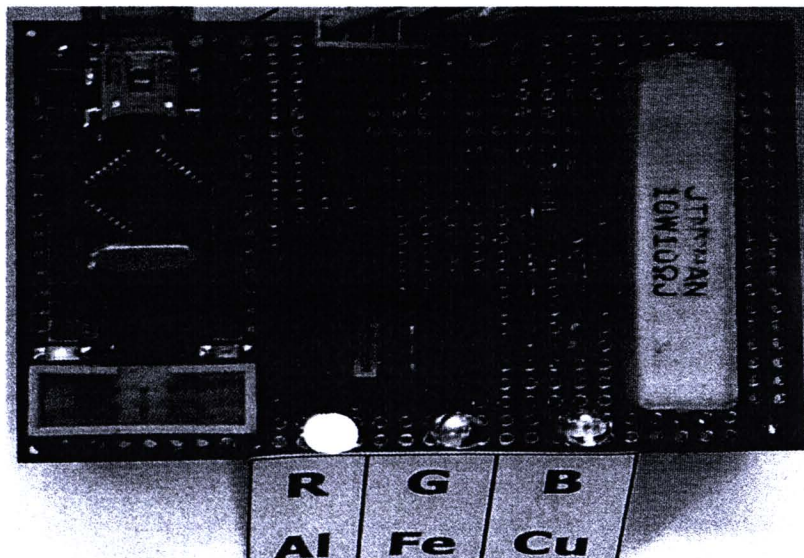


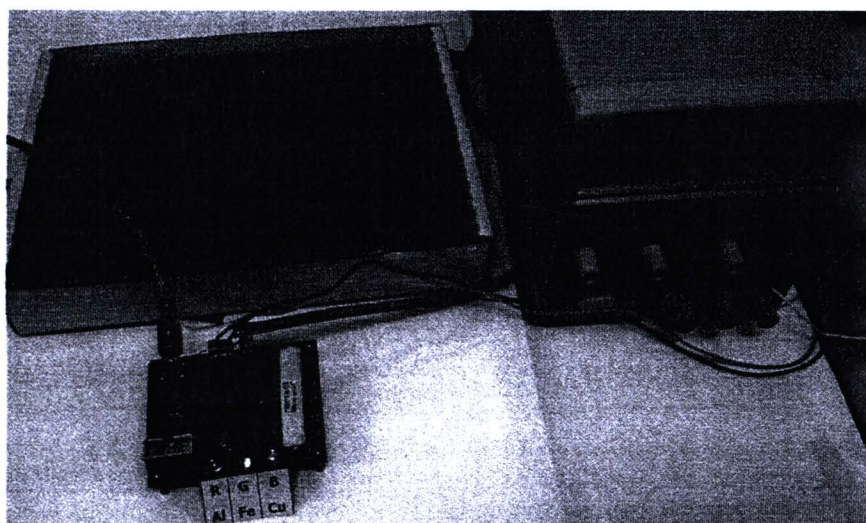
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

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



รูปที่ 4.1 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP



รูปที่ 4.2 เครื่องมือวัดและการเชื่อมต่อในการทดสอบ



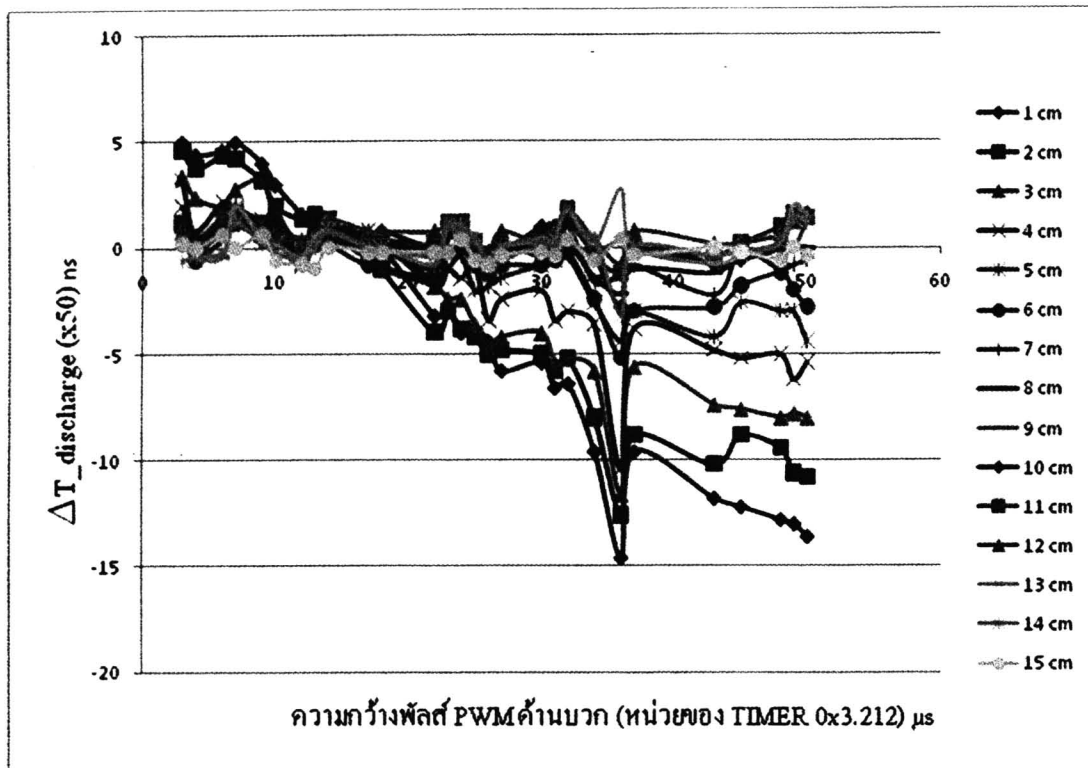
โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะนำโลหะมาทดสอบจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และขนาด 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดสอบหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยการทดสอบในอากาศ ระบายของแผ่นโลหะและระบายของขดลวดจะวางในแนวตั้งฉากกับระนาบของพื้นโลก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

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

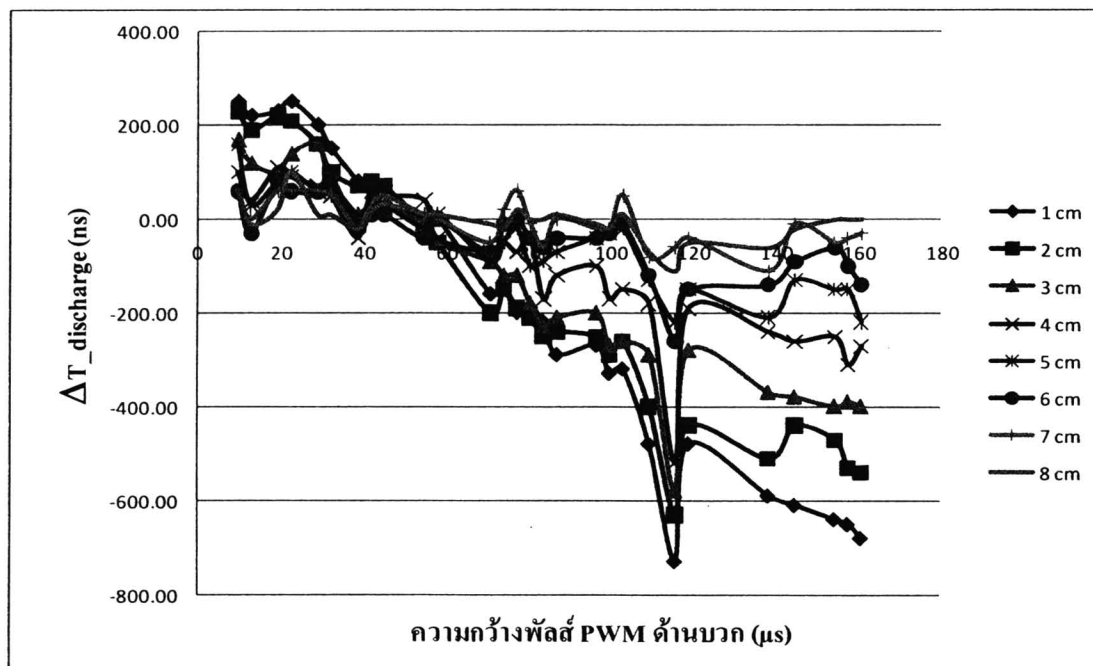
โดยรูปกราฟผลตอบสนองระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ได้จากการทดสอบแผ่นโลหะแต่ละชนิดและแต่ละขนาดมีดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นอลูมิเนียมที่วางในอากาศ

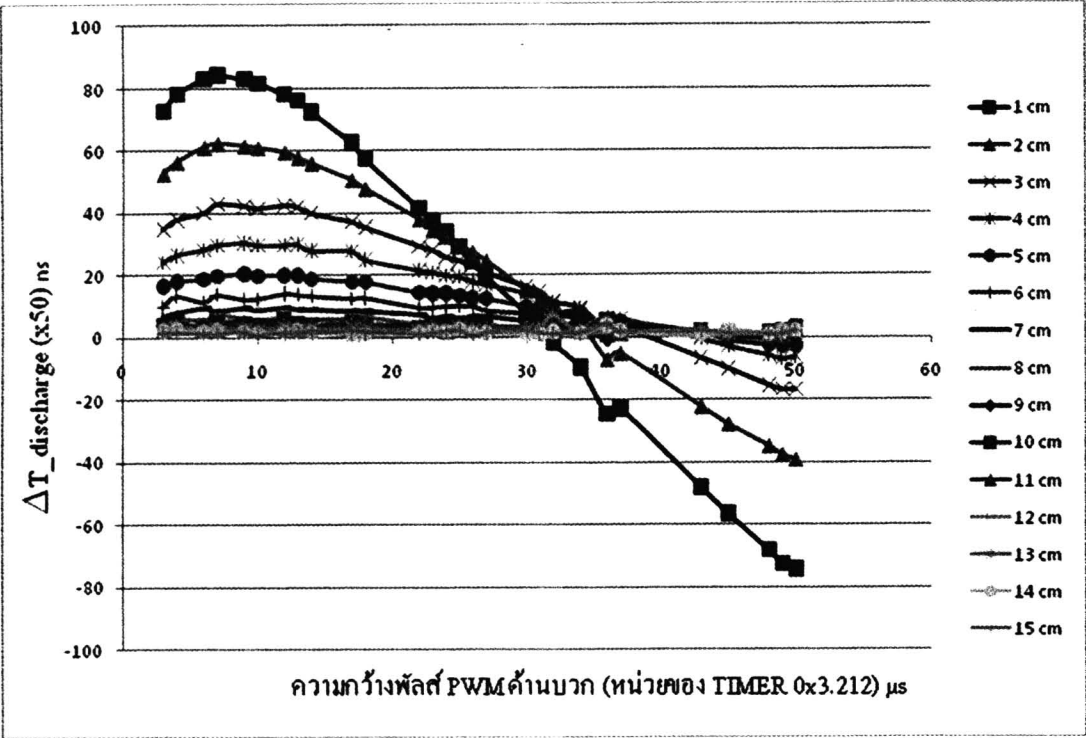
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 - 15 ซม. (ระยะห่างมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ซม.) แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 8 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  (แกน y) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและมีความชันเป็นลบ เมื่อความกว้างพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าโดยประมาณน้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทม์เมอร์ 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)



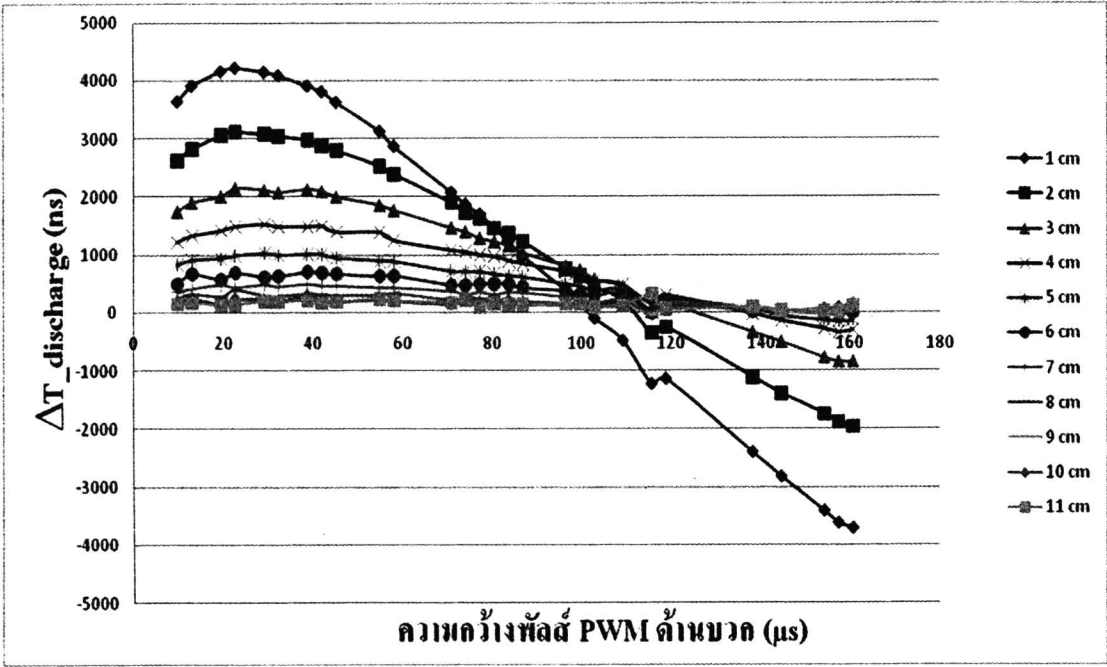
รูปที่ 4.3 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



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.



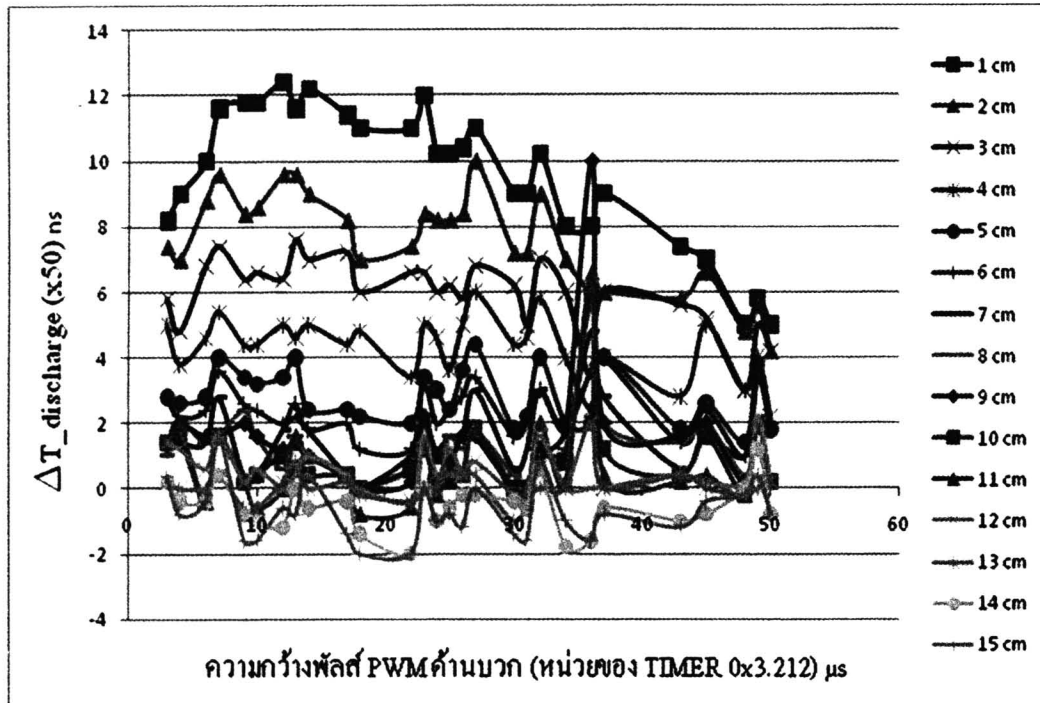
รูปที่ 4.6 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ของแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.

