

ระบบตรวจวัดสีเพื่อใช้ในการคัดแยกมะเขือเทศ  
OPTICAL SENSOR FOR INSPECT THE TOMATO'S COLOR



ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2536

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง

ระบบตรวจวัดสีเพื่อใช้ในการคัดแยกมะเขือเทศ

OPTICAL SENSOR FOR INSPECT THE TOMATO'S COLOR

ผู้จัดทำ

นาย กรกฎ อินทาทัด

33100006

นาย ประวิทย์ อิ่มพรบุรี

33100205

ดร. วันชัย ธีรารุจา

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจวัดสีเพื่อใช้ในการคัดแยกมะเขือเทศ

OPTICAL SENSOR FOR INSPECT THE TOMATO'S COLOR

|                  |              |           |
|------------------|--------------|-----------|
| โดย              | นาย กรกฏ     | อินทรทัต  |
|                  | นาย ประวิทย์ | อัมพรรุจี |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร. วันชัย   | วีรจุจา   |

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เรียบเรียงขึ้นจากผลงานการออกแบบ, จัดทำระบบตรวจวัด และ คