

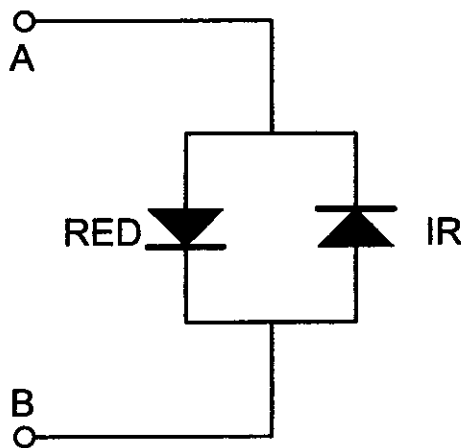
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. วิจัยและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

1.1 การออกแบบวงจรเครื่องวัดคลอโรฟิลล์ต้นแบบ

การประเมินค่าคลอโรฟิลล์ในใบพืชใช้เทคนิคของการดูดกลืนแสงสองความยาวคลื่นมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งการวัดความเข้มของแสงทั้งสองความยาวคลื่นจะสลับกันทำงานดังนี้

เริ่มต้นด้วยการให้แสงสีแดงสว่าง ส่องผ่านใบไม้ที่จะทำการวัด แสงสีแดงส่วนหนึ่งจะถูกลดทอนลงด้วยปริมาณของคลอโรฟิลล์ตัวในใบ ตรวจวัดแสงจะวัดค่าความเข้มของแสงสีแดงที่ผ่านทะลุใบไม้ไปอีกด้านหนึ่ง จากนั้น LED เปล่งแสงสีแดงจะหยุดทำงาน ต่อมา LED แสงอินฟราเรดจะสว่าง ตัวตรวจวัดแสงจะวัดค่าความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านใบ จากนั้น LED เปล่งแสงอินฟราเรดจะหยุดทำงาน สำหรับครั้งแรกสุดของการวัดหลังจากเปิดเครื่องก่อนทำการวัดทุกครั้งจะทำการวัดค่าความเข้มแสงสูงสุดขณะไม่มีใบ เพื่อเก็บไว้เป็นค่าอ้างอิงขณะไม่มีใบทั้งแสงสีแดงและแสงอินฟราเรด หลังจากนั้นจะเป็นการอ่านค่าความเข้มของแสงที่ถูกลดทอนลงไปขณะมีใบ ขั้นตอนการควบคุมการเปล่งแสงของหลอดไฟทั้งสองและการอ่านค่าความเข้มของแสงที่ผ่านใบถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ รายละเอียดของวงจรในส่วนของการควบคุมการทำงานของหลอด LED ทั้งสองจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

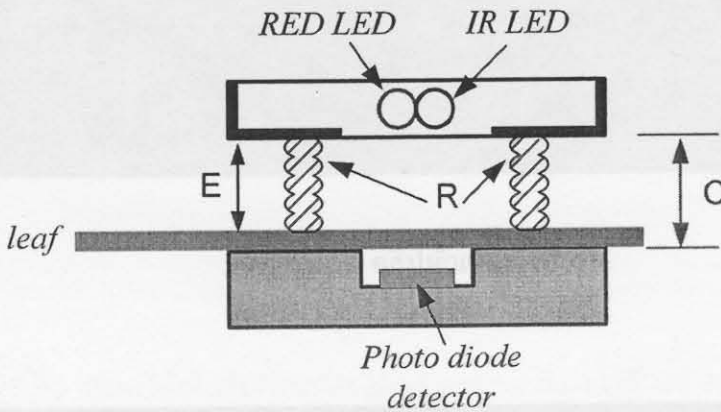


รูปที่ 5 เป็นวงจรไดอะแกรม ของเซ็นเซอร์กำเนิดแสง

จากวงจรเซ็นเซอร์ในรูปที่ 5 หลอดไฟ LED ทั้งสองจะต่อกลับหัวกลับหางกัน เป็นการประหยัดสายที่จะมาควบคุมการติดดับของหลอดไฟทั้งสอง โดยใช้สายตัวนำเพียง 2 เส้นเท่านั้น แต่จะมีความซับซ้อนในการควบคุมการติดดับของหลอดไฟทั้งสอง ในการควบคุมการติดดับของ LED ทั้งสองนั้น ถ้าป้อนไฟขั้วบวกเข้าที่ ขั้ว A และลบเข้าที่ ขั้ว B จะทำให้หลอดไฟ LED สีแดงสว่าง และถ้า

สลับให้ไฟขั้วบวกเข้าที่ B และลบเข้าที่ A จะทำให้หลอดไฟ LED อินฟราเรดสว่าง เมื่อไม่ต้องการให้สว่างต้องไม่ป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วทั้งสอง

1.2 การออกแบบหัวเซ็นเซอร์และ detector



รูปที่ 6 ต้นแบบ โครงสร้างของหัวเซ็นเซอร์

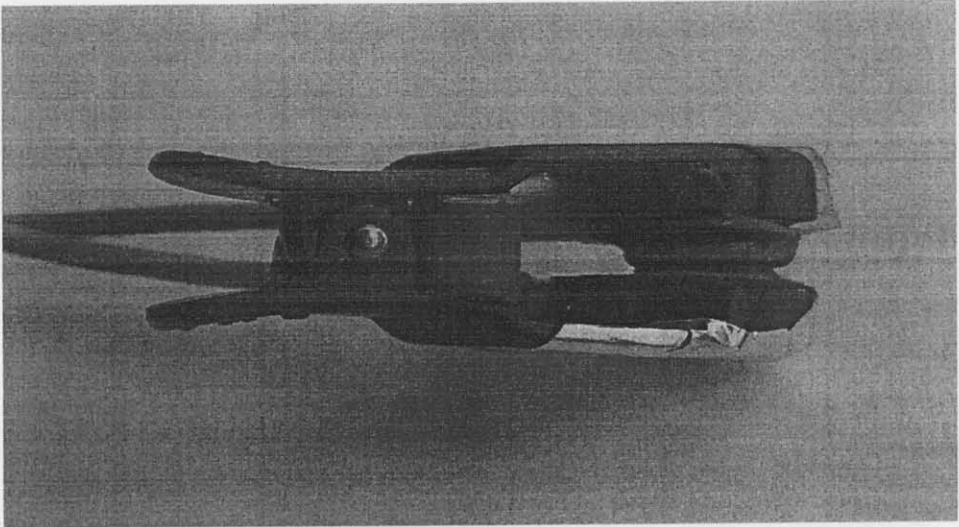
จากรูปที่ 6 แหล่งกำเนิดแสงสีแดงและแสงอินฟราเรด จะอยู่ในดวงเดียวกัน ด้านบนและด้านข้างของหลอดไฟ LED เคลือบด้วยวัสดุและสีทึบแสง เพื่อไม่ให้แสงภายนอกมารบกวนในระบบ

R คือวัสดุโฟมทึบแสงซึ่งสามารถยึดหดได้ทางแนวตั้ง

E คือระยะห่างจากใบถึงหลอดกำเนิดแสง ซึ่งจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความหนาของใบที่นำมาทำการวัด

C คือระยะห่างระหว่างหลอดกำเนิดแสงกับ photo detector

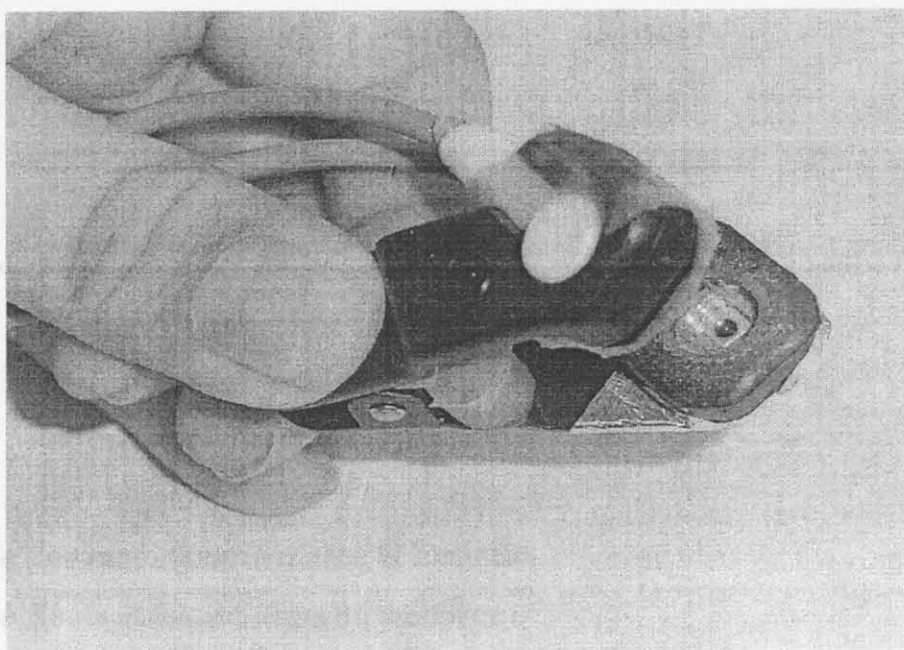
C เป็นระยะที่สำคัญมากจะถูกตั้งให้มีระยะคงที่ เพื่อที่จะรักษา ให้มีระยะห่างคงที่ทุกๆ ครั้งที่ทำกรวัด ทั้งขณะมีใบและขณะไม่มีใบ สำหรับ photo detector นี้จะติดตั้งไว้ในหลุมดังรูปที่ 6 ซึ่งอยู่ใต้ใบไม้อะไรก็ตามที่ทำกรวัด ทั้งนี้เพื่อจะลดแสงรบกวนจากภายนอกที่อาจเล็ดลอดมาได้จากด้านใต้ของใบไม้ที่จะทำการวัด



รูปที่ 7 คลิปหัวเซ็นเซอร์



รูปที่ 8 แสดงในส่วนของ IR LED และ RED LED และโฟมสำหรับกันแสงจากภายนอก



รูปที่ 9 แสดงให้เห็นในส่วนของ photo detector ที่วางไว้ด้านล่างสุดของหลุม

1.3 กฎการดูดกลืนแสง

อาศัยกฎ 2 กฎของการดูดกลืนแสงคือ กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) และกฎของเบียร์ (Beer's law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า

“เมื่อมีแสงเดี่ยว (monochromatic light) ซึ่งคือแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของเนื้อเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”

กฎของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า

“เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”

เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต เรียกเป็นกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) และเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} \epsilon bc$$

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100$$

$$\%A = 100 - \%T$$

โดยที่ A คือการดูดกลืนแสงของสารที่ทำกรทดสอบ (Absorbance)

I_0 คือ ปริมาณความเข้มของแสงที่ไม่มีการดูดกลืน หรือความเข้มแสงอ้างอิง

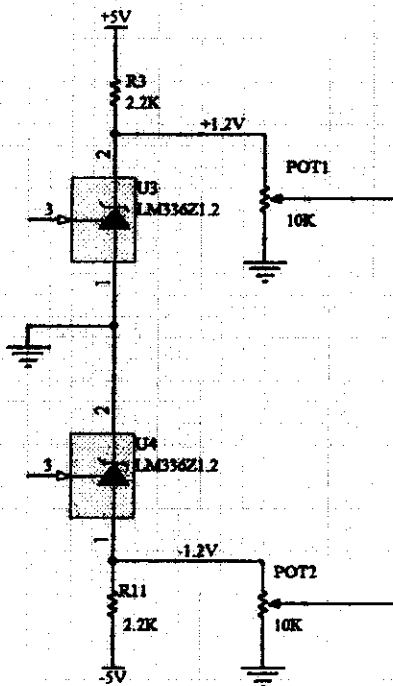
I คือปริมาณความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสาร

ϵ คือสภาพดูดกลืนแบบ โมลาร์ (molar absorptivity)

c คือความเข้มข้นของสารในหน่วย โมลต่อลิตร

b คือ absorbtion path length หน่วยเซ็นติเมตร

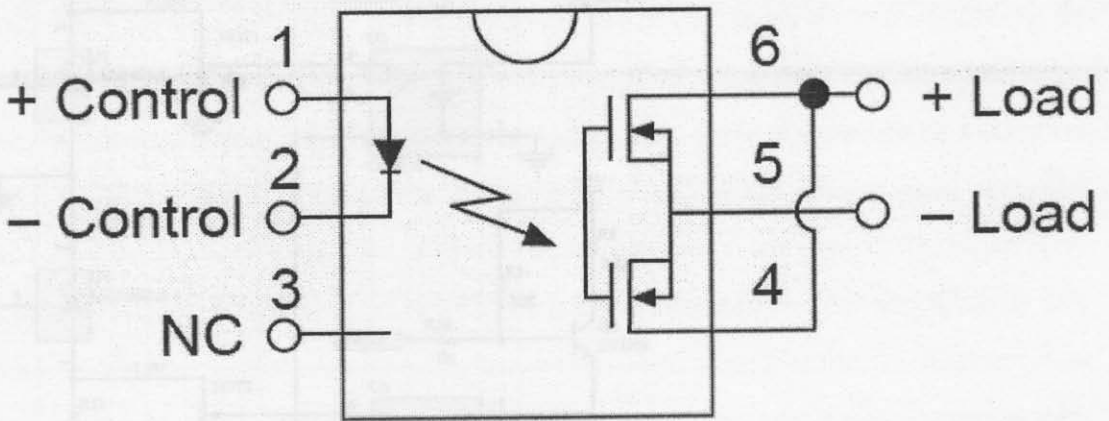
T คือ light transmission(transmittance) ของสารที่ทดสอบ



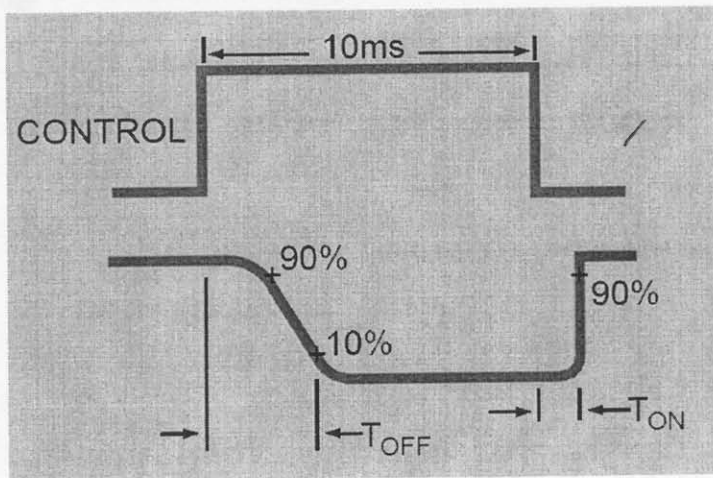
รูปที่ 10 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับ LED สีแดงและ อินฟราเรด

U3 และ U4 เป็น voltage reference (LM336 1.2) ที่ให้แรงดันอ้างอิง คงที่ 1.2 V โดย U3 สำหรับสร้างแรงดันอ้างอิงบวก 1.20V และ U4 สร้างแรงดันอ้างอิงลบ 1.20V POT1 ปรับลดแรงดันอ้างอิงบวกให้เหลือ 0.9V เพื่อเป็นแรงดันสำหรับควบคุมให้มีความสว่างคงที่ของ LED สีแดง POT2 ปรับลดแรงดันอ้างอิงลบให้เหลือเพียง -0.4V เพื่อเป็นแรงดันสำหรับควบคุมให้มีความ

สว่างคงที่สำหรับ LED อินฟราเรดโดยที่แรงดันอ้างอิงทั้งสอง ถูกควบคุมด้วย analog switch U2 และ U5 (LCB110) สำหรับ LCB110 เป็นวงจร analog switch ที่ควบคุมด้วยแสงดังรูป

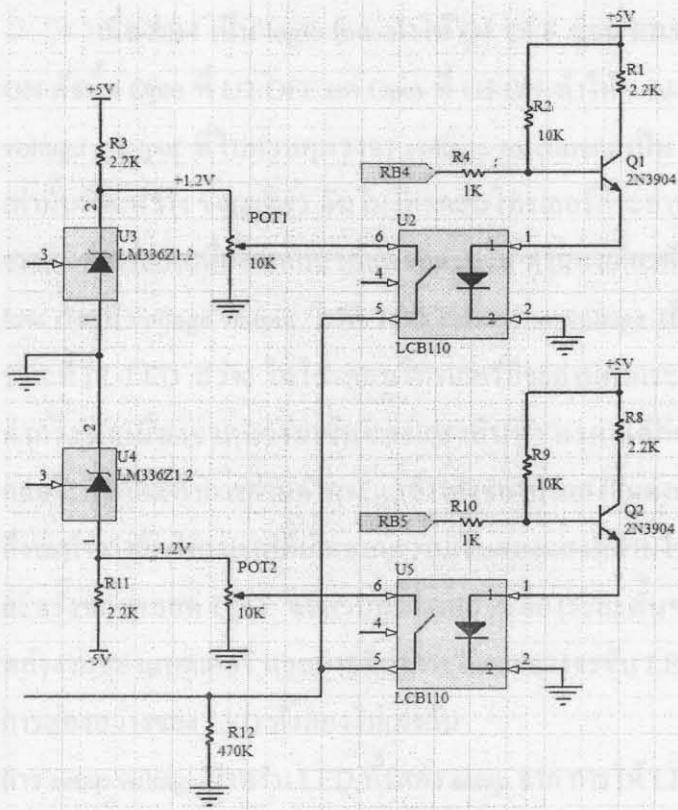


รูปที่ 11 แสดง Pin configuration ของ LCB110

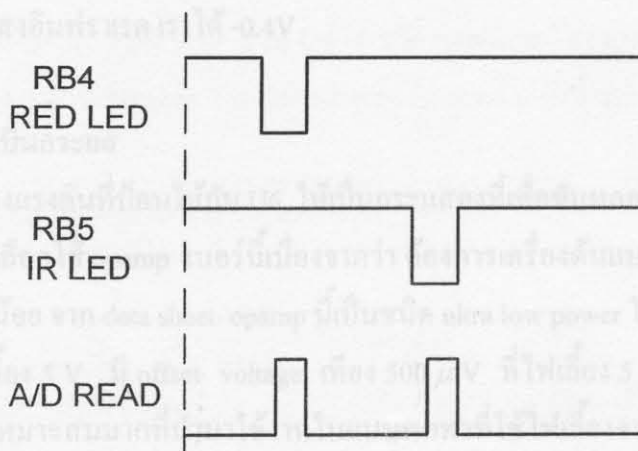


รูปที่ 12 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ Opto analog switch LCB110

จากรูปที่ 12 จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณควบคุมเป็นบวก Analog switch จะ open circuit คือเมื่อ LED ของ LCB110 ON analog switch จะ OFF และเมื่อ LED อยู่ในสถานะ OFF analog switch จะมีสถานะเป็น ON



รูปที่ 13 วงจรควบคุม voltage ที่จะป้อนให้กับวงจรขับ LED



รูปที่ 14 สัญญาณควบคุม RED LED และ IR LED

สัญญาณ RB4 (RED LED) และ RB5 (IR LED) เป็นสัญญาณควบคุมการติดดับของหลอด LED และถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เริ่มแรกสัญญาณทั้งสองจะให้ logic high ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 อยู่ในสถานะ ON ทำให้ Opto ของ U2 และ U5 ON ยังผลให้ analog switch ของ U2, U5 OFF voltage ที่ป้อนให้กับวงจร voltage to current ไม่มีกระแสจ่ายให้กับ LED ทั้งสอง คือทั้ง RED LED และ IR LED ดับทั้งคู่

เมื่อ RB4 เป็น logic low ทำให้ Q1 OFF ส่วน RB5 ยังคงเป็น logic high ทำให้ Q2 ยังคง ON ดังนั้น Opto ที่ U2 OFF แต่ Opto ที่ U5 ON ทำให้ analog switch ของ U2 เท่านั้นที่ ON ทำให้ voltage output ที่ไปควบคุมวงจร voltage to current เป็น 0.9 V ณ ตอนนี้ หลอดไฟ LED สีแดง เท่านั้นที่จะสว่าง ขณะเดียวกันไมโครคอนโทรเลอร์ก็จะอ่านค่ากระแสที่ได้จาก photo detector ซึ่งจะเป็นค่ากระแสเนื่องจากแสงสีแดงที่ผ่านไบ ทานองเดียวกันถ้า RB4 logic high และ RB5 logic low ก็จะมี voltage output ไปที่ วงจร current to voltage เป็น -0.4 V ทำให้หลอด IR LED สว่าง ขณะที่ IR LED สว่าง ไมโครคอนโทรเลอร์ก็จะอ่านค่ากระแสที่ได้จาก photo detector ซึ่งจะเป็นค่ากระแสเนื่องจากความเข้มของแสงอินฟราเรด แต่ก่อนจะทำการวัดเพื่อประเมินค่าของ กลอโรฟิลล์ จะทำการอ่านค่ากระแสอ้างอิงของทั้งแสงสีแดงและแสงอินฟราเรดขณะที่ไม่มีไบ แล้วก็จะทำการวัดค่ากระแสที่เกิดจากความเข้มของแสงที่ผ่านไบนำมาเปรียบเทียบกัน ในการสว่างแต่ละครั้งของหลอด LED จะควบคุมในสว่างเพียงระยะสั้นๆ 40 ms เท่านั้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่ และการที่ค่ากระแสของวงจรขับ LED ทั้งสองไม่เท่ากันเนื่องจากว่า กำลังการส่องสว่างของ LED ทั้งสองไม่เท่ากัน