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  $\mu\text{s}$  (15 หน่วยของไทมเมอร์ 0) โดยจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าเท่ากับ 25.7  $\mu\text{s}$  (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  $\mu\text{s}$  (40 หน่วยของไทมเมอร์ 0) จะได้ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่มีค่ามากกว่าศูนย์เพียงเล็กน้อยและใกล้เคียงกัน และเมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-11 ซม. และความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 128.5  $\mu\text{s}$  จะได้ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  มีค่าเกือบจะเป็นศูนย์

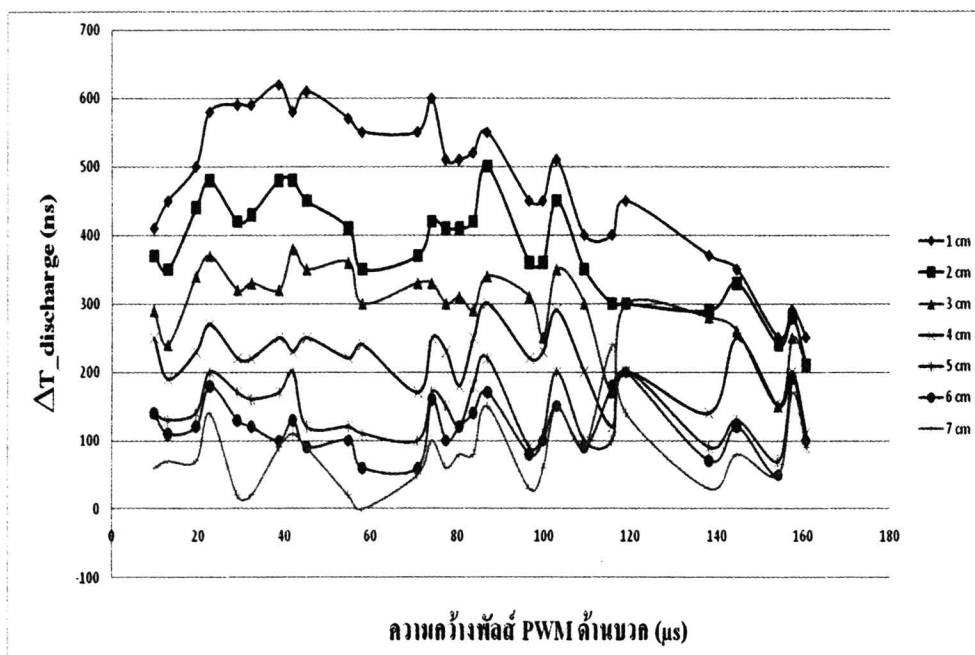
#### 4.2 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงที่วางในอากาศ

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  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่น้อยที่สุดเกือบทุกค่ากล่าวคือ เมื่อระยะตรวจจับได้มีค่ามากขึ้น ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่ได้รับจะมีค่าที่ลดลง

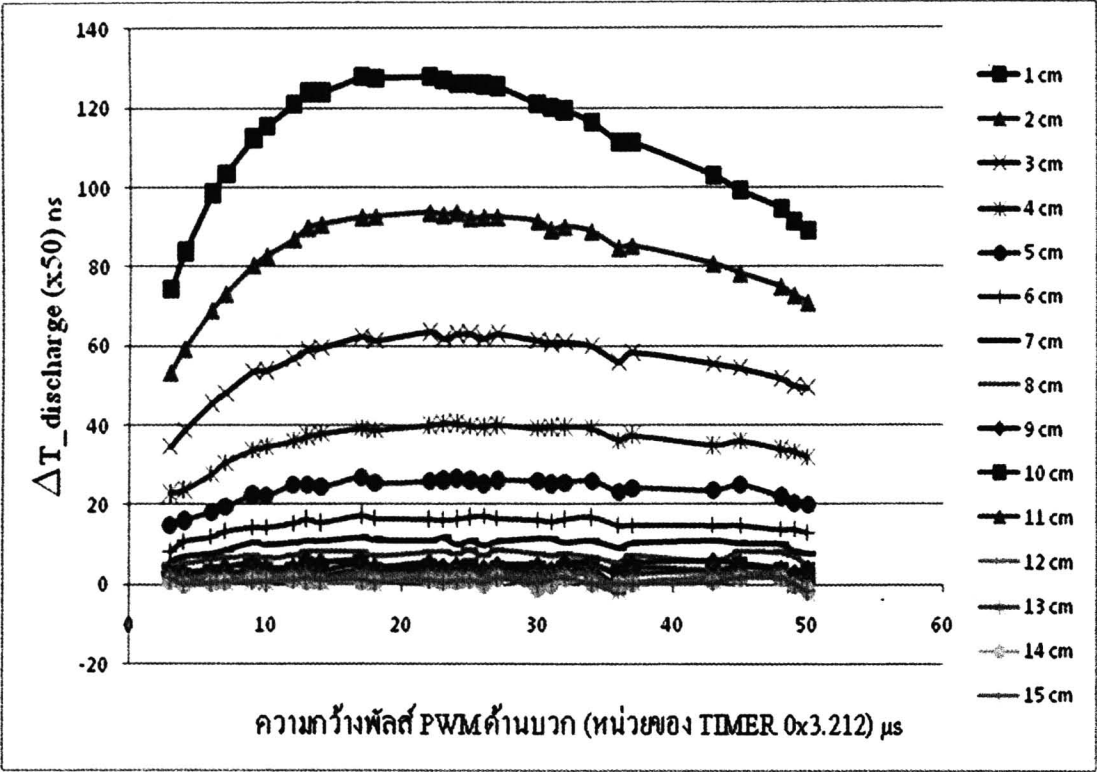
อ้างอิงรูปที่ 4.9 แสดงกราฟค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ของแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วทุกค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างขดลวดกับแผ่นโลหะ 1 – 15 ซม. เช่นกัน แต่จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้รับจริงๆ พบว่า ระยะที่ตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วได้จริง มีค่าไม่เกิน 11 ซม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  มีค่าเป็นบวกทุกๆ ค่า โดยมีลักษณะเป็นรูปตัวยูคว่ำและมีจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์เท่ากับ 64.25  $\mu\text{s}$  (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



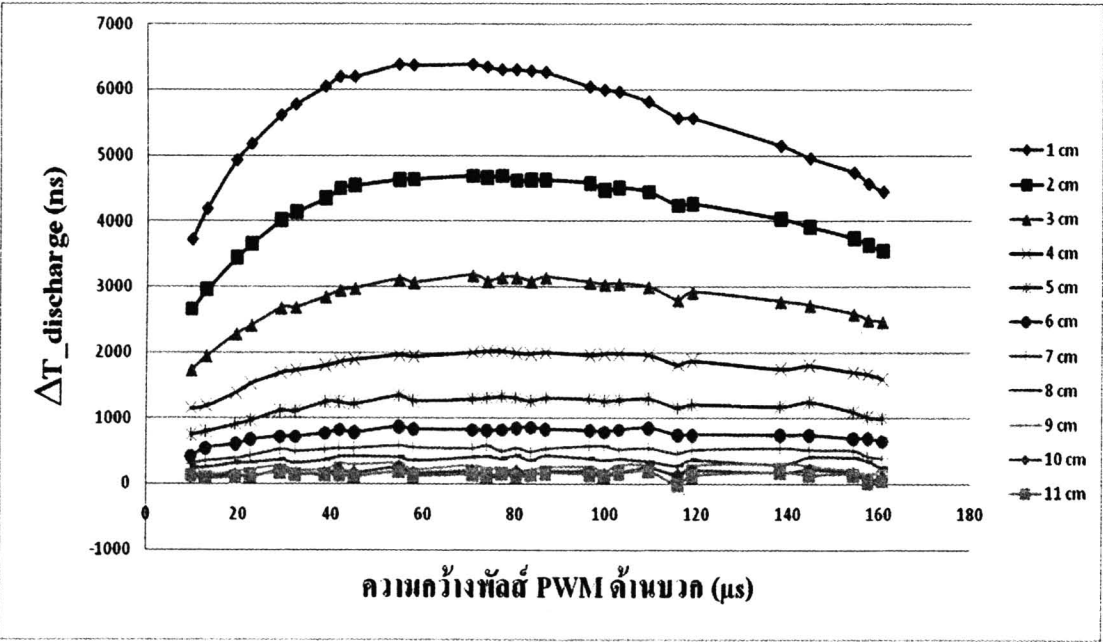
รูปที่ 4.7 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



