&&(TCNT_value[9]<0)
&&
(TCNT_value[10]<-1)&&(TCNT_value[11]<-2)&&(TCNT_value[12]<2)&&
(TCNT_value[13]<-1)&&(TCNT_value[14]<-2))
    {
        fprintf(&mystdout,"Fe");          PORTC=0x03;          }
        delay_ms(25);
    }          //end while(1);
return 0;
}          //end int main (void)
/*****          END MAIN          *****/
/*****/
ISR(TIMER0_COMPA_vect) //need T1 count
{
    TCCR1B=0x01;          //start timer1 counter
    return;
}
ISR(INT0_vect)          // External Interrupt 0 Function

```

```
{  
    TCCR1B=0x00;                //stop timer1 counter  
    threshold_value[count]=TCNT1;  
    count++;  
    OCR0A=pulse[count];  
    TCNT_value[count]=TCNT1-threshold_value[count];  
    count++;  
    fprintf(&mystdout,"SNOOPY OK");    }  
    OCR0A=pulse[count];  
    return;  
}
```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

พันตรี สุทัศน์ แยกกระจ่าง

ประวัติการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ประจำแผนกการสื่อสารระหว่างประเทศ กองนโยบายและแผน

สำนักแผนและอำนวยการสื่อสาร กรมการสื่อสารทหาร

กองบัญชาการกองทัพไทย