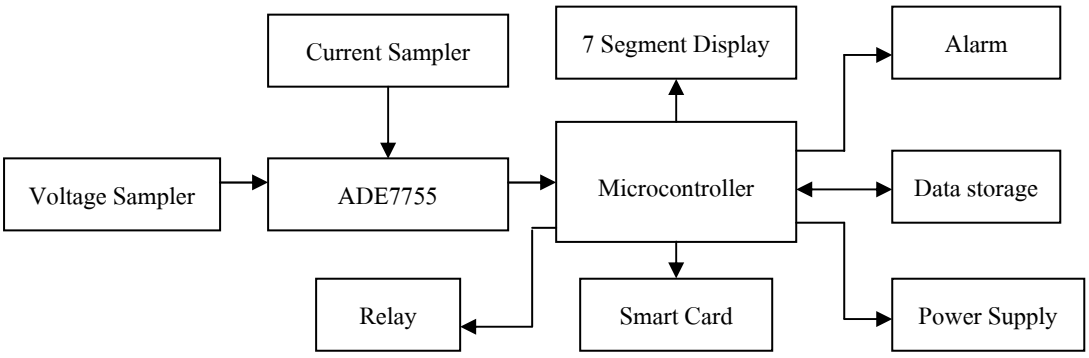
บทที่ 3

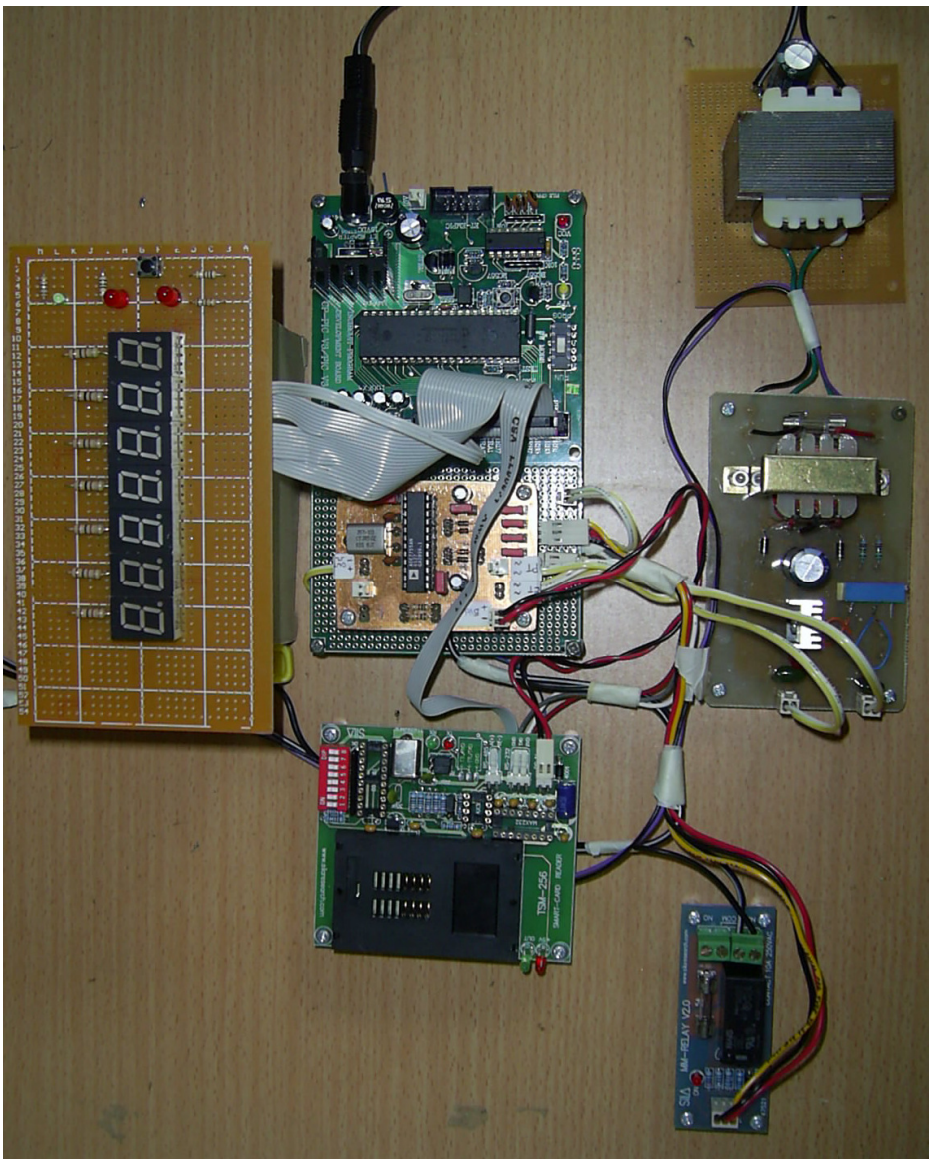
การออกแบบเครื่องวัดไฟฟ้าแบบชำระเงินล่วงหน้าชนิด 1 เฟส

โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 3-1 ภาพประกอบที่ 3-2 และภาพประกอบที่ 3-3 ประกอบด้วยวงจรรวมสำเร็จของบริษัท Analog devices เบอร์ ADE7755 รับสัญญาณกระแส (Current Sampler) และสัญญาณแรงดัน (Voltage Sampler) เพื่อแปลงค่าผลคูณของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสให้เป็นความถี่ (Product-to-frequency converter) ผลลัพธ์ที่ได้จาก AD7755 จะเป็นสัญญาณพัลส์แล้วส่งต่อไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าการใช้พลังงาน และแสดงผลที่ 7 Segment Displayในลำดับต่อไป