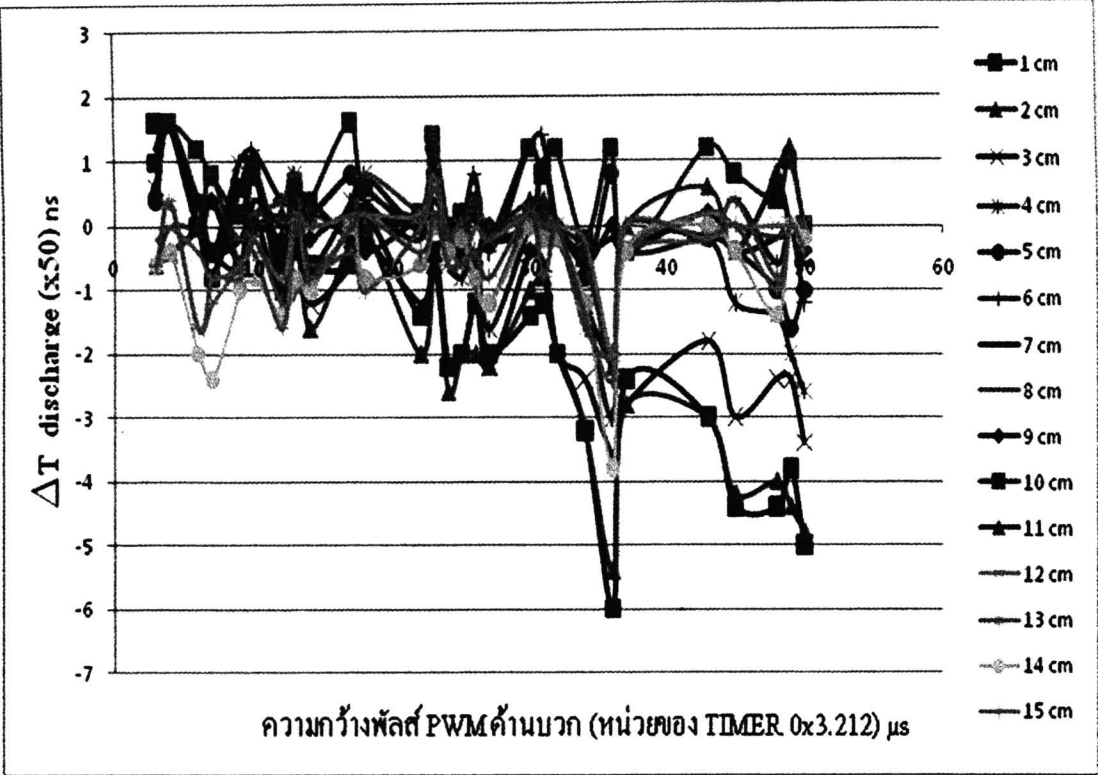
รูปที่ 4.8 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ของแผ่นทองแดงขนาด 2x2 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 7 ซม.



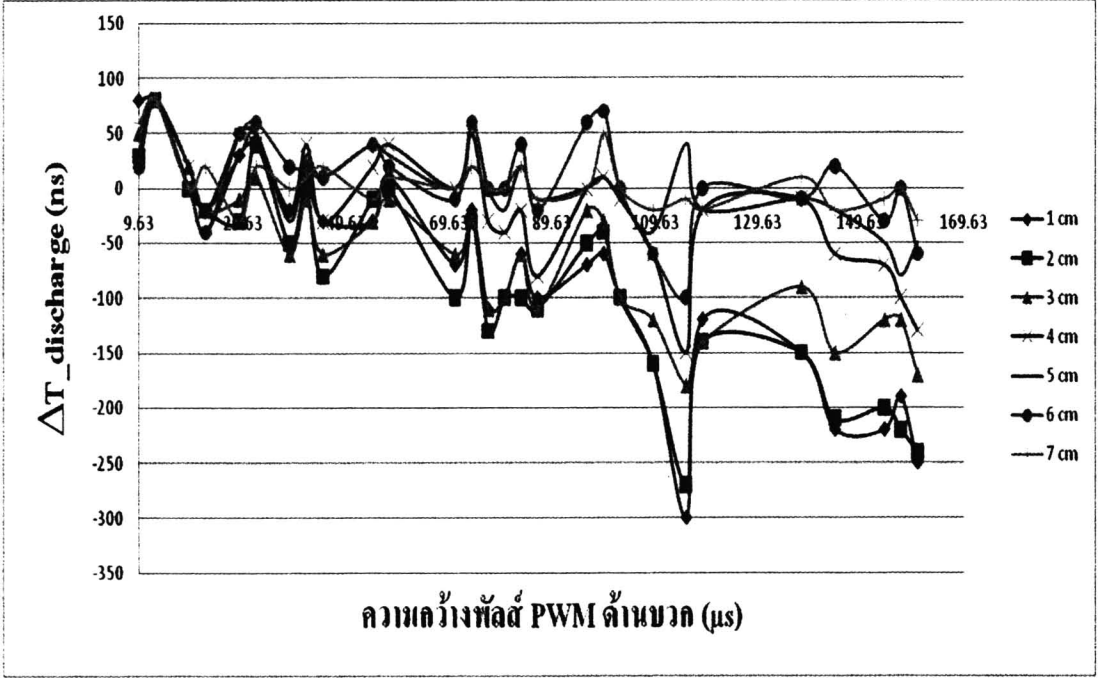
รูปที่ 4.9 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ที่ได้จากการตรวจจับแผ่นทองแดง 4x4 ตารางนิ้วระยะ 1 – 15 ซม.



