บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบทีละขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM และขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทเมอร์ 0 และไทเมอร์ 1 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอและอัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์จะอธิบายในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ส่วนหัวข้อสุดท้ายจะนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี รายละเอียดของแต่ละหัวข้อย่อยมีดังนี้

3.1 การคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM

อ้างถึงทฤษฎีในบทที่ 2 ที่มีการนำเสนอหลักการทำงานที่สำคัญงานวิจัยนี้ คือ การนำไทเมอร์ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 มาใช้งานเพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่ซึ่งสัญญาณ PWM ดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรเปิด/ปิดพัลส์และขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งยังถูกกำหนดให้มีค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่มีค่าต่างๆ กัน เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่ค่าความกว้างของพัลส์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นอย่างไร

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

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

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

ในที่นี้ จะแบ่งสเกลออกเป็น 255 ส่วน (เนื่องจากใช้ไทเมอร์ 0 ที่มีขนาด 8 บิต) ดังนั้น จะหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ไทเมอร์ 0 นับได้ โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM พื้นฐานที่มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยไทเมอร์ 1 นั้น หาค่าได้ดังนี้

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

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

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

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

ส่วนไทเมอร์ 1 ที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์หรือทำการนับจำนวนคล็อคของพัลส์ที่รับได้นั้น จะนำจำนวนคล็อคที่รับได้คูณด้วย 50 ns (ไม่มี Prescaler) ดังแสดงในสมการดังนี้

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

3.2 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทเมอร์ 0 และไทเมอร์ 1

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

(1) เซต TCCR0A ให้มีค่าเท่ากับ 0x83 เพื่อให้ทำงานในโหมด Fast PWM โดยไทเมอร์ 0 จะนับขึ้นจาก 0 ถึง 255 โดยทำให้พัลส์ On ตอนสตาร์ท แล้วเป็น Off เมื่อไทเมอร์ 0 เปรียบ เทียบตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ OCR0A ซึ่งทำให้สามารถปรับ ความกว้าง พัลส์ ได้อิสระเพื่อเก็บค่ามาวิเคราะห์ผล

(2) การปรับความกว้างพัลส์ช่วง On ด้วยการกำหนดค่าไปที่ รีจิสเตอร์ OCR0A

(3) เปิดการทำงานหน่วยเปรียบเทียบค่าไทเมอร์ 0 กับค่าความกว้างพัลส์ช่วง On ด้วยการเซต TIMSK0 ให้มีค่าเท่ากับ 0x02 เมื่อไทเมอร์ 0 นับค่าขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดใน OCR0A จะเกิด

Interrupt ซึ่งในส่วนของโปรแกรม เมื่อเกิด Interrupt จะส่งต่อการทำงานให้ไทเมอร์ 1 เริ่มจับเวลาที่ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดจะลดลงจนเป็นศูนย์

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

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไทเมอร์ 1 มีหน้าที่จับเวลาโดยนับค่าขึ้นไปเรื่อยๆ ทันทีที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลง และไทเมอร์ 0 จะถูก Off จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า หากต่ออุปกรณ์ครบวงจรตามที่ออกแบบไทเมอร์ 1 จะไม่นับจนถึงค่า 65535 โดยเหตุการณ์ที่จะสั่งให้ไทเมอร์ 1 หยุดนับ จะเกิดขึ้นจาก External Interrupt ที่เข้ามาทางขา INT0

3.2.1 ส่วนขั้นตอนการทำงานของไทเมอร์ 1 มีดังนี้

(1) กำหนดให้ไทเมอร์ 1 นับขึ้นแบบไม่ใช้ค่าพรีสเกล เซต TCCR1B เท่ากับ0x00

(2) เมื่อไทเมอร์ 0 ทำการเปรียบเทียบค่าของ TCNT0 ตรงกับค่าใน OCR0A จะเกิดการ Interrupt โดยในฟังก์ชัน Interrupt จะสั่งให้ไทเมอร์ 1 เริ่มนับ ด้วยการเซต TCCR1B ให้มีค่าเท่ากับ 0x01 ซึ่งในขณะนั้นกระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงจากค่าสูงสุด

(3) ไทเมอร์ 1 จะทำการนับขึ้นในรูปแบบปกติและรอจนกว่าจะมี Interrupt เข้ามาทางขา INT0 ไทเมอร์ 1 ก็จะหยุดนับด้วยการเซต TCCR1B ให้มีค่าเท่ากับ 0x00