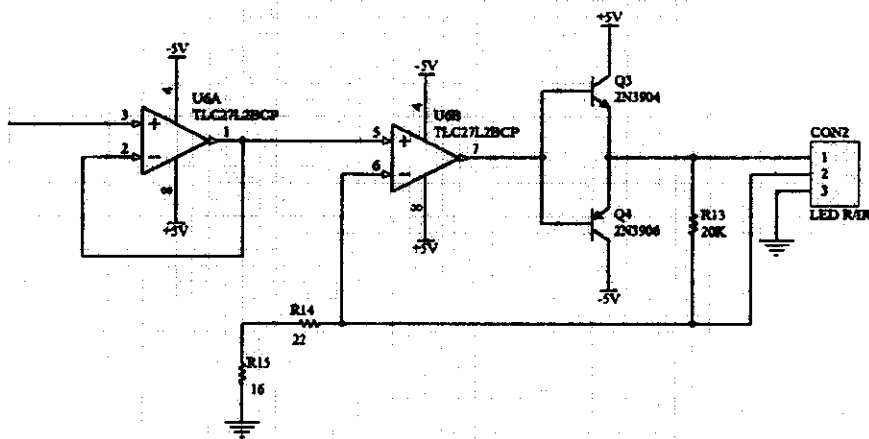
การ setup voltage สำหรับ LED ทั้งสอง setup จาก การให้ LED สีแดง สว่างขณะไม่มีไบไม่กัน แล้วทำการปรับความสว่างโดยการปรับ POT1 และ voltage นี้จะถูกแปลงเป็นกระแส และให้ A/D ขนาด 10 bits อ่านค่าได้ 1000 ค่าสูงสุดที่ A/D อ่านได้คือ $(1024)_{10}$ และสำหรับแสงอินฟราเรดก็ setup ทานองเดียวกัน เพื่อให้ A/D อ่านค่าได้ $(1000)_{10}$ เช่นกัน จากการปรับของแสงสีแดงได้ voltage ที่ 0.9 V และแสงอินฟราเรด เราได้ -0.4V

1.4 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

วงจรนี้จะแปลงแรงดันที่ป้อนให้กับ U6 ให้เป็นกระแสคงที่เพื่อขับหลอด LED ทั้งสองให้มีความสว่างคงที่ การที่เลือกใช้ opamp เบอร์นี้เนื่องจากว่า ต้องการเครื่องต้นแบบที่เป็นแบบพกพา จำเป็นต้องใช้พลังงานน้อย จาก data sheet opamp นี้เป็นชนิด ultra low power ใช้พลังงานน้อยมาก เพียง $95 \mu W$ ที่ไฟเลี้ยง 5 V มี offset voltage เพียง $500 \mu V$ ที่ไฟเลี้ยง 5 V ทำงานได้ตั้งแต่ไฟเลี้ยง 3V ถึง 16 V เหมาะสมมากที่นำมาใช้งานในแบบพกพาที่ใช้ไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ วงจรมี การทำงานดังนี้ ขณะที่ v_{in} เป็นบวก U6A ก็จะทำให้ output เป็นบวกด้วย และ opamp U6B ต่อวงจร เป็น voltage to current amplifier แต่เนื่องจาก v_{in} ที่ U6B เป็นค่าคงที่ voltage ที่ขา inverting จะมีค่าเท่ากับ v_{in} วงจรนี้เป็นวงจร non inverting amplifier ที่ output จะให้ voltage เป็นบวกด้วย ทำให้ Q3 มีสถานะ ON ส่วน Q4 จะ มีสถานะ OFF ดังนั้นกระแสจะไหลจาก ขา emitter ของ Q3 เข้า LED ผ่าน terminal ขา 1 และไหลกลับเข้าที่ terminal ขา 2 การที่กระแสไหลจาก terminal 1 ผ่าน LED และไหลกลับเข้าที่ terminal 2 ทำให้ LED สีแดงสว่าง และกระแสที่ไหลที่หลอด LED จะมีค่าคงที่

นั่นคือ LED จะมีความสว่างคงที่ เพราะว่า voltage ที่ขา inverting มี voltage เท่ากับ ขา non inverting ซึ่งค่าของกระแสสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{LED} = \frac{V_{in}}{38\Omega}$$



รูปที่ 15 วงจร ขับ LED

ในทางกลับกัน ถ้า input เป็นลบ voltage ที่ขา non inverting ของ U6B เป็นลบ output voltage ของ U6B เป็นลบด้วย ทำให้ Q3 มีสถานะ OFF ส่วน Q4 จะ ON กระแสจะไหลจาก ground ผ่านความต้านทาน R14 และ R15 ออกที่ terminal 2 และผ่านหลอด LED กลับเข้าที่ terminal 1 ผ่าน Q4 ลงไฟเลี้ยงลบ

กระแสที่ใช้ในการขับหลอดสีแดงสามารถคำนวณได้จาก

$$I = \frac{0.9V}{38\Omega} = 23.68mA$$

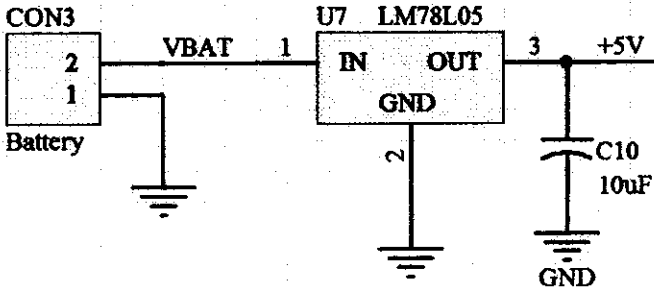
กระแสที่ใช้ในการขับหลอดอินฟราเรด

$$I = \frac{0.4V}{38\Omega} = 10.52mA$$

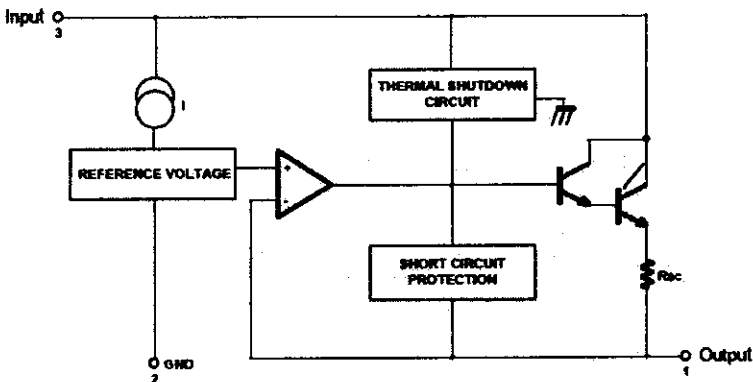
1.5 วงจรรักษาแรงดัน 5 V จากแหล่งจ่ายไฟแบตเตอรี่

เนื่องจากวงจรต้องการแรงดันไฟเลี้ยงที่คงที่ เพื่อเสถียรภาพในการทำงานของวงจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรประมวลผลสัญญาณ ต้องการไฟเลี้ยงสูงสุดไม่เกิน 5.5 V และแบตเตอรี่ที่มี

จำหน่ายในตลาดและมีแรงดัน 5 V หาซื้อได้ง่ายไม่มีจำหน่าย จึงใช้แบตเตอรี่แห้งขนาด 9 V เป็นแหล่งจ่ายไฟ จำเป็นต้องลดแรงดันลงและสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ และมีการสูญเสียพลังงานน้อย จากรูป ไฟเลี้ยงจะถูก regulate ให้เหลือเพียง 5 V ด้วย IC 78L05 ข้อดีคือเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กเพียง 3 ขา (TO-92) รับแรงดัน input ได้ตั้งแต่ 7-20 V โดยมี dropout voltage เพียง 1.7 V และใช้กระแสขณะ Quiescent เพียง 2 mA