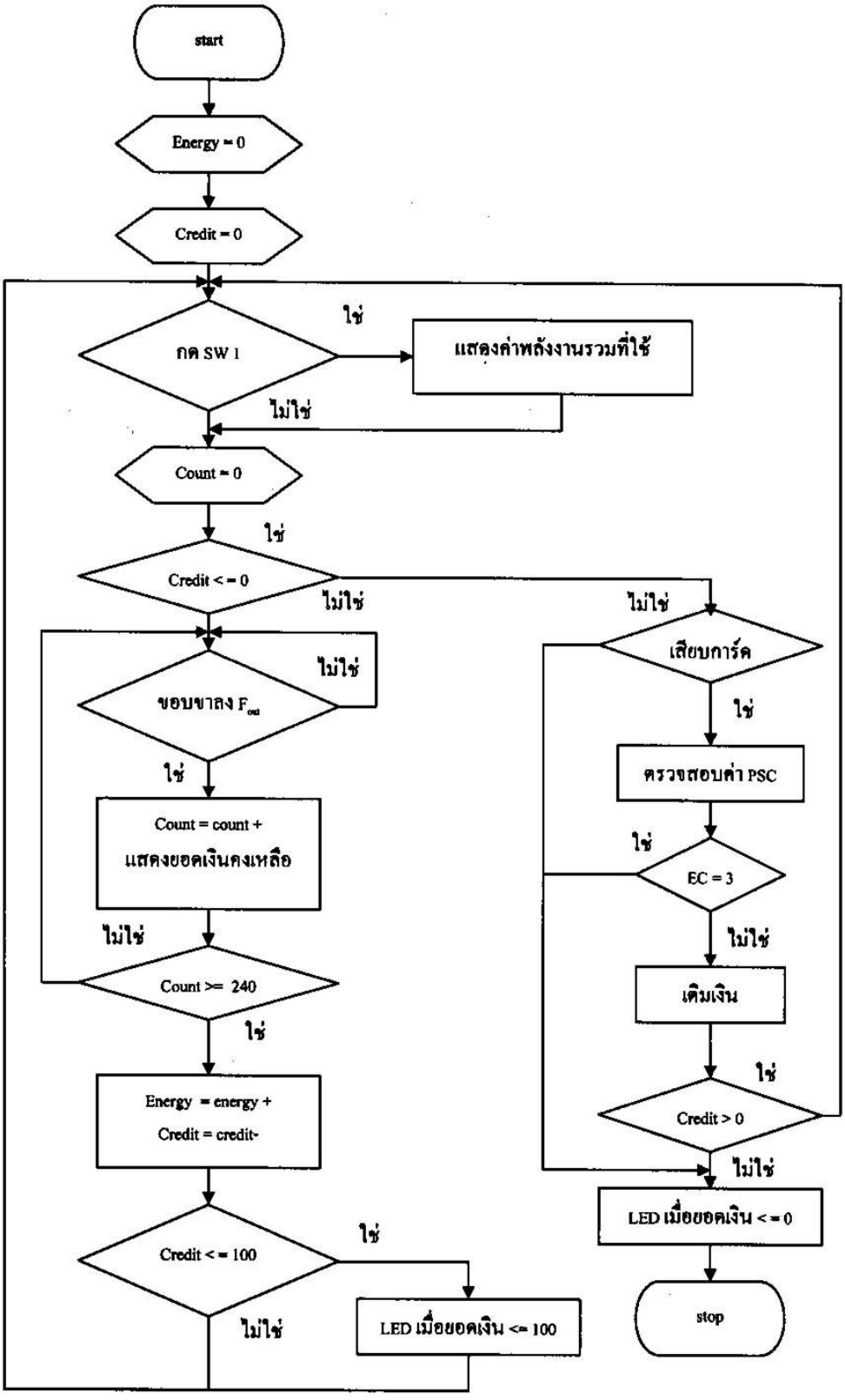
สำหรับการเติมเงินค่าใช้พลังงานไฟฟ้าจะเติมผ่านบัตรสมาร์ตการ์ด เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าใช้พลังงานจนยอดเงินในเครื่องวัดใกล้จะหมดจะมีสัญญาณเตือน(Alarm) ถ้าผู้ใช้ไฟใช้พลังงานจนยอดเงินหมดโดยไม่มีการเติมเงินเพิ่มรีเลย์ (Relay) จะตัดวงจรจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกทันที



ภาพประกอบที่ 3-1 โครงสร้างของเครื่องวัดไฟฟ้าแบบชำระเงินล่วงหน้าชนิด 1 เฟส



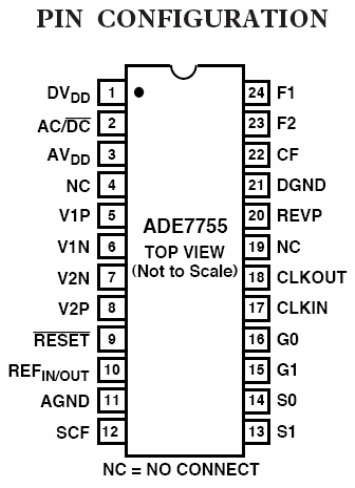
ภาพประกอบ 3-2 วงจรเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า



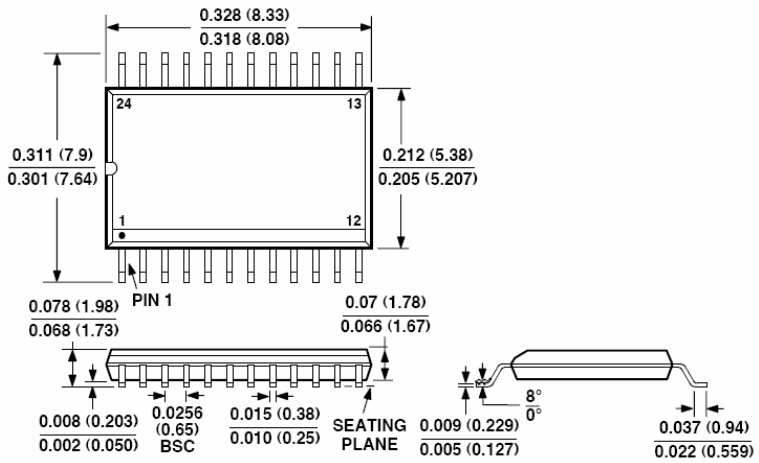
ภาพประกอบที่ 3-3 แผนภูมิสายงานการทำงานของเครื่องวัด

3.1 วงจรรวมสำเร็จ ADE7755

3.1.1 วงจรรวมสำเร็จ ADE7755 ทำหน้าที่แปลงค่าผลคูณของสัญญาณแรงดัน และสัญญาณกระแส ดังภาพประกอบที่ 3-4 และภาพประกอบที่ 3-5 ในการการคำนวณค่าพลังงานมีอัตราการชักตัวอย่าง 900,000 ตัวอย่างต่อวินาที แปลงค่าเป็นสัญญาณดิจิตอล 16 บิตด้วยกระบวนการซิกมา-เดลต้า ภายใน ADE7755 มีวงจรกรองสัญญาณบรรจุไว้แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จาก ADE7755 จะเป็นสัญญาณพัลส์แล้วส่งต่อไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณเพื่อแสดงผล และตัดยอดเงินค่าใช้พลังงานไฟฟ้าในลำดับต่อไป



ภาพประกอบที่ 3-4 การวางขา ADE7755



ภาพประกอบที่ 3-5 ขนาดหน่วยเป็นนิ้วและมิลลิเมตร

3.2 ส่วนตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะออกแบบเครื่องวัดพลังงานให้มีผลการวัดค่าเป็นหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับหน่วยที่ใช้ประเมินค่าใช้จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้า โดยมีเงื่อนไขการออกแบบสำหรับการวัดแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ กระแสพิกัด 40 แอมแปร์ (Ib = 5 A) กำหนดผลการวัด 100 พัลส์ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (imp/kWh) ในการดำเนินงานจะทำการชักตัวอย่างสัญญาณกระแสผ่านช่องสัญญาณ 1 และชักตัวอย่างแรงดันผ่านช่องสัญญาณ 2 สำหรับวงจรการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แสดงตามภาพประกอบที่ 3-6 และภาพประกอบที่ 3-7

- คำนวณความถี่ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

$$100imp/hour = \frac{100}{3600}\sec = 0.02777Hz/kW \quad (3\text{-}1)$$

- ที่พิกัดกระแส Ib (5A) จะได้พิกัดกำลังไฟฟ้า = 220 V × 5 A = 1.1 kW (3-2)

- ค่าความถี่ F1 และ F2 ที่ Ib = 1.1 × 0.027777 Hz = 0.0305555 Hz (3-3)

- การออกแบบส่วนตรวจวัดพลังงาน

ตามมาตรฐาน IEC 61036 (2000-09) สำหรับมาตรวัดชั้น 1 และชั้น 2 จะต้องออกแบบให้รองรับพิสัยการวัดกระแสได้ตั้งแต่ 5% Ib จนถึง I_{MAX} สำหรับการออกแบบในงานวิจัยนี้จะใช้ 2% Ib จนถึง I_{MAX} หรือวัดค่าได้ 400% (100 mA ถึง 40 A) โดยสัญญาณด้านออกของ ADE7755 สามารถหาได้จากการคูณกันของสัญญาณแรงดันสองสัญญาณ (Channel 1 และ Channel 2) แล้วทำการแยกเอาค่าสัญญาณของกำลังไฟฟ้าจริงออกจากค่าของสัญญาณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะได้โดยการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filters) สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นความถี่ (Digital-to-frequency converter) ซึ่งจะทำการผลิตความถี่ออกมาที่ช่องสัญญาณ F1 และ F2 ดังนั้นจะได้สัญญาณขาออกตามสมการ

$$Freq = \frac{8.06xV1xV2xGainxF_{1-4}}{V_{REF}^{\ 2}} \quad (3\text{-}4)$$

ในการออกแบบจะใช้แรงดันสูงสุด ±470 mV ที่ช่องสัญญาณ V1 และแรงดันสูงสุด ±660 mV ที่ช่องสัญญาณ V2 จากตาราง 1 ในภาคผนวก จะได้ค่า

G0 = G1 = 0 และ Gain = 1

จากตาราง 2 ในภาคผนวก ตารางเลือกค่าความถี่ F_{1-4} ทำการเลือกค่า

F_{1-4} = 1.7 Hz

S0 = S1 = 0

V1 = ค่าประสิทธิผล (Root mean square) ของ $470mV = 0.47/\sqrt{2}$

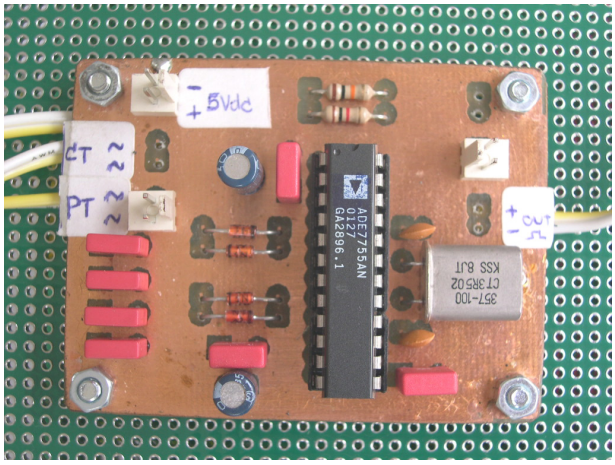
V2 = ค่าประสิทธิผล (Root mean square) ของ $660mV = 0.66/\sqrt{2}$

V_{REF} = 2.5 V

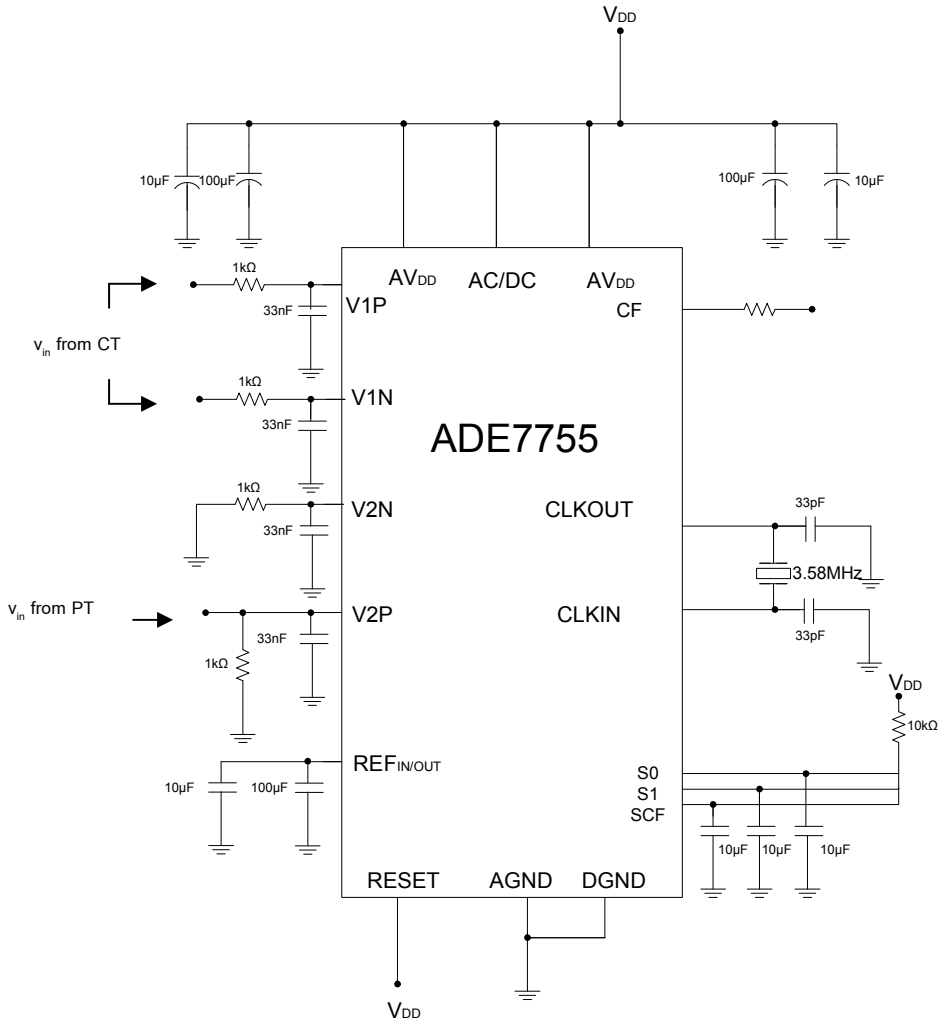
จากสมการ(3-4) จะได้

$$Freq = \frac{8.06x0.47x0.66x1x1.7}{\sqrt{2}x\sqrt{2}x2.5^2} = 0.34Hz \qquad (3\text{-}5)$$

- ค่าความถี่ขาออก CF ใช้ค่าความถี่ช่วงความถี่สูง โดยกำหนดค่า SCF = 1, S1 = S0 = 0 แล้วเปิดตาราง 4 ในภาคผนวก จะได้ CF (Meter constant) คือ 128xF1 = 12,800 imp/kWh



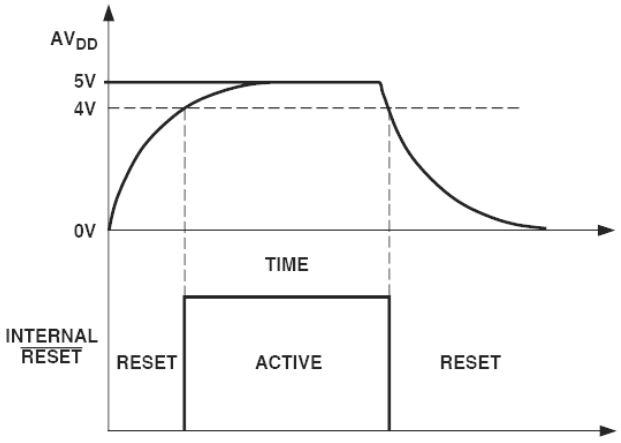
ภาพประกอบที่ 3-6 วงจรส่วนตรวจวัดพลังงาน



ภาพประกอบที่ 3-7 วงจรการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า

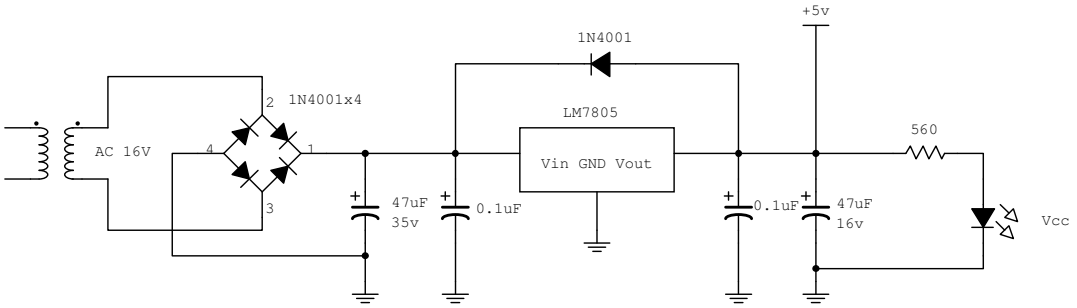
3.3 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)

วงจรรวมสำเร็จ ADE7755 จะทำงานต่อเนื่องได้จะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันดังภาพประกอบที่ 3-8 โดยทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันจากไฟสลับ 220 โวลต์ เป็นแรงดันไฟตรงคงค่าต่ำขนาด 4 โวลต์ $\pm 5\%$ เพราะถ้ามีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่านี้ ADE7755 จะทำการรีเซตค่า (reset) และแหล่งจ่ายไฟนี้จะต้องมีความถูกต้องแน่นอนในการเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 3-8 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรรวมสำเร็จ ADE7755

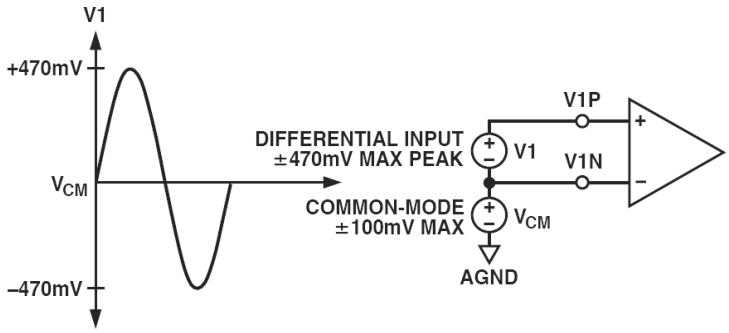
สำหรับแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในเครื่องวัดที่ใช้ ดังภาพประกอบที่ 3-9 จะประกอบด้วยวงจร Rectifier แบบ Bridge พร้อมทั้งวงจร Filter และ Regulator ขนาด +5V เบอร์ LM7805



ภาพประกอบที่ 3-9 แสดงส่วนของวงจรแหล่งจ่ายไฟ

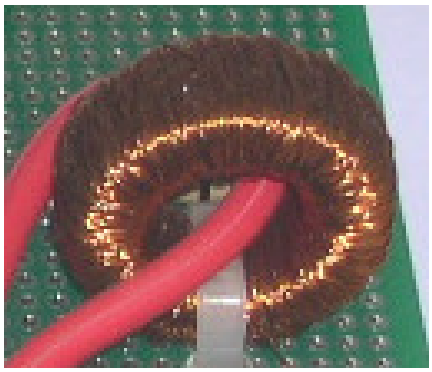
3.4 สัญญาณกระแส (Current signal)

สัญญาณกระแสเป็นสัญญาณในรูปแรงดันโดยต่อเข้าสู่วงจรรวมสำเร็จ ADE 7755 ที่ช่องสัญญาณ V1 (Channel 1) แรงดันอินพุท V1P จะมีค่าเป็นบวกเมื่อเปรียบเทียบกับ V1N สำหรับแรงดัน V1P จะมีค่าใช้งานสูงสุดไม่เกิน ± 470 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10



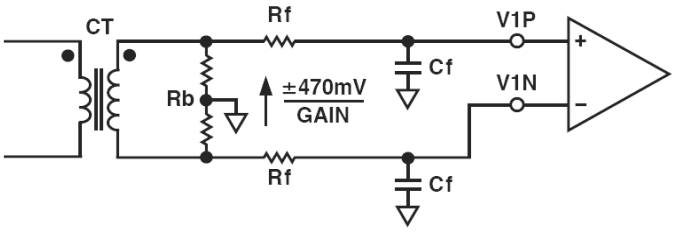
ภาพประกอบที่ 3-10 ระดับสัญญาณสูงสุดของช่องสัญญาณ V1

ในส่วนของการออกแบบตัวตรวจจับสัญญาณกระแสที่ช่องสัญญาณ 1(Channel 1) ดังภาพประกอบที่ 3-11 ใช้หม้อแปลงกระแส หรือ Current transformer (CT) โดยใช้แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) เพราะแกนเฟอร์ไรท์เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของแม่เหล็กทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าเหล็กและมีความต้านทานสูงจึงช่วยลดการสูญเสียบนแกนเหล็กหรือลดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนที่ความถี่สูง สำหรับแกนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 28 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 14 มิลลิเมตร มีความหนาของแกน 10 มิลลิเมตร โดยใช้ลวดเบอร์ 42 พันรอบแกนจำนวน 500 รอบ



ภาพประกอบที่ 3-11 Current transformer (CT)

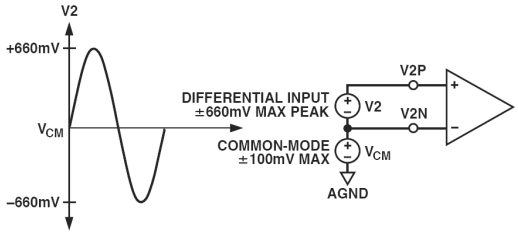
การต่อวงจรช่องสัญญาณ 1(Channel 1) ดังภาพประกอบที่ 3-12 ทางด้านเอาท์พุทของซีที จะต่อกับความต้านทาน Rb ซึ่งในการออกแบบจำนวนรอบของซีที และ ความต้านทาน Rb ต้องเลือกให้เหมาะสมเพื่อให้มีแรงดันเอาท์พุทมีค่าไม่เกิน ±470 มิลลิโวลท์ เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าสูงสุด



ภาพประกอบที่ 3-12 การต่อวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ช่องสัญญาณ V1 (Channel 1)

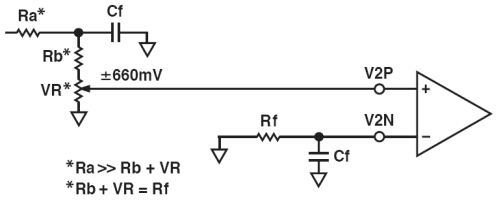
3.5 **สัญญาณแรงดัน (Voltage Channel)**

เป็นสัญญาณแรงดันซึ่งต่อเข้าทางด้านช่อง V2 (Channel 2) ของ วงจรสำเร็จรูป ADE 7755 โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าสูงสุดไม่เกิน ± 660 มิลลิโวลท์ โดยเปรียบเทียบแรงดันอินพุทระหว่างขา V2P และ V2N ดังภาพประกอบ 3-13

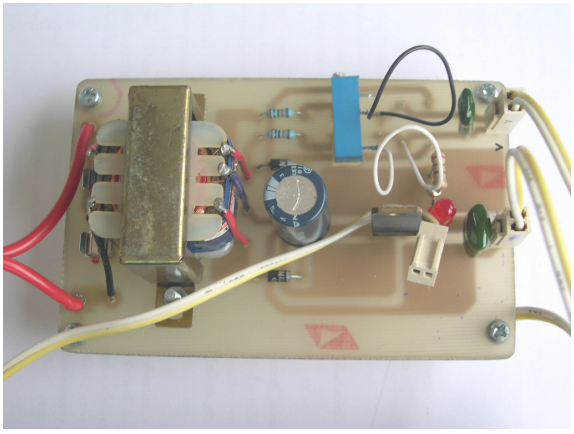


ภาพประกอบ 3-13 สัญญาณแรงดันช่อง V2 (Channel 2)

การต่อวงจรช่องสัญญาณ 2 (Channel 2) ดังภาพประกอบที่ 3-14 ใช้วงจรแบ่งแรงดันให้มีแรงดันเอาท์พุทมีค่าไม่เกิน ±660 มิลลิโวลท์ เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าสูงสุด สำหรับวงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันแสดงตามภาพภาพประกอบที่ 3-15



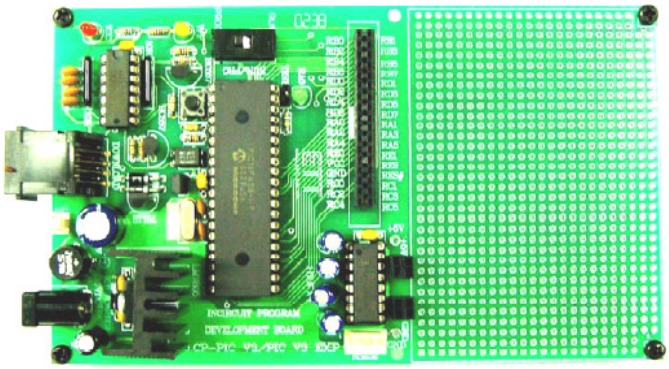
ภาพประกอบ 3-14 การต่อวงจรช่องสัญญาณ 2 (Channel 2)



ภาพประกอบ 3-15 วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ 16F877 ของบริษัท Microchip technology ที่ติดตั้งอยู่บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-PIC V3.0 ของบริษัท อีทีที จำกัด ดังภาพประกอบ 3-16 เพิ่มเติมในส่วนวงจรการอ่านเขียนบัตรชิปการ์ด สำหรับการแสดงผลใช้ LED ตัวเลข 7 ส่วน 7 หลัก ซึ่งรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพประกอบ 3-16 ลักษณะของบอร์ด CP-PIC V3.0

3.7 การออกแบบสมาร์ตการ์ดรีดเดอร์ (Smart Card Reader)

3.7.1 การออกแบบสมาร์ตการ์ดรีดเดอร์

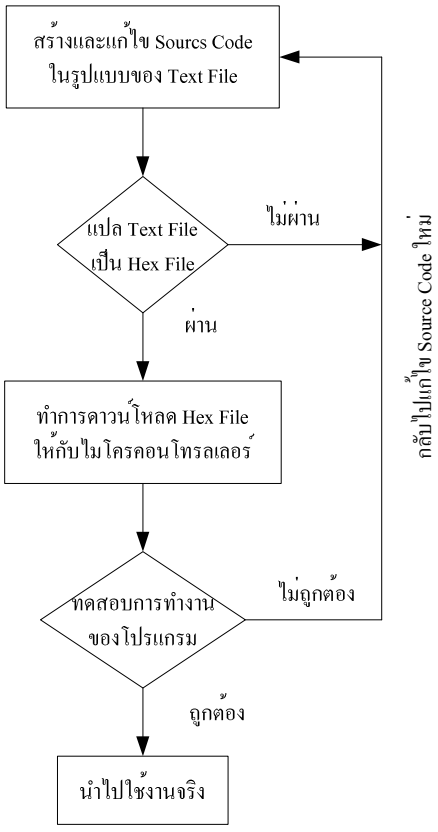
เพื่อลดจำนวนไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นสมาร์ตการ์ดรีดเดอร์จึงออกแบบให้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ร่วมกับส่วนประมวลผลการใช้พลังงาน เพราะหน้าที่หลักของ

สมาร์ตการ์ดรีดเดอร์จะอยู่ที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่ว่าจะเป็นการสร้างสัญญาณนาฬิกาให้การ์ด รับและเก็บข้อมูล รวมถึงการประมวลผล ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 จะทำหน้าที่นี้ได้ทั้งหมดดังนั้นจึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว

3.7.2 การพัฒนาโปรแกรม

3.7.2.1 โปรแกรมในส่วนการประมวลผลการใช้พลังงาน

ในการแปลงผลค่าพลังงานเป็นสัญญาณพัลส์จะเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรับสัญญาณกระตุ้นจากขา F_{OUT} ของ AD7755 ซึ่งทำการนับที่ขอบขาลงของพัลส์ และอาศัยการขัดจังหวะของตัวนับ ในการเก็บบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าและทำการลดค่าเงินเพื่อชำระค่าใช้พลังงานต่อไป ในส่วนการเติมเงินจะพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีสมาร์ตการ์ด สำหรับรูปแบบการเขียนโปรแกรม Microcontroller เป็นการเขียนด้วยภาษาซี โดยในการพัฒนาโปรแกรมจะใช้โปรแกรม PIC C Compiler เป็นตัว Compiler สำหรับแปลภาษาที่เราเขียน (TEXT FILE) ให้เป็นภาษาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าใจ (HEX FILE) สำหรับขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมสามารถสรุปเป็นแผนภูมิสายงานได้ดังภาพประกอบ 3-17

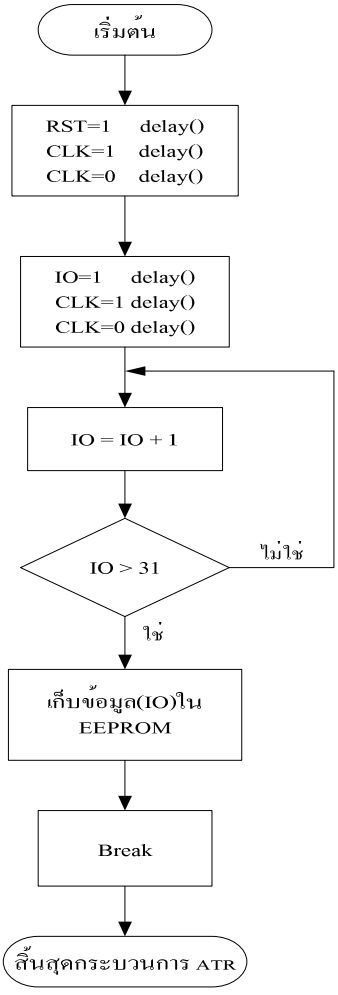


ภาพประกอบ 3-17 แสดงขั้นตอนในการพัฒนาโปรแกรม

3.7.2.2 โปรแกรมติดต่อสื่อสารกับบัตรสมาร์ตการ์ด

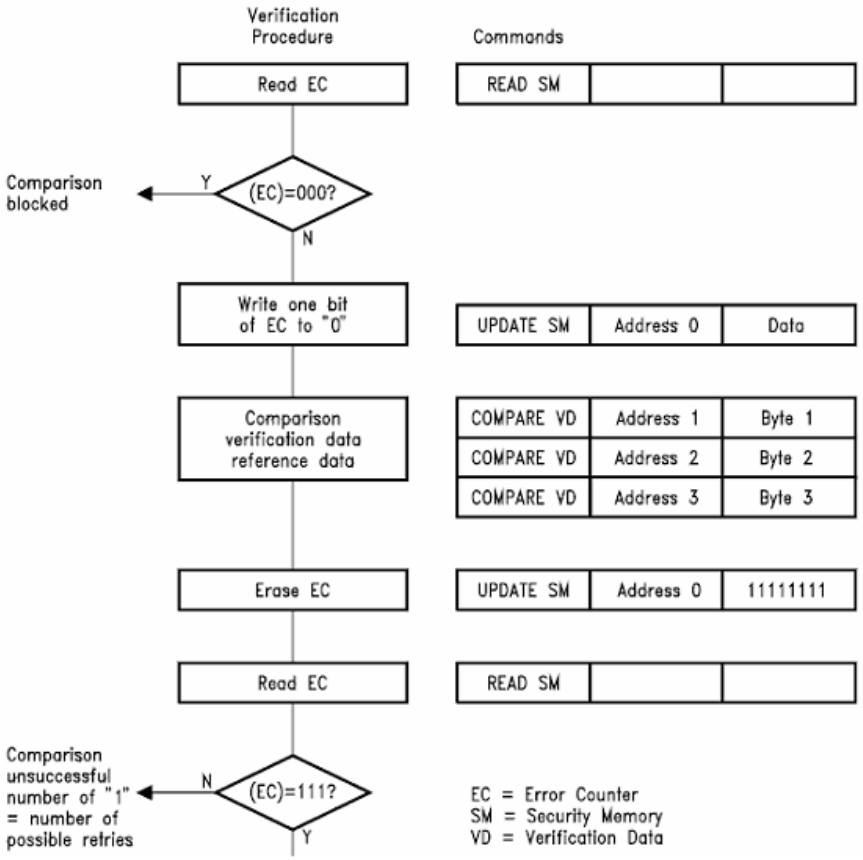
งานวิจัยนี้ใช้ภาษาซีในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งการออกแบบโปรแกรมจะพบปัญหาคือการทำความเข้าใจชุดคำสั่งของผู้ผลิต ตลอดจนโครงสร้างหน่วยความจำข้อมูลของชิปการ์ด ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมจึงต้องแยกเขียนคำสั่งในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

- คำสั่ง Card Present คำสั่งนี้เป็นคำสั่งที่ใช้รีเซตชิปการ์ดหลังจากเสียบการ์ดเข้าสู่สมาร์ตการ์ดรีดเดอร์ การรีเซตชิปการ์ดเป็นการเตรียมความพร้อมให้ชิปการ์ดสำหรับการติดต่อสื่อสารในลำดับต่อไป ในชุดคำสั่งนี้ยังทำให้ทราบถึงข้อมูลรายละเอียดของการ์ดใบนั้นได้แก่ โปรโตคอลการสื่อสาร ขนาดหน่วยความจำข้อมูล นอกจากนั้นคำสั่ง Card Present ยังใช้สำหรับการทำให้การ์ดกลับมาเริ่มทำงานใหม่เมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้น สำหรับคำสั่งนี้สามารถอธิบายได้จากภาพประกอบที่ 3-18 แผนภูมิสายงานการทำงาน Reset and Answer to Reset



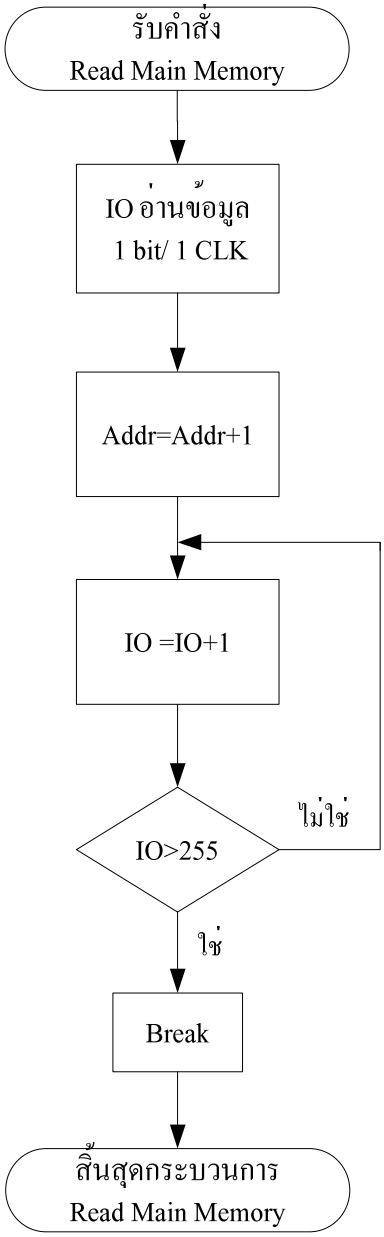
ภาพประกอบที่ 3-18 แผนภูมิสายงานการทำงาน Reset and Answer to Reset

- คำสั่ง Verify PIN เป็นการเขียนคำสั่งควบคุมการแสดงรหัสผ่านเพื่อขออนุญาตเข้าถึงข้อมูลในบัตร สำหรับ Verify PIN เป็นการทำงานด้วยวงจรดิจิตอลภายในชิปเนื่องจากชิปการ์ดที่ใช้ไม่มีโปรเซสเซอร์ช่วยในการประมวลผล ดังนั้นวิธีการ Verify PIN จึงเป็นการตรวจสอบกุญแจรหัสโดยการส่งข้อมูลให้แก่ชิปโดยตรง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการระบบความปลอดภัยสูงการเขียนโปรแกรม Verify PIN อธิบายได้ตามภาพประกอบที่ 3-19