(4) การดึงค่าที่ได้จากการนับของไทเมอร์ 1 สามารถเข้าถึงได้โดยตรงผ่านรีจิสเตอร์ TCNT1 เมื่อมีการดึงค่าจาก TCNT1 เสร็จแล้วโปรแกรมจะเซตค่าความกว้างพัลส์ On ในไทเมอร์ 0 เพื่อเปลี่ยนค่าความกว้างพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบวัตถุโลหะ แล้วให้ไทเมอร์ 0 เริ่มทำงานวนรอบใหม่อีกครั้ง

3.3 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอ

ในการทดสอบจะนำโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่ขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และ 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดลองหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการเซตค่าค่าเริ่มต้นก่อนเสมอ โดยจะเริ่มต้นจากการทดสอบชิ้นงานในสภาวะที่ไม่มีโลหะที่จะตรวจจับ เนื่องจากแต่ละบริเวณที่ทำการทดลองได้รับผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกที่ไม่เท่ากัน เพื่อที่ว่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะ (ทดสอบกับอากาศ) จะทำหน้าที่เสมือนเป็นค่าขีดเริ่ม (Threshold) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_discharge_{air}$ ซึ่งเป็นการทำงานในตอนเริ่มต้นเช่นเดียวกับการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะจริงในปัจจุบันนี้ หลังจากที่ได้ทำ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัย

การหาค่า $T_discharge_{air}$ ได้แล้ว จะทำการตรวจจับและบันทึกค่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_discharge_{metal}$ ณ ระยะห่างระหว่างขดลวดกับโลหะค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1 - 15 ซม. (ระยะห่างเพิ่มขึ้นทีละ 1 ซม.) โดยที่ระยะห่างแต่ละค่า จะทำการหาค่าผลต่างของระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ($\Delta T_discharge$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (3.6)

$$\Delta T_discharge = T_discharge_{metal} - T_discharge_{air} \quad (3.6)$$

ในการเก็บค่าข้อมูลก่อนที่จะทำการแสดงชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะเพื่อสร้างเป็นเครื่องต้นแบบในการตรวจจับโลหะที่สมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนในการทำงานและมีวิธีการในการบอกชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะ ดังนี้

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

(2) ทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างเครื่องตรวจจับโลหะกับโลหะแต่ละชนิดที่ต้องการทดสอบ โดยมีค่าตั้งแต่ 1 - 15 ซม.

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

(4) โดยวิธีการที่นำเสนอเพื่อใช้บอกชนิด ของโลหะ คือ ในการทดสอบใช้งานจริง จะนำเครื่องตรวจจับโลหะที่สร้างขึ้นเสร็จแล้วนำไปทดสอบโดยจะทำการส่งค่าสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกออกไป 15 ค่าและวัดค่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้ทำการสอบเทียบไว้ก่อนหน้านี้โดยพิจารณาช่วงที่ $\Delta T_discharge$ เป็นลบ เป็นศูนย์ และ เป็นบวก ว่าคล้ายกับโลหะชนิดใดที่ทดสอบ