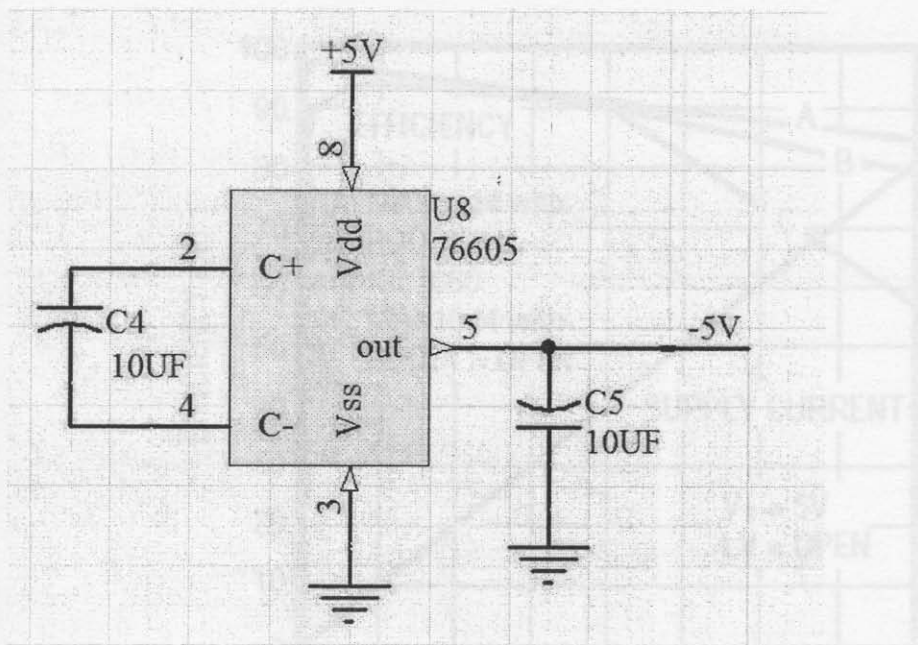
รูปที่ 16 วงจร Regulator 5 volt



รูปที่ 17 บล็อกโคอะแกรมภายในของ 78L05

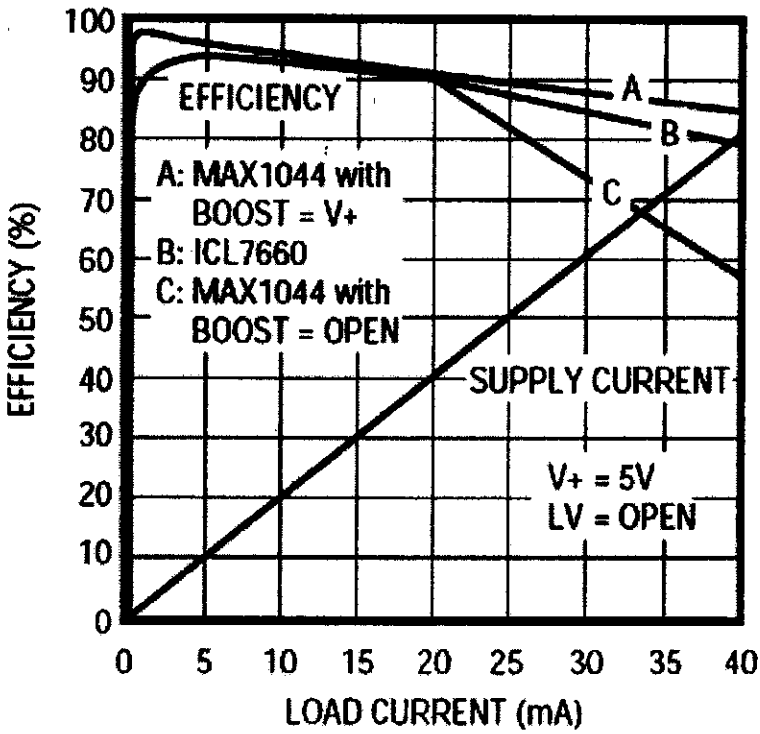
1.6 วงจรสร้างแรงดันไฟลบ

เนื่องจาก Sensor ของหลอดไฟ LED มีการต่อแบบกลับหัวกลับหางดังรูปที่ 17 นั้น เป็นการประหยัดสาย ซึ่งใช้สายตัวนำเพียง 2 เส้น แต่สำหรับการควบคุมการติดดับของหลอดไฟทั้งสอง ต้องใช้ไฟสลับขั้วในการควบคุมการ เราใช้ไฟบวกควบคุมหลอด LED สีแดง และไฟลบควบคุมการติดของหลอดอินฟราเรด เครื่องที่ออกแบบเป็นแบบเครื่องพกพาใช้แบตเตอรี่เพียงก้อนเดียว ซึ่งเป็นไฟเลี้ยงบวก จึงต้องใช้วงจรกำเนิดแรงดันไฟลบ 5 volts สำหรับเลี้ยงวงจร opamp เพื่อควบคุมการติดดับของหลอด LED วงจรเป็นดังรูป



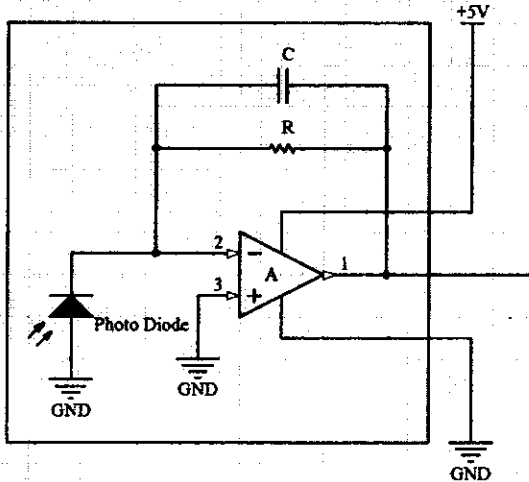
รูปที่ 18 วงจรสร้างแรงดันไฟเลี้ยงลบ 5 volt

สาเหตุที่เลือกใช้ ICL76605 เป็นเพราะว่าสร้างแรงดันไฟลบจากแรงดันไฟบวก โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกเพียง capacitor 2 ตัว จากวงจรคือ C4 และ C5 ที่ open circuit voltage conversion มีประสิทธิภาพสูงถึง 99.9% ใช้กระแสเพียง $170 \mu\text{A}$ เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานที่มีแหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่และประสิทธิภาพขณะมีกระแส load 10 mA สูงถึง 98% และที่กระแส 20 mA ประสิทธิภาพกว่า 90% ใช้งานได้ในช่วง voltage input ที่กว้าง



รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ และ กระแส load

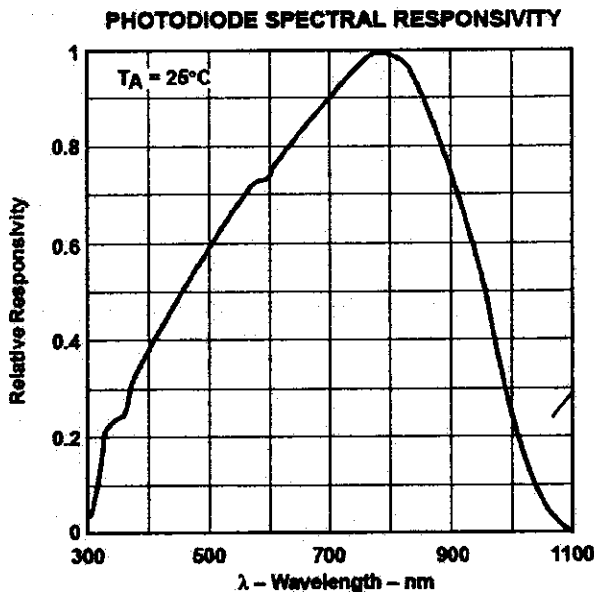
1.7 วงจรแปลงค่าความเข้มแสงเป็นแรงดัน



รูปที่ 20 วงจรแปลงค่าความเข้มแสงเป็นแรงดัน

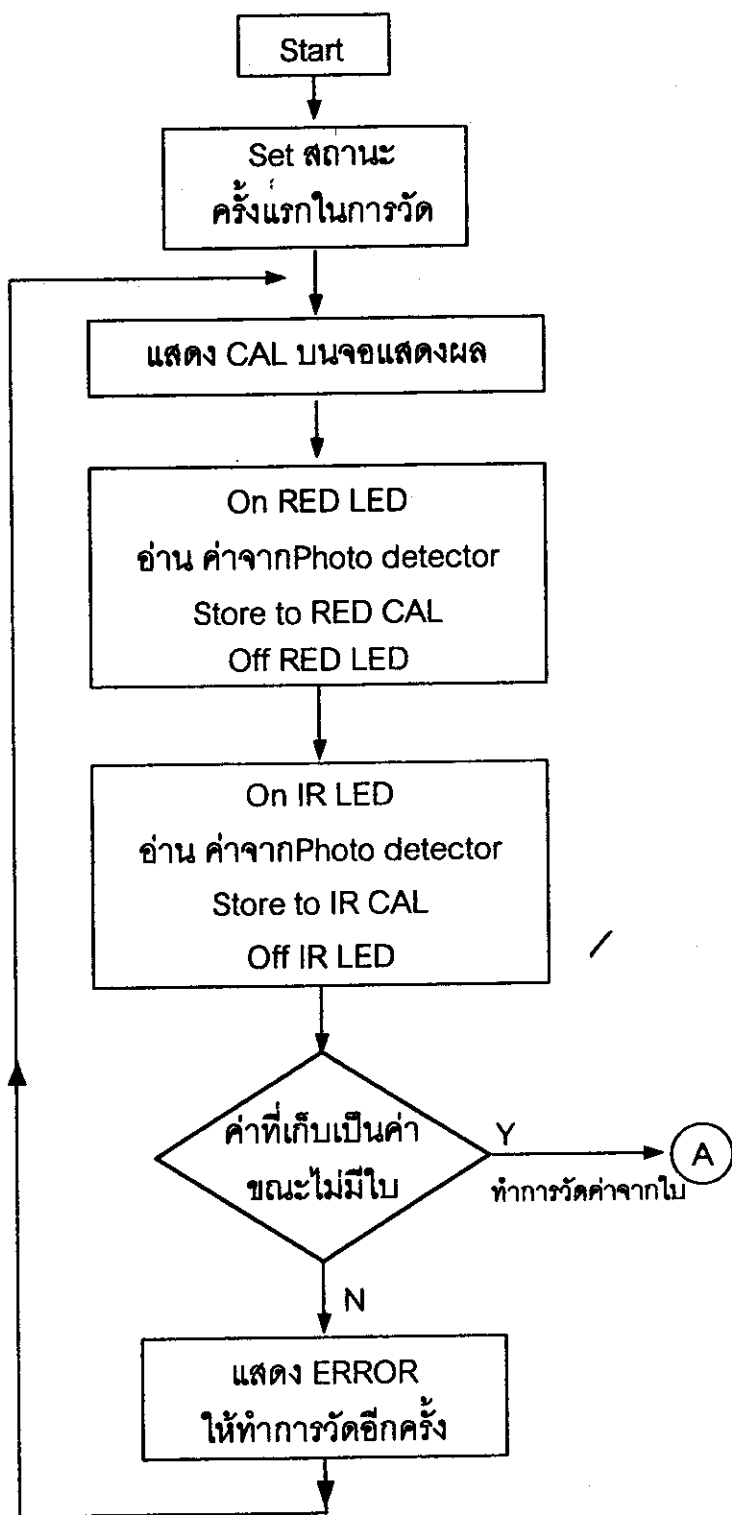
สำหรับการแปลงค่าความเข้มแสงเป็นแรงดัน เราใช้ TSL 252 ซึ่งเป็น Opto amplifier สาเหตุที่เลือกใช้ TSL252 นี้เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

- ทำงานใน mode single supply ซึ่งเหมาะกับการใช้งานด้วยแบตเตอรี่
- ทำงานได้ในช่วง voltage ที่กว้าง คือตั้งแต่ 2.7 ถึง 5.5 volts
- ใช้พลังงานน้อย เพียง 1.1 mA ที่ไฟเลี้ยง 5 V
- มี dark offset voltage น้อย เพียง 10mV(MAX) ที่ไฟเลี้ยง 5 V
- ง่ายต่อการติดตั้งใช้งานเพราะมีเพียง 3 ขาเท่านั้น โดยมี Tran impedance amplifier และ photo diode รวมอยู่ด้วยกัน
- ให้ output voltage ได้สูงสุดถึง 4 V ที่ไฟเลี้ยง 5V
- วัดความเข้มแสงได้ช่วงกว้างตั้งแต่ 400-1000 nm