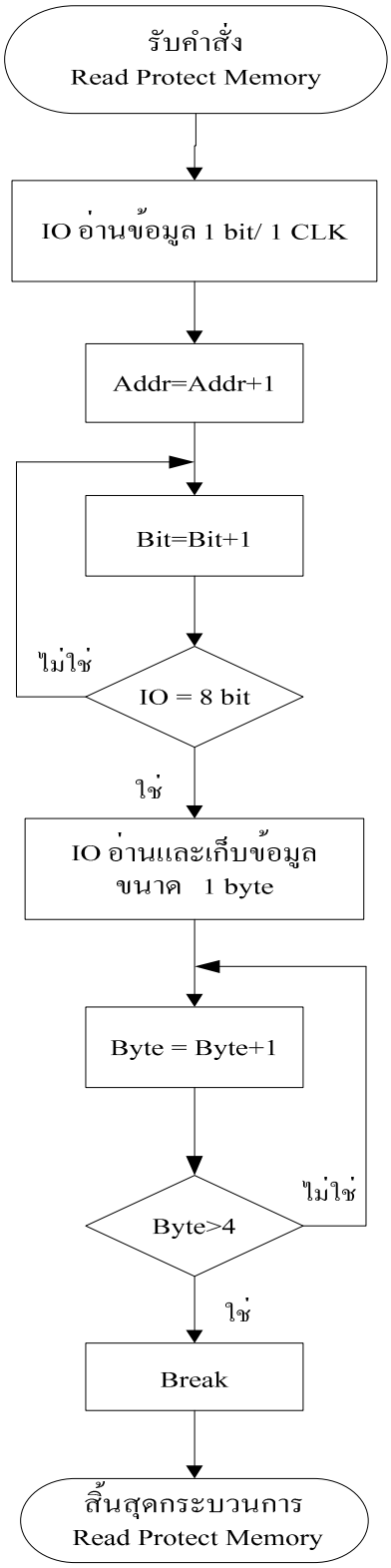


ภาพประกอบที่ 3-19 แผนภูมิสายงานการทำงาน คำสั่ง Verify PIN

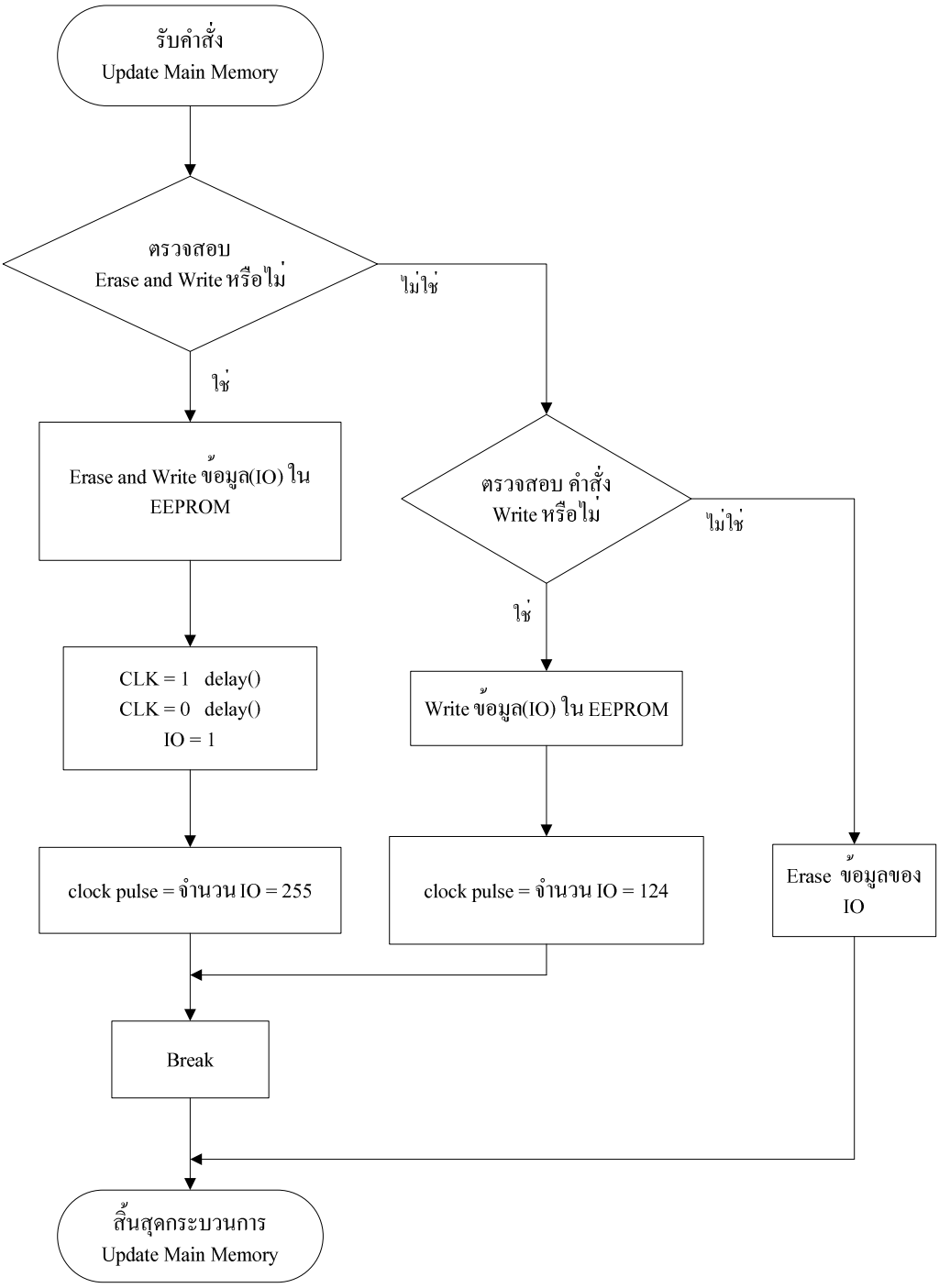
- คำสั่งอ่านและเขียนข้อมูล ในการเขียนคำสั่งชุดนี้จะต้องให้ทำงานหลังจากคำสั่ง Verify PIN ผ่านแล้วเท่านั้น ในชิปการ์ด SLE4442 มี main memory 256 ไบต์ ซึ่งมี 32 ไบต์เป็น protection memory ซึ่งจะเขียนข้อมูลไม่ได้ สำหรับคำสั่งในส่วนนี้แสดงตามภาพประกอบ 3-20 ภาพประกอบ 3-21 และภาพประกอบ 3-22



ภาพประกอบ 3-20 แผนภูมิสายงานการทำงาน Read Main Memory



ภาพประกอบ 3-21 แผนภูมิสายงานการทำงาน Read Protect Memory



ภาพประกอบ 3-22 แผนภูมิสายงานการทำงาน Update Main Memory