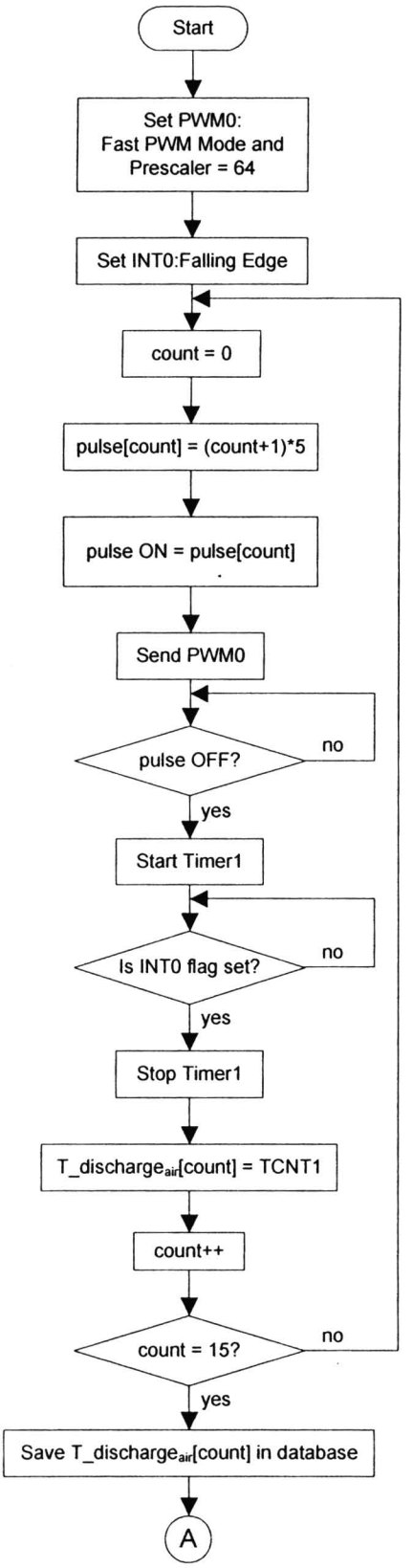
โดยในการทดสอบและในการใช้งานจริงนั้น จะกำหนดให้สัญญาณพัลส์ PWM มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกที่ต่างกันจำนวน 15 พัลส์ โดยมีหน่วยของค่าเวลาเป็น “จำนวนเท่าของหน่วยของไทเมอร์ 0” ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความกว้างพัลส์ด้านบวกในหน่วยของไทเมอร์ 0 และหน่วยเวลา μs

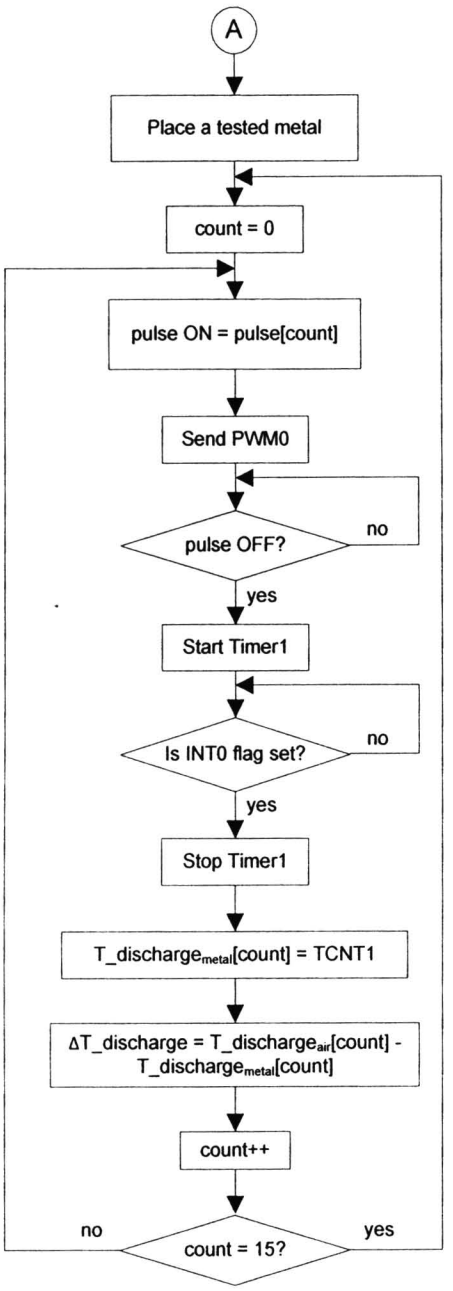
ความกว้างพัลส์ด้านบวก (หน่วยของไทเมอร์ 0)	ความกว้างพัลส์ด้านบวก (μs)
3	9.636
6	19.27
9	28.91
12	38.54
15	48.18
18	57.82
21	67.45
24	77.09
27	86.72
30	96.36
33	106.00
36	115.63
39	125.27
42	134.90
45	144.54

3.4 อัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

หลังจากที่ได้อธิบายแนวทางในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอแล้ว ในหัวข้อย่อยนี้จะนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_discharge_{air}$ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_discharge_{metal}$ และ $\Delta T_discharge$ ตามลำดับ ส่วน Source Code ที่เขียนขึ้นตามอัลกอริทึมดังกล่าวที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์มีแสดงไว้ในภาคผนวก ฎ โดยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เขียนขึ้นมานี้อาศัยหลักการเขียนโปรแกรมตามมาตรฐาน ANSI-C



รูปที่ 3.1 อัลกอริทึมหาค่า $T_discharge_{air}$



รูปที่ 3.2 อัลกอริทึมหาค่า $T_discharge_{metal}$ และ $\Delta T_discharge$

3.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี

หลังจากที่ได้ทำการทดลองและเก็บค่า $\Delta T_discharge$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะทำการจำแนกโลหะแต่ละชนิดที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี ซึ่งในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ 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 หน่วยของไทเมอร์ 0 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เท่านั้น โดยหลักการที่ใช้ในการจำแนกโลหะแต่ละชนิดนั้นเกิดขึ้นจากการสังเกตค่า ΔT_discharge ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแผ่นโลหะขนาดใหญ่ 4x4 ตารางนิ้ว ณ ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่าหนึ่ง ซึ่งมีรายละเอียดในการพิจารณาเพื่อเขียนโปรแกรมเพื่อจำแนกโลหะโดยใช้ไทเมอร์ 1 ของ AVR ATmega168 ดังนี้

3.5.1 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า ΔT_discharge ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า ΔT_discharge มีแนวโน้มที่ค่าจะเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขของชุดคำสั่งที่ใช้ในการรับค่า ΔT_discharge (ตัวแปรอาร์เรย์ TCNT_value ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการและควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์) จากการใช้ความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่านั้น อยู่ในรูปแบบคือ

$$TCNT_value[i] > min - 2 \tag{3.7}$$

เมื่อ i เป็นดัชนีที่บอกอันดับของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ถูกสร้างขึ้น และ min เป็นค่า ΔT_discharge ที่มีค่าต่ำสุด ณ ระยะไกลสุดที่ตรวจจับได้

<u>ยกตัวอย่าง</u> เช่น จากการใช้ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกเท่ากับ 9.64 μs (ค่านี้เป็นความกว้างพัลส์ลำดับที่ 1 ดังนั้น i มีค่าเท่ากับ 0) ในการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ พบว่า ค่า ΔT_discharge ที่เกิดขึ้นจากระยะไกลสุด 7 cm ไปถึงระยะใกล้สุด 1 cm มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น จากตารางที่ 3.2 พบว่า ค่า max ที่ตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 7 จึงทำให้ได้ชุดคำสั่งแรกที่ใช้ในการพิจารณาว่า “โลหะดังกล่าวเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ คือ (TCNT_value[0] > 5)”

3.5.2 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า ΔT_discharge ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า ΔT_discharge มีแนวโน้มที่ค่าจะลดลง จึงทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขของชุดคำสั่งที่ใช้ในการรับค่า ΔT_discharge (ตัวแปรอาร์เรย์ TCNT_value ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการและควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์) จากการใช้ความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกค่านั้น อยู่ในรูปแบบคือ

$$TCNT_value[i] < max - 2 \tag{3.8}$$

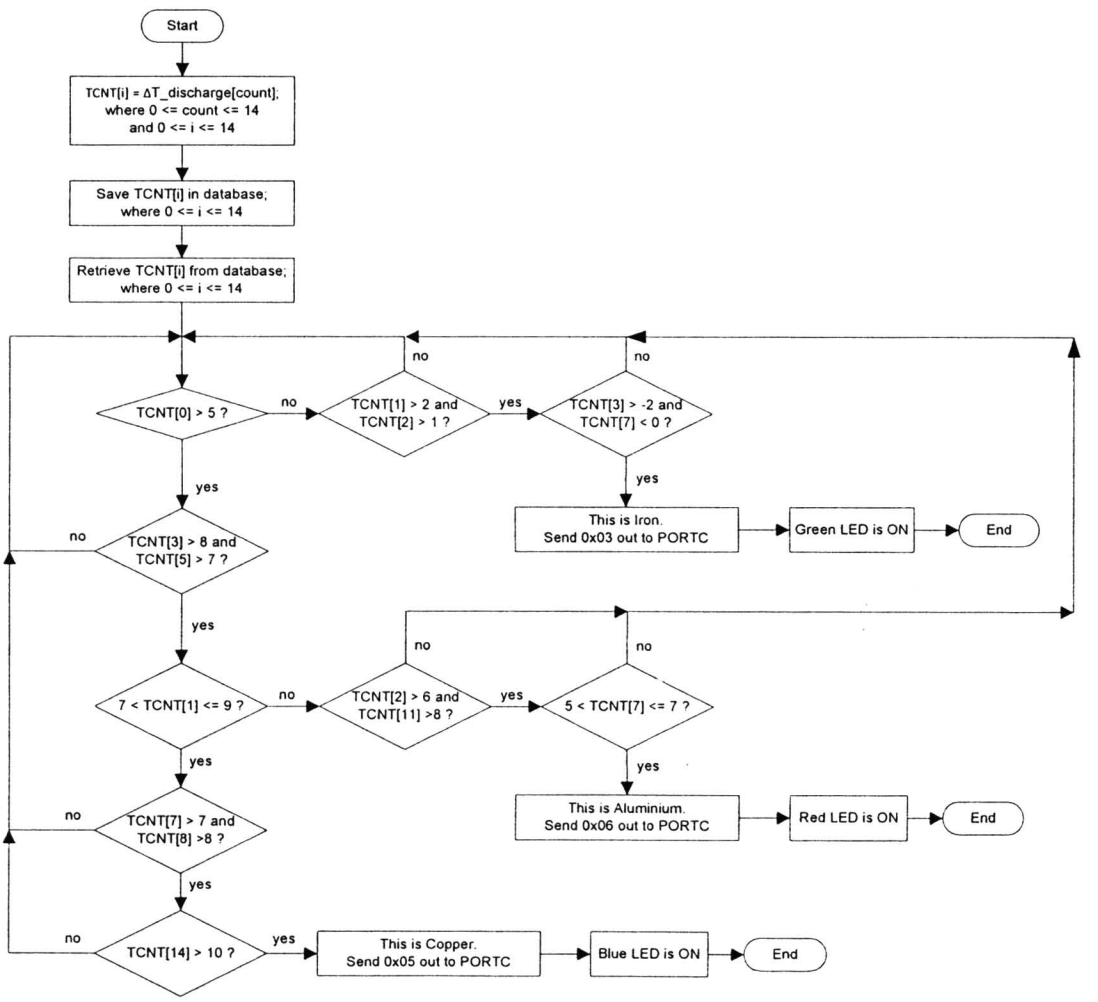
เมื่อ i เป็นดัชนีที่บอกอันดับของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ถูกสร้างขึ้น และ max เป็นค่า ΔT_discharge ที่มีค่าสูงสุด ณ ระยะไกลสุดที่ตรวจจับได้ เช่นกัน

<u>ยกตัวอย่าง</u> เช่น จากการใช้ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกเท่ากับ 144.54 μs (ค่านี้เป็นความกว้างพัลส์ลำดับที่ 15 ดังนั้น i มีค่าเท่ากับ 14) ในการตรวจจับแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ พบว่า ค่า

$\Delta T_discharge$ ที่เกิดขึ้นจากระยะไกลสุด 7 cm ไปถึงระยะใกล้สุด 1 cm มีค่าลดลง ดังนั้น จากตารางที่ 3.2 พบว่า ค่า max ที่ตรวจจับได้มีค่าเท่ากับ 0 จึงทำให้ได้ชุดคำสั่งแรกที่ใช้ในการพิจารณาว่า "โลหะดังกล่าวเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาดใหญ่ คือ (TCNT_value[0] < -2)"

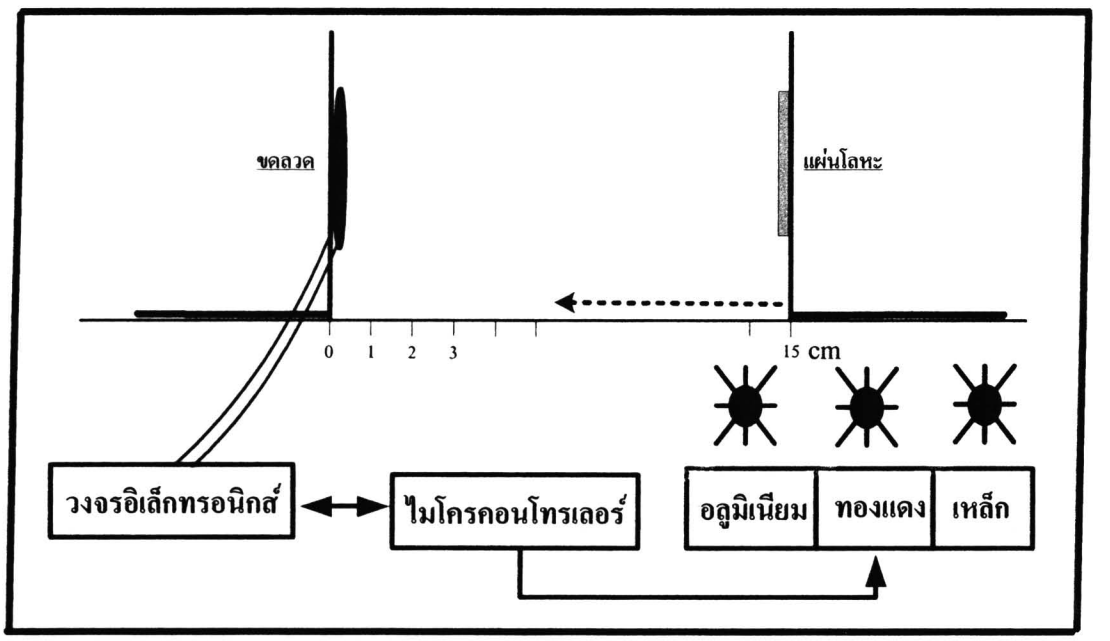
3.5.2 ที่ค่าความกว้างพัลส์ PWM ด้านบวกแต่ละค่าที่ใช้งาน ถ้าค่า $\Delta T_discharge$ ที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับโลหะแต่ละชนิดจากระยะไกลสุดไปจนถึงระยะใกล้สุดที่ตรวจจับโลหะได้ พบว่า ค่า $\Delta T_discharge$ ที่ได้รับมีค่าไม่แน่นอน ในการเขียนโปรแกรมจะไม่นำค่านั้นมาพิจารณา

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

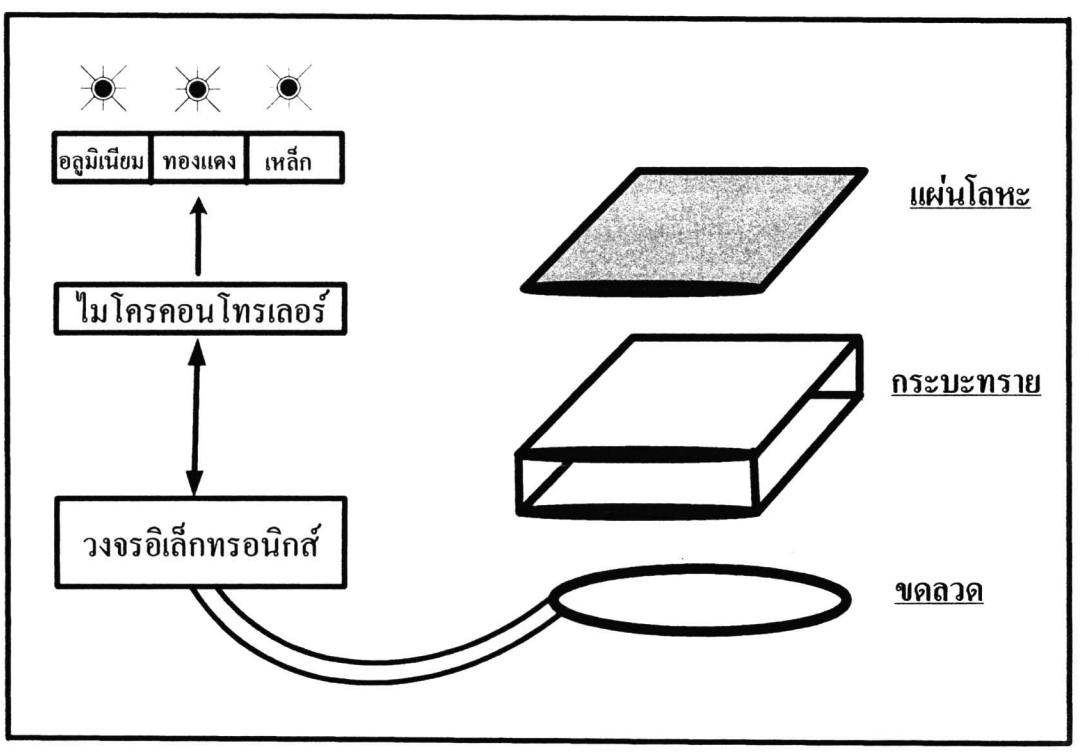


รูปที่ 3.3 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำแนกโลหะที่ตรวจจับได้ผ่านทางหลอด LED 3 สี

โดยลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศและที่วางในพื้นทรายของงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศ



รูปที่ 3.5 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในพื้นทราย