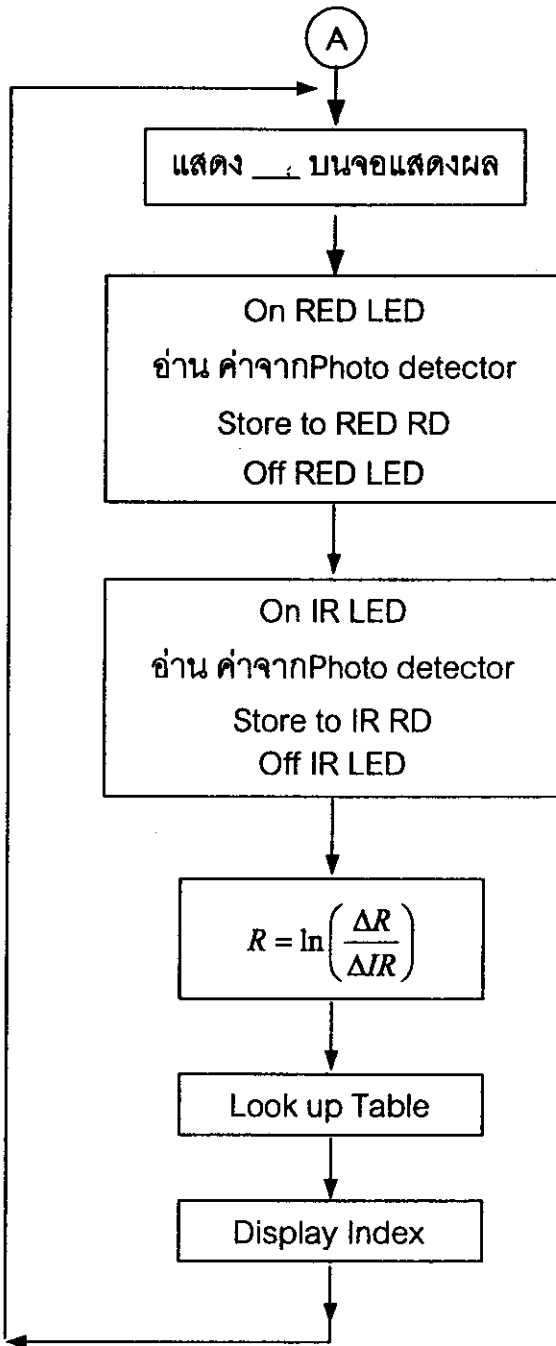


รูปที่ 21 Photodiode spectral responsivity

เป็น sensor ที่ให้ output เป็น voltage โดยที่ขนาดของ output voltage แปรผันโดยตรงกับความเข้มของแสง จากรูปที่ 21 เราจะเห็นว่ากราฟตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น แต่ไม่มีผลต่อการวัด เนื่องจากเราจะทำการวัดแบบเทียบผลความแตกต่างขณะไม่มีใบกับขณะมีใบ โดยขั้นตอนการทำการวัดเป็นไปตาม Flowchart



รูปที่ 22 Flowchart การทำงาน

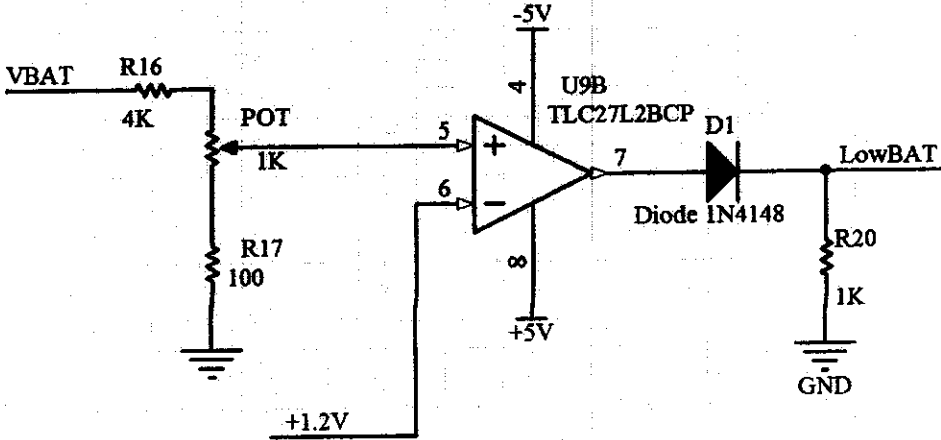


รูปที่ 23 Flowchart การทำงาน

เริ่มจากการ ON SWITCH ให้เครื่องเริ่มทำงาน ตัวเครื่องเองจะทำการบันทึกค่าของความเข้มแสงขณะที่ไม่มีใบของทั้งแสงสีแดง โดยแปลงความเข้มของแสงเป็น voltage ด้วย sensor TLS252 ค่า voltage ที่ได้ ถูกแปลงเป็นสัญญาณ digital ด้วย ไมโครคอนโทรเลอร์ค่าที่แปลงได้จะไว้ที่ตัวแปร REDCAL และของอินฟราเรดขณะที่ไม่มีใบ ไว้ที่ตัวแปร IRCAL แต่ถ้าขณะเปิดเครื่องครั้งแรกแล้วมีใบไม้คั่นอยู่ ค่าที่อ่านได้จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของค่าที่ได้ขณะที่ไม่มีใบ เครื่อง

ก็จะแสดงบนหน้าจอ LCD ว่า ERROR ให้ทำการ CAL อีกครั้ง ในแต่ละครั้งที่ให้ LED สว่าง จะให้สว่างเพียง 40 ms เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่

1.8 วงจรตรวจจับ low battery



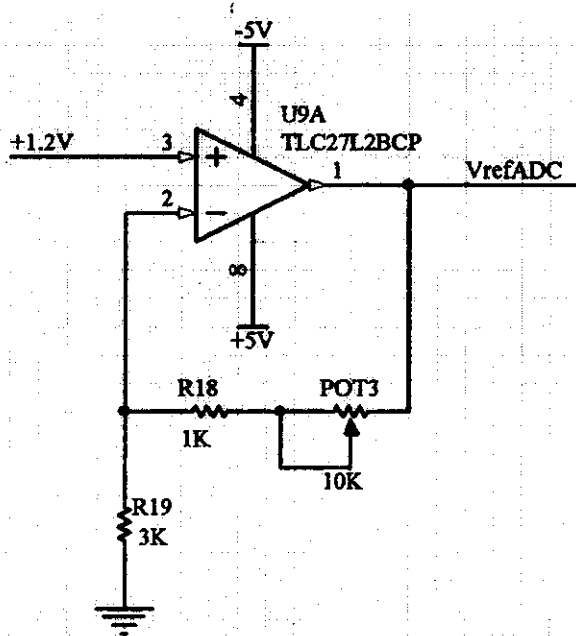
รูปที่ 24 วงจรตรวจจับ Low battery

จากวงจรรูปที่ 24 แบตเตอรี่ voltage ถูกแบ่งแรงดัน ด้วยความต้านทาน R16 POT1K และ R17 โดยปรับ POT 1K ให้มี voltage 1.5 V ขณะที่ แบตเตอรี่มี voltage 9 V (battery full) และที่ขา inverting ของ opamp ป้อน voltage reference 1.2V ยังผลให้ comparator output เป็น +5V (สัญญาณ LowBAT) เนื่องจาก voltage ขา non inverting มี voltage สูงกว่าขา inverting และเมื่อมีการใช้งาน voltage ของแบตเตอรี่จะลดลงเรื่อยๆ ตามชั่วโมงการใช้งาน และเมื่อ แบตเตอรี่ voltage ลดลงจนต่ำกว่า 7.2 V จะทำให้ voltage ที่ขา non inverting มี voltage ต่ำกว่า 1.2V จะทำให้ comparator มี output เป็น -5V สัญญาณ LowBAT จะมีสถานะเป็น Low เนื่องจาก diode D1 reverse bias ไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านระดับสัญญาณที่ขา ini เมื่อสัญญาณ LowBAT มีสถานะเป็น LOW เครื่องจะแสดงสถานะ Low BAT บนจอแสดงผล LCD เตือนให้ผู้ใช้ทราบเพื่อทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่

1.9 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับ A/D

วงจรนี้เป็น non inverting amplifier โดยขยายสัญญาณจากแรงดันอ้างอิง 1.2 V มาขยายเพื่อให้ได้ voltage 4 V เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับ A/D ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งค่าแรงดันอ้างอิง 4 V นี้ ทำให้แรงดันสูงสุดที่ทำให้ A/D full scale คือ 4 V การปรับให้ได้ output 4 V ก็ด้วย

การปรับ POT3 ให้ output ของ U9A การที่เราใช้ voltage full scale ที่ 4 V ก็เนื่องจากว่า sensor ที่เปลี่ยนแสงเป็น voltage นั้น มี voltage สูงสุดอยู่ที่ 4 V ที่แรงดัน 5V supply วงจรการสร้าง voltage reference สำหรับ A/D เป็นดังรูป 25



รูปที่ 25 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับ A/D

1.10 การออกแบบในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์

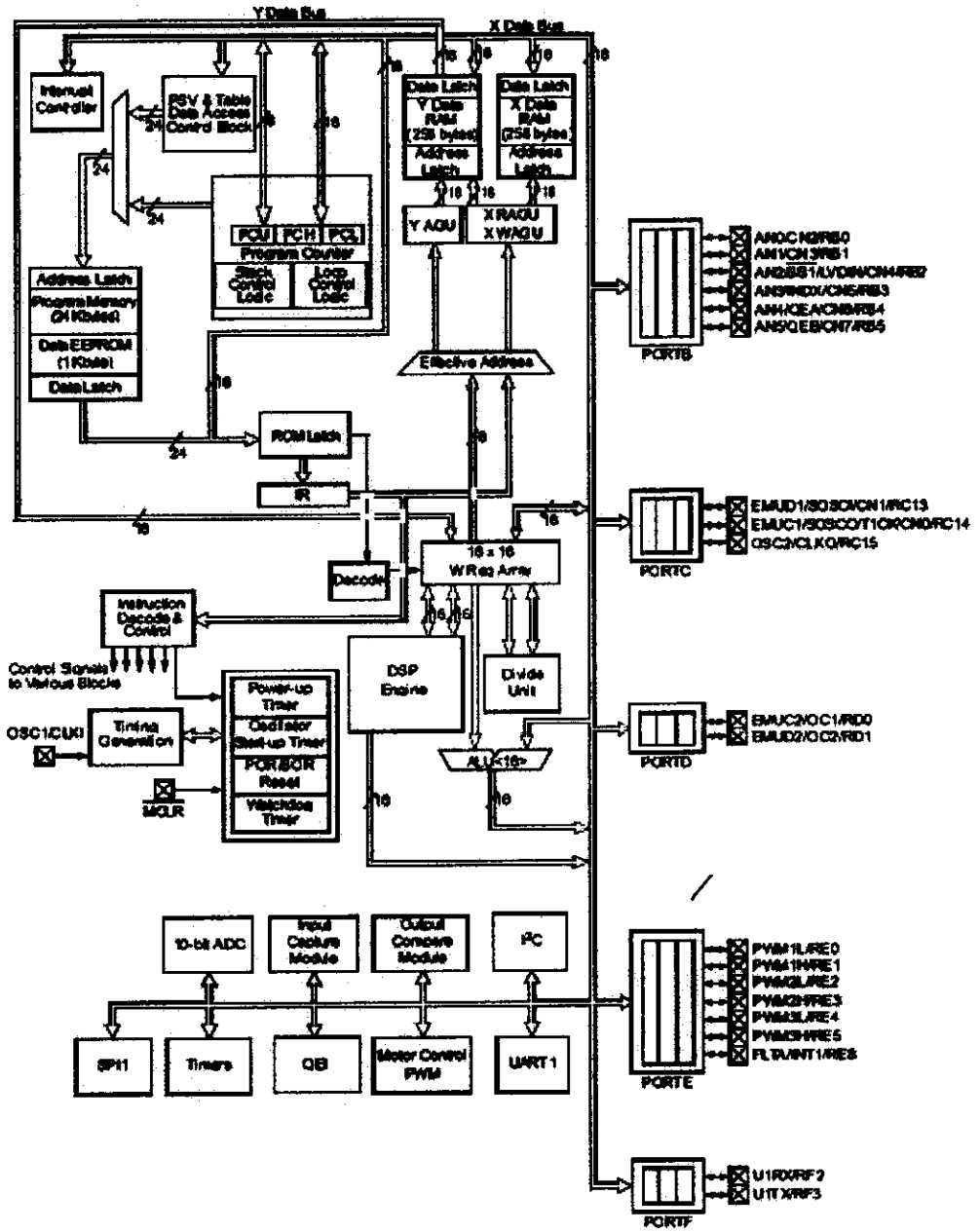
เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F2010 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ CPU แบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มี 84 คำสั่ง รองรับรูปแบบการอ้าง Address ได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช ขนาด 12 กิโลเวิร์ด สามารถลบเขียนได้ไม่น้อยกว่าแสนครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเองได้
- มีหน่วยความจำ EEPROM 1 กิโลไบต์
- มีหน่วยความจำแรม 512 ไบต์
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ได้ดี
- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
- มีวงจรตรวจจับไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์อนรีเซต, เพาเวอร์อัปไทมเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ตอัปไทมเมอร์
- มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์แบบโปรแกรมได้

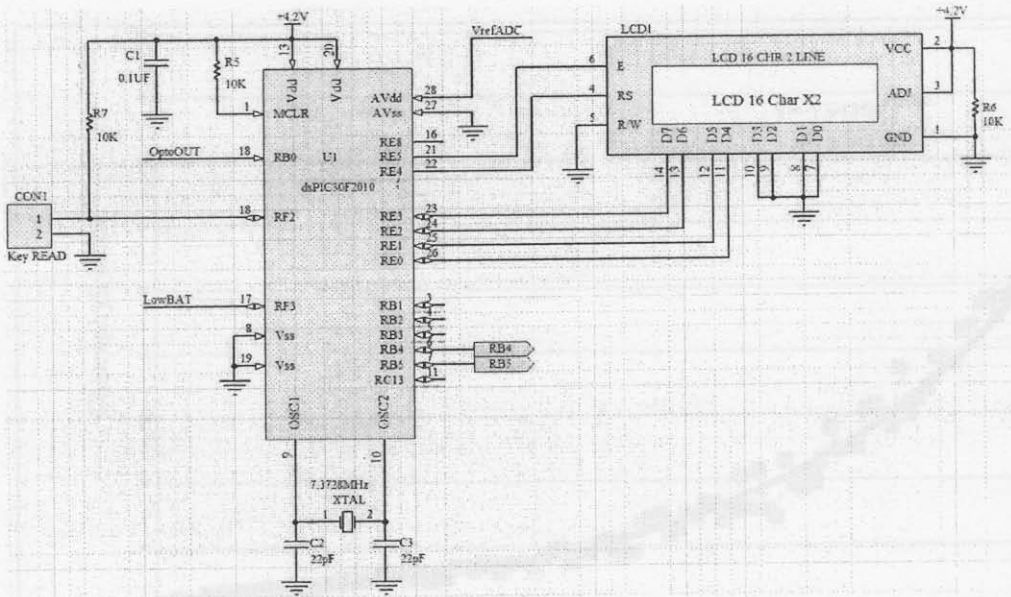
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถ้าเนคสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40MHz
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์นี้
- ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5 กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44 mA ขึ้นอยู่กับไฟเลี้ยงและความเร็วในการทำงาน
- มีขนาดเล็ก ขาดใช้งาน 28 ขา
- มีพอร์ตให้ใช้งานมากถึง 5 พอร์ต รวม 20 ขา

คุณสมบัติในการประมวลผลสัญญาณ

- มีแอกคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว ในไมโครคอนโทรลเลอร์ธรรมดาในการประมวลผลคูณหรือหารจะใช้เทคนิคการวนรอบและการเลื่อนข้อมูลซึ่งจะเสียเวลาในการคำนวณมาก



รูปที่ 26 บล็อกไดอะแกรมของ dsPIC30F2010



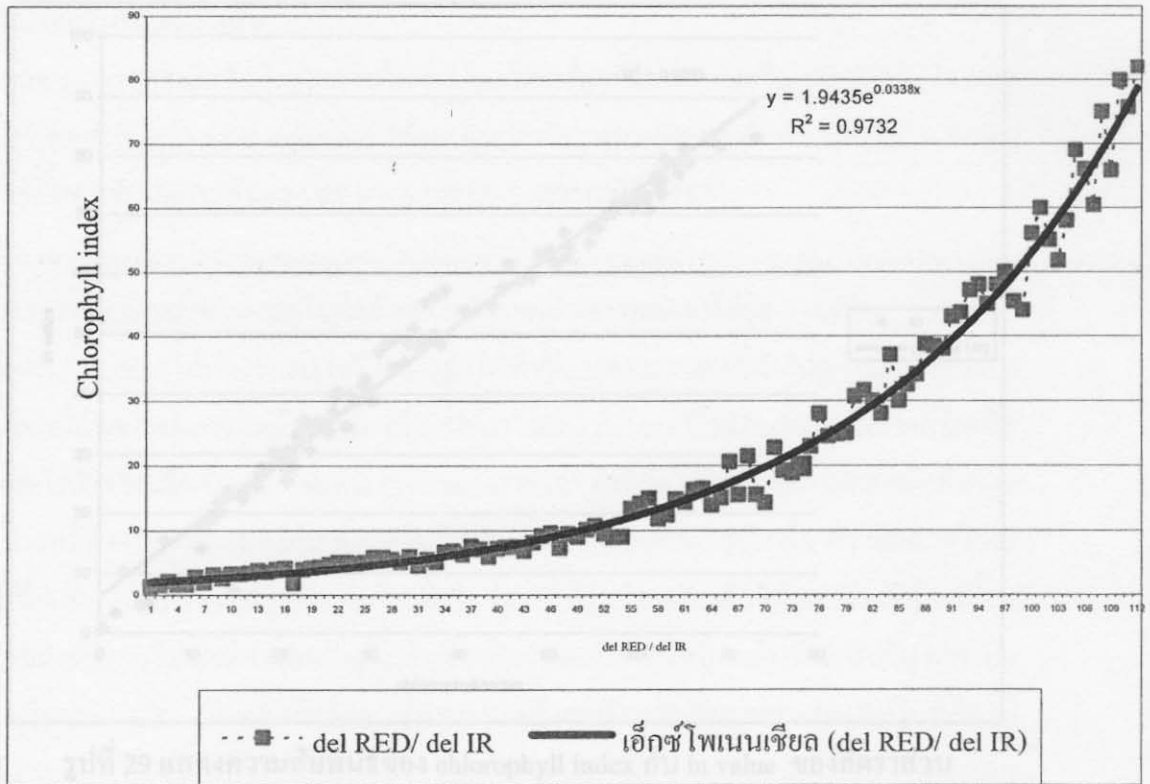
รูปที่ 27 การเชื่อมต่อหน่วยแสดงผลกับ CPU

1.11 ภาคแสดงผล

หน่วยแสดงผลเป็นแบบ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ควบคุมการแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ การที่เลือกใช้หน่วยแสดงผลเป็นแบบ LCD นั้นเนื่องจากว่า ต้องการประหยัดพลังงาน สำหรับการเชื่อมต่อ LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์ มี 2 โหมด คือ โหมด 8 บิตและโหมด 4 บิต เลือกใช้แบบ 4 บิต เพื่อเป็นการประหยัดขาพอร์ตของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ การเชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์จะใช้พอร์ต E (RE0-RE5) มีรายละเอียดดังนี้

- ขา RE0 ต่อกับ D4 ของ โมดูล LCD ขา 11
- ขา RE1 ต่อกับ D5 ของ โมดูล LCD ขา 12
- ขา RE2 ต่อกับ D6 ของ โมดูล LCD ขา 13
- ขา RE3 ต่อกับ D7 ของ โมดูล LCD ขา 14
- ขา RE4 ต่อกับ RS ของ โมดูล LCD ขา 4
- ขา RE5 ต่อกับ ENABLE ของ โมดูล LCD ขา 6

เราจะใช้จอ LCD เป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ในการบอกถึงสถานะการทำงานของเครื่องว่าทำงานถึงช่วงใด เช่น วัตเพื่อเก็บเป็นค่าอ้างอิงขณะไม่มีใบ และวัตขณะมีใบ หรือแสดงผลการผิดพลาด ให้ทำการวัดใหม่อีกครั้ง หรือเตือนว่าแบตเตอรี่ LowBAT แล้ว ให้ทำการเปลี่ยน หรือทำการประจุกระแสใหม่ให้กับแบตเตอรี่



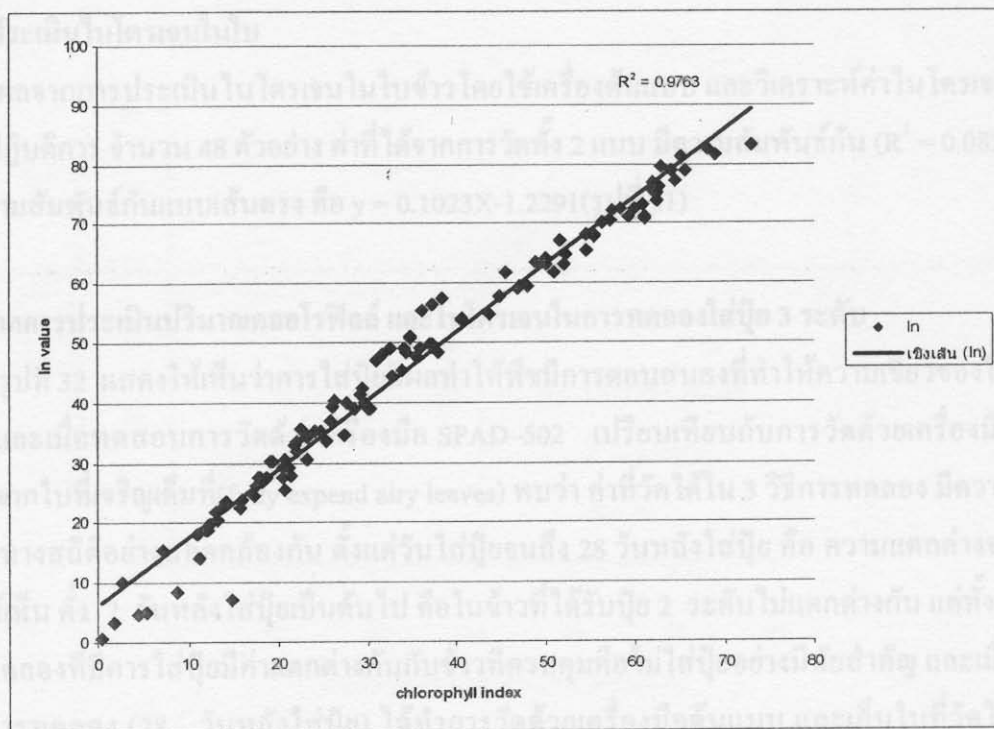
รูปที่ 28 เปรียบเทียบค่า คลอโรฟิลล์อินเด็ก กับสัดส่วนของ $\frac{\Delta R}{\Delta IR}$

จะเห็นว่าที่ค่าคลอโรฟิลล์อินเด็กค่าสูงๆ จะได้ค่าของ $\frac{\Delta R}{\Delta IR}$ สูงตามไปด้วย จากกราฟจะ

เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนที่ได้เมื่อเทียบกับค่าคลอโรฟิลล์อินเด็กแล้ว จะเห็นว่ามีคุณสมบัติเป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งถ้านำค่าที่ได้นี้มาเพื่อเป็นการเปิดตารางเทียบว่าเป็นค่าคลอโรฟิลล์อินเด็กแล้ว จะเปลืองหน่วยความจำสูงมาก จึงทำการแปลงค่าอัตราส่วนนี้เป็นค่า Natural log ของอัตราส่วน $\frac{\Delta R}{\Delta IR}$ ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอโรฟิลล์อินเด็ก กับค่า \ln นี้มีความสัมพันธ์เป็นเชิง

เส้นดังกราฟข้างล่าง

รูปที่ 29 แสดงให้เห็นว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดดินแบบมีความสัมพันธ์กับค่าคลอโรฟิลล์รวมในใบพืชซึ่ง ทำการวิเคราะห์ปริมาณใบจำนวน 60 ใบ พบว่ามีความสัมพันธ์กับ $(R^2 = -0.7813)$ โดยมีสมการสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง คือ $y = -2.2915X - 36.269$



รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ของ chlorophyll index กับ ln value ของอัตราส่วน
del RED/ del IR

จากความสัมพันธ์ที่ได้จะคำนวณหาค่า $\ln\left(\frac{\Delta RED}{\Delta IR}\right)$ แล้วนำค่าที่ได้นี้มาชี้ address ของหน่วยความจำ ซึ่งที่ address นี้จะเก็บค่าของคลอโรฟิลล์อินเด็ก เครื่องต้นแบบที่ได้ทำการ ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 28 และ 29

2. ผลการวัดผลเครื่องต้นแบบกับต้นข้าว

2.1 การประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์

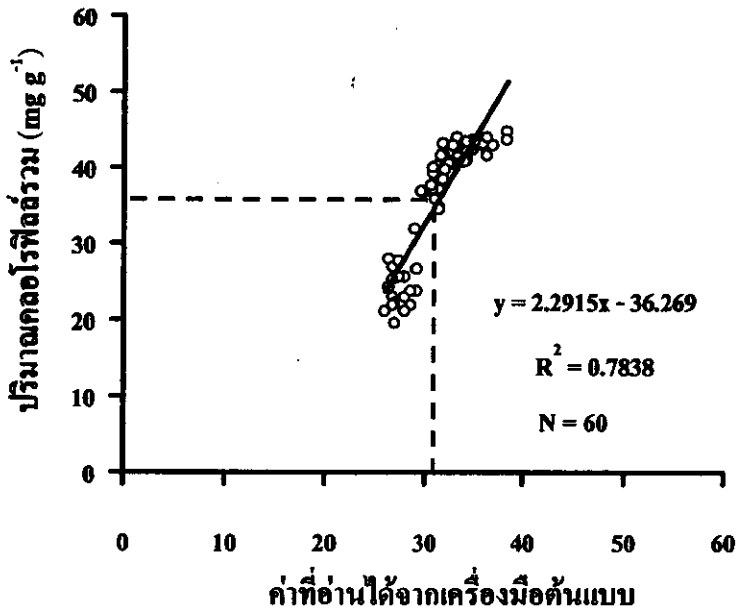
รูปที่ 30 แสดงให้เห็นว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือต้นแบบมีความสัมพันธ์กับค่าคลอโรฟิลล์รวมในใบพืชซึ่ง ทำการวิเคราะห์ที่ใบข้าวจำนวน 60 ใบ พบว่ามีความสัมพันธ์กัน ($R^2 = 0.7838$) โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง คือ $y = 2.2915X - 36.269$

2.2 การประเมินไนโตรเจนในใบ

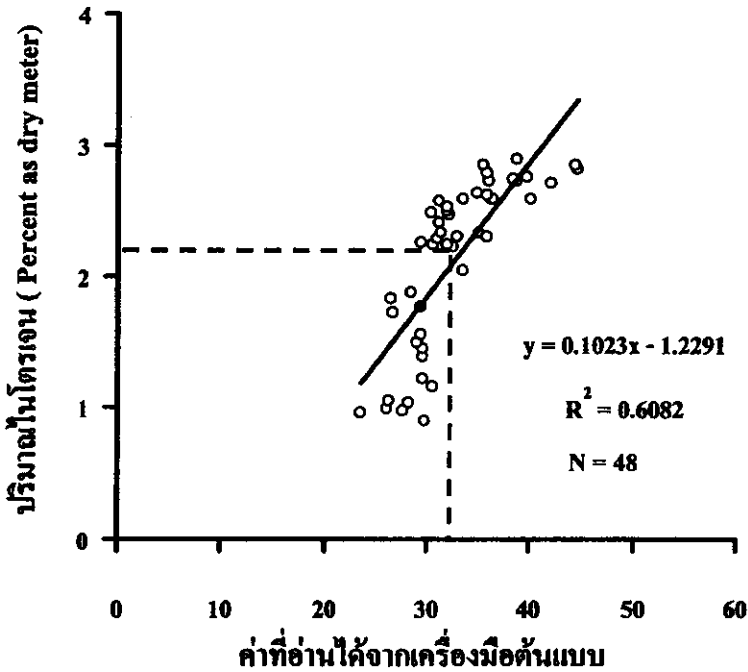
ผลจากการประเมินไนโตรเจนในใบข้าว โดยใช้เครื่องต้นแบบ และวิเคราะห์ค่าไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ จำนวน 48 ตัวอย่าง ค่าที่ได้จากการวัดทั้ง 2 แบบ มีความสัมพันธ์กัน ($R^2 = 0.082$) โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง คือ $y = 0.1023X - 1.2291$ (รูปที่ 31)

2.3 ผลจากการประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์ และไนโตรเจนในการทดลองใส่ปุ๋ย 3 ระดับ

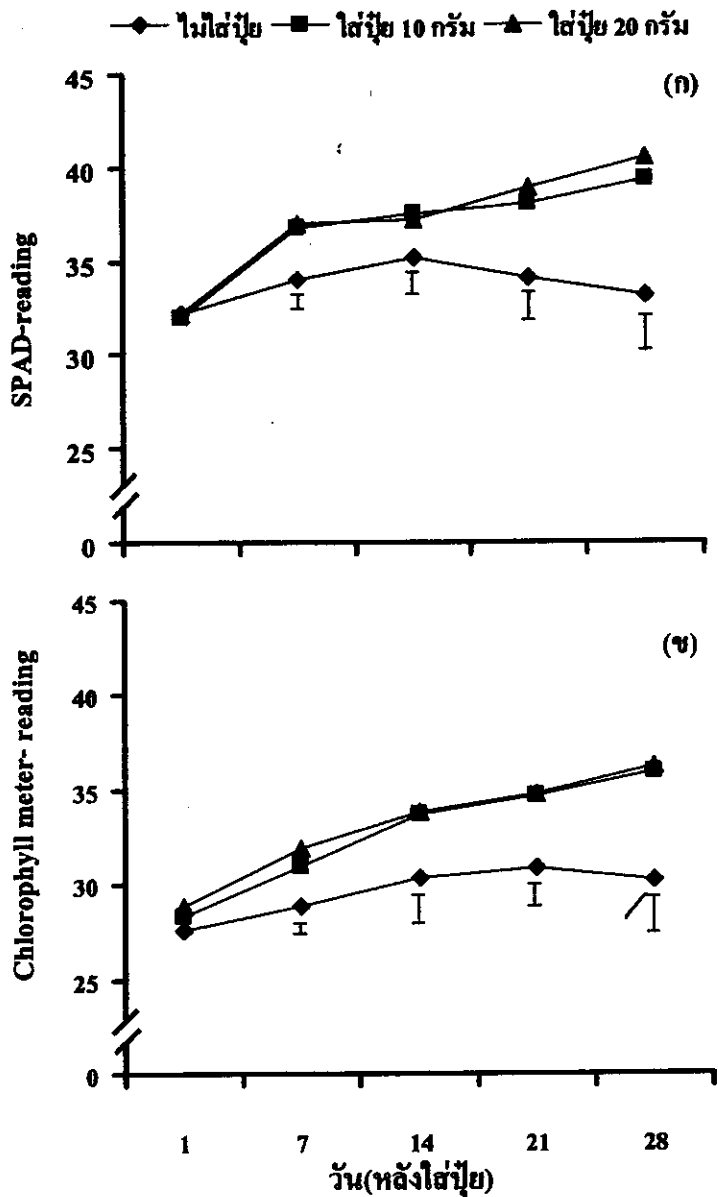
รูปที่ 32 แสดงให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยมีผลทำให้พืชมีการตอบสนองที่ทำให้ความเขียวของใบต่างกัน และเมื่อทดสอบการวัดด้วยเครื่องมือ SPAD-502 เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องมือต้นแบบจากใบที่เจริญเต็มที่ (fully expand airy leaves) พบว่า ค่าที่วัดได้ใน 3 วิธีการทดลอง มีความแตกต่างทางสถิติอย่างสอดคล้องกัน ตั้งแต่วันใส่ปุ๋ยจนถึง 28 วันหลังใส่ปุ๋ย คือ ความแตกต่างจะแสดงให้เห็น ตั้ง 7 วันหลังใส่ปุ๋ยเป็นต้นไป คือในข้าวที่ได้รับปุ๋ย 2 ระดับไม่แตกต่างกัน แต่ทั้ง 2 วิธีการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยมีค่าแตกต่างกันกับข้าวที่ควบคุมคือไม่ใส่ปุ๋ยอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (28 วันหลังใส่ปุ๋ย) ได้ทำการวัดด้วยเครื่องมือต้นแบบ และเก็บใบที่วัดไปวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์รวมและไนโตรเจนในใบ พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกันคือใบของต้นข้าวที่มีการใส่ปุ๋ยทั้ง 2 ระดับ มีค่าคลอโรฟิลล์รวมและไนโตรเจนสูงกว่าค่าที่ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับค่าที่วัดด้วยเครื่องต้นแบบ (รูปที่ 33) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานทดลองของ พรทิพย์และสาขันธ์ (2548) ที่ใช้เครื่องมือ SPAD-502 เพื่อประเมินไนโตรเจน และคลอโรฟิลล์รวมของใบลองกองภายใต้สภาวะเครียดน้ำ ซึ่งทำให้ปุ๋ยได้รับไนโตรเจนแตกต่างกัน ซึ่งผลทำให้ประเมินความแตกต่างของไนโตรเจนและคลอโรฟิลล์ในใบได้ เช่นเดียวกับการทดลองของ Neilsen และคณะ (1995) ที่ทดลองกับแอปเปิลพันธุ์ที่ใช้ปุ๋ยไนโตรเจน 3 ระดับ และประเมินไนโตรเจนในใบ โดยใช้คลอโรฟิลล์มิเตอร์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนมีความสัมพันธ์กับค่าที่อ่านได้จากคลอโรฟิลล์มิเตอร์



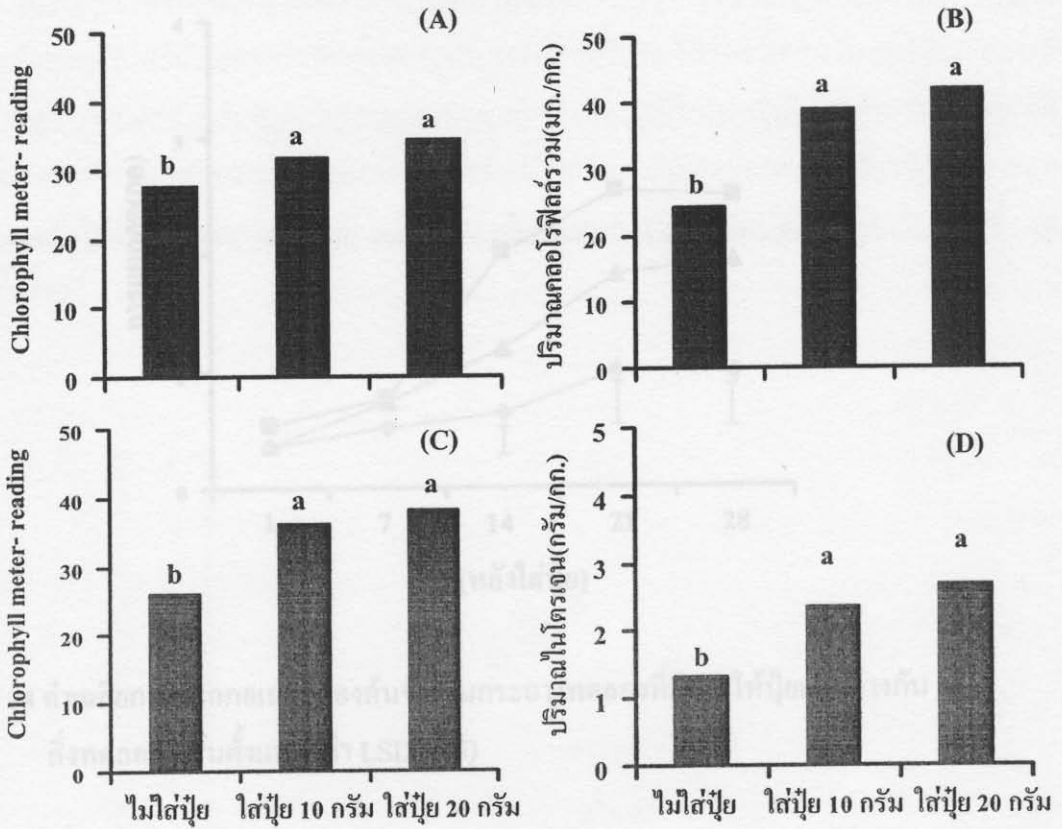
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือต้นแบบกับปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของใบข้าวที่ปลูกในกระถางทดลอง



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือต้นแบบกับปริมาณไนโตรเจนของใบข้าวที่ปลูกในกระถางทดลอง



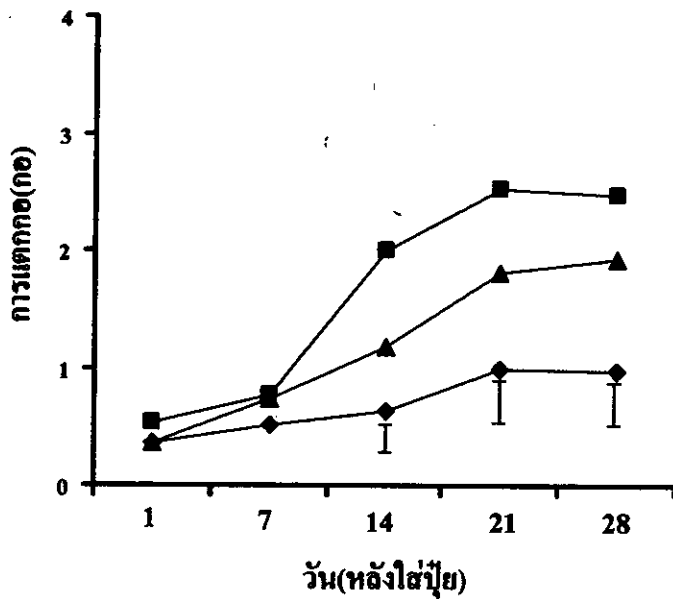
รูปที่ 32 ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง SPAD-502 (ก) และเครื่องต้นแบบ (ข) ที่วัดจากใบของต้นข้าว (จำนวน 60 ใบ) ในกระถางทดลองที่มีการให้ปุ๋ยแตกต่างกัน 3 สิ่งทดลอง ในช่วง 28 วัน หลังใส่ปุ๋ย (เส้นตั้งแสดงค่า LSD 0.05)



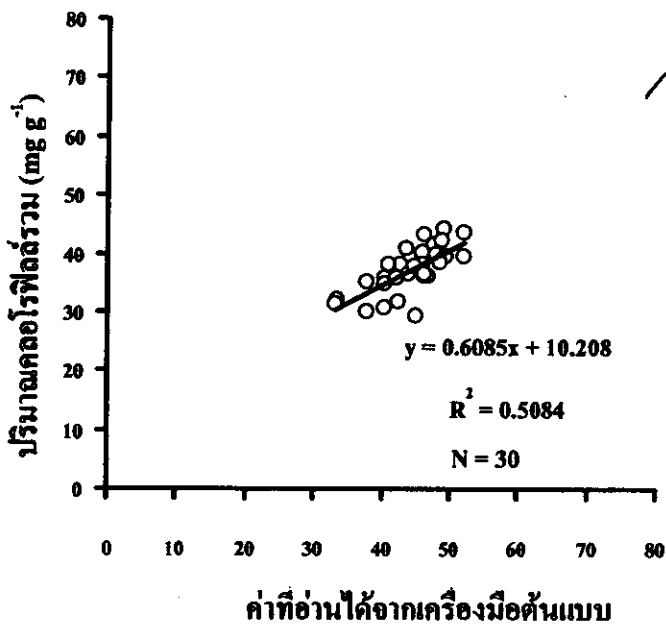
รูปที่ 33 ค่าที่อ่านได้จากคลอโรฟิลล์มิเตอร์ และปริมาณคลอโรฟิลล์รวม (A และ B ตามลำดับ) ค่าที่อ่านได้จากคลอโรฟิลล์ และปริมาณไนโตรเจนจากการวิเคราะห์ (C และ D ตามลำดับ) ของต้นข้าวในกระถางทดลองที่มีการให้ปุ๋ยแตกต่างกัน 3 สิ่งทดลอง อักษรกำกับที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบโดยวิธี LSD

เพื่อการศึกษาการตอบสนองทางการเจริญเติบโตของต้นข้าวด้วยการประเมินการแตกกอพบว่า การใส่ปุ๋ยมีผลต่อการแตกกอของข้าวอย่างชัดเจนคือการใส่ปุ๋ยทำให้ต้นข้าวแตกกอมากขึ้นตามปริมาณปุ๋ยที่ใช้ขณะที่ต้นข้าวที่ไม่ใส่ปุ๋ยมีการแตกกอน้อยกว่า อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่องมือต้นแบบเพื่อประเมินไนโตรเจน และคลอโรฟิลล์ในใบ จะเป็นประโยชน์ต่อการให้ปุ๋ยข้าวเพื่อช่วยให้ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตที่สมบูรณ์ อันจะนำไปสู่การเพิ่มผลผลิตข้าวได้

รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือต้นแบบและปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของใบข้าวในแปลงทดลอง



รูปที่ 34 ค่าเฉลี่ยการแตกกอเฉลี่ยของต้นข้าวในกระถางทดลองที่มีการให้ปุ๋ยแตกต่างกัน 3 สิ่งทดลอง (เส้นตั้งแสดงค่า LSD 0.05)



รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือคั้นแบบและปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของใบข้าวในแปลงทดลอง

สรุป

ผลจากการพัฒนาเครื่องต้นแบบที่พัฒนาด้วยการใช้ LED สองความยาวคลื่น คือแสงสีแดงที่ 660 nm และแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 940 nm แสงทั้งสองความยาวคลื่นถูกดูดกลืนตามปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบพืช ปริมาณแสงที่ผ่านใบถูกวัดและแปลงเป็นไฟฟ้าด้วย Photodiode สัญญาไฟฟ้าจะถูกคำนวณ และแปรผลเป็นค่า แสดงผลบน LCD เมื่อเปรียบเทียบการวัดกับเครื่องมือทางการค้า (SPAD-502) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำไปทดสอบการวัดกับใบข้าวในสภาพเรือนกระจกพบว่ามีค่าต่างกัน 12% ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือต้นแบบมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง กับปริมาณคลอโรฟิลล์และไนโตรเจนในข้าว ทั้งในสภาพเรือนกระจกและในนาข้าว แต่พบว่าความแม่นยำในสภาพกลางแจ้งลดลง ดังนั้นจึงแนะนำว่าควรมีการปกปิดส่วนของหัววัดเพื่อลดการรบกวนของแสงจากภายนอก