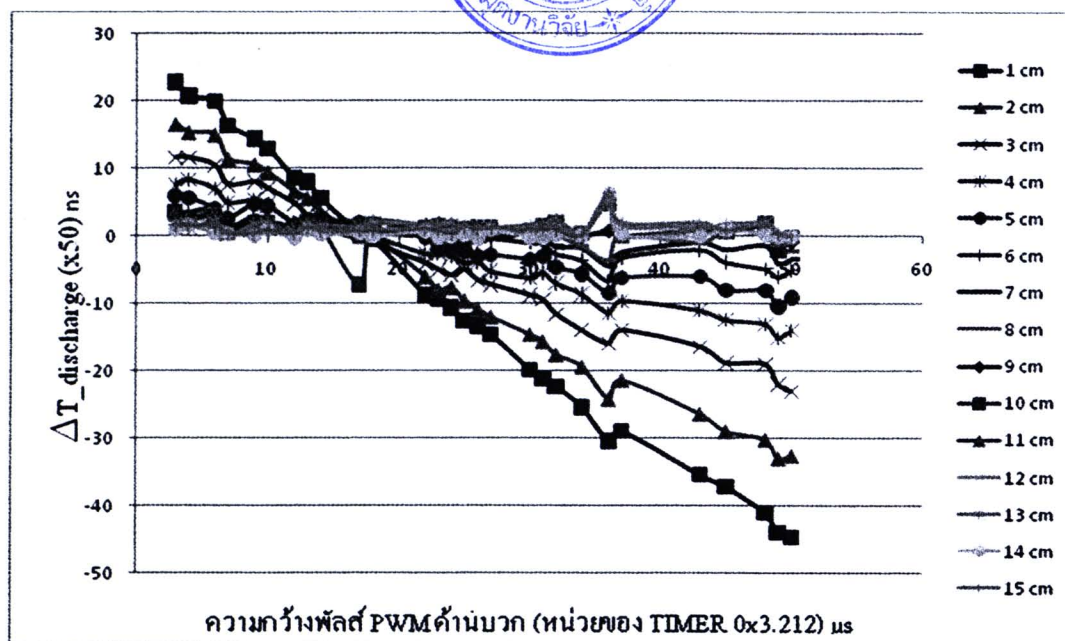
รูปที่ 4.10 ค่า  $\Delta T_{\text{discharge}}$  ของแผ่นทองแดงขนาด 4x4 ตารางนิ้วที่ตรวจจับได้จริง ไม่เกิน 11 ซม.



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



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



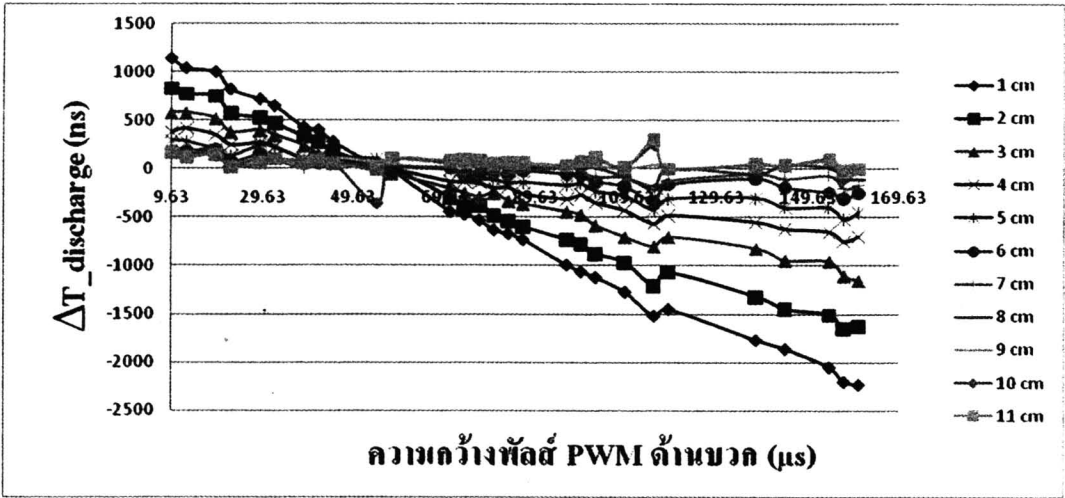
รูปที่ 4.13 กราฟคุณลักษณะจากการตรวจจับแผ่นเหล็กขนาดเล็ก 4x4 ตารางนิ้ว ระยะ 1 – 15 ซม.

#### 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  $\Delta T_{\text{discharge}}$  มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลาที่มีทั้งค่าบวกและลบ 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 ระยะตรวจจับได้ระหว่าง 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 ผลการทดสอบการจำแนกโลหะที่วางในพื้นที่ทรายเป็น

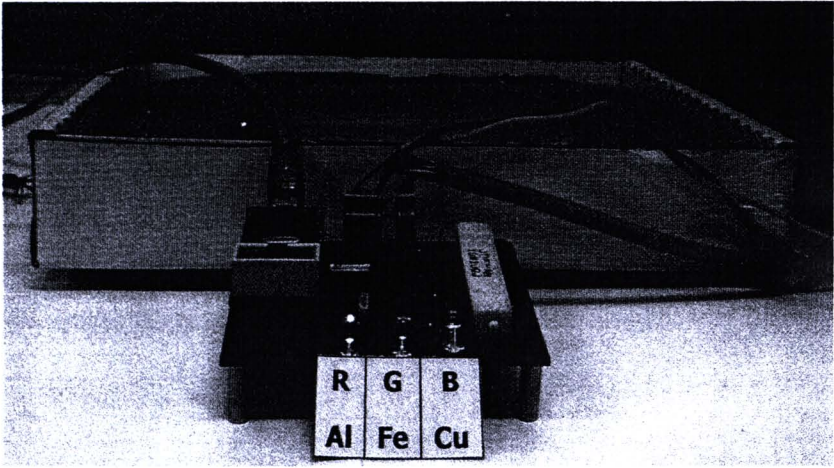
จากการทดสอบการจำแนกโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ที่วางในพื้นที่ทรายเป็น พบว่า ระยะที่ตรวจจับโลหะได้ผ่านพื้นที่ทรายเป็นของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5 ซม. ซึ่งมีค่าที่สั้นกว่าระยะที่ตรวจจับได้ในอากาศ โดยการจำแนกโลหะแต่ละชนิดผ่าน LED 3 สีมีแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 - 4.17 เหตุผลที่ระยะทางในการตรวจจับพบแผ่นโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ที่วางในพื้นที่ทรามีค่าที่สั้นกว่าระยะที่ตรวจจับได้ในอากาศ คือ

- 4.4.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพัลส์กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นทราย ไม่ใช่ในอากาศ จึงทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ช้าลง
- 4.4.2 สนามแม่เหล็กถูกดูดกลืนพลังงานด้วยอนุภาคขนาดเล็กและความชื้นที่อยู่ในทรายเป็น รวมถึงทรายเป็นมีค่าสภาพความชื้นซาบ ( $\mu$ ) ที่สูงกว่าอากาศ จึงทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปได้ใน ระยะทางที่สั้นลง
- 4.4.3 ขดลวดที่ใช้ตรวจจับโลหะสามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ใน ระยะทางที่สั้นลง

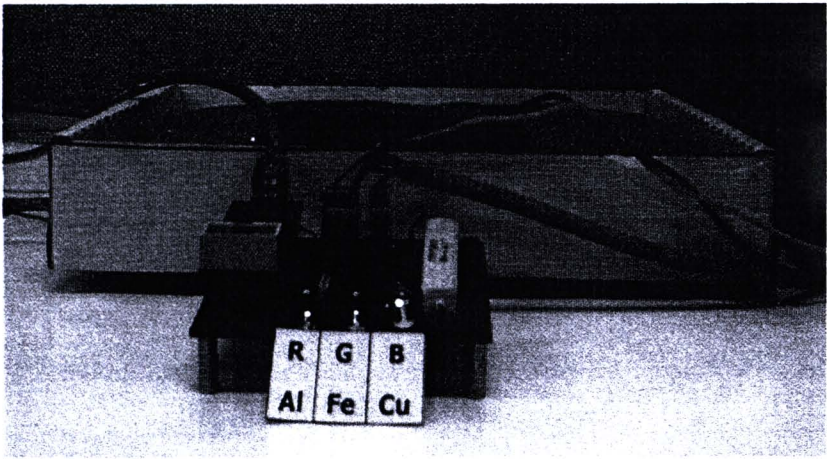
ในที่นี้ สีของหลอด LED ที่เลือกใช้งานในการแสดงผลการตรวจจับพบแผ่นโลหะขนาด 4x4 ตารางนิ้ว แต่ละชนิดจะมีจำนวน 3 สี แยกตามโลหะแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของแผ่นโลหะและสีของหลอด LED ที่ใช้แสดงผลการตรวจจับพบโลหะ

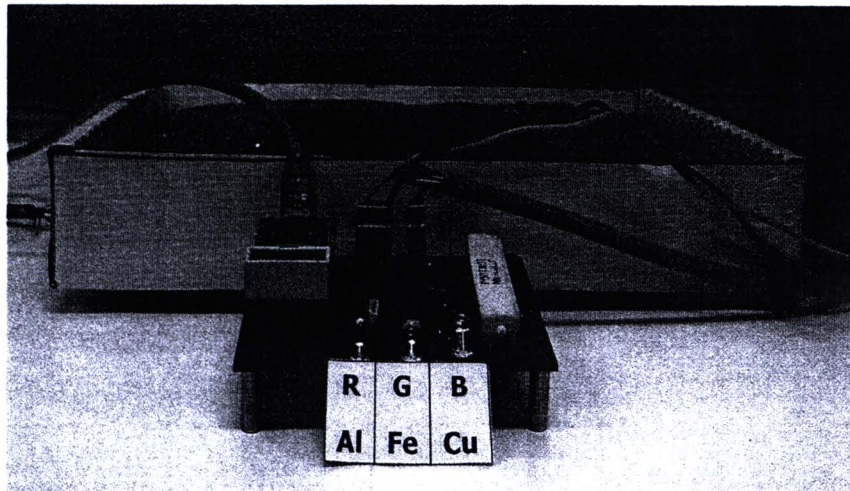
| ชนิดของแผ่นโลหะ (ขนาด 4x4 ตารางนิ้ว) | สีของหลอด LED |
|--------------------------------------|---------------|
| แผ่นอลูมิเนียม                       | สีแดง         |
| แผ่นเหล็ก                            | สีเขียว       |
| แผ่นทองแดง                           | สีฟ้า         |



รูปที่ 4.15 ผลการตรวจจับพบแผ่นอลูมิเนียมที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีแดงสว่าง



รูปที่ 4.16 ผลการตรวจจับพบแผ่นทองแดงที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีฟ้าสว่าง



รูปที่ 4.17 ผลการตรวจจับพบแผ่นเหล็กที่วางผ่านพื้นทราย โดยหลอด LED สีเขียวสว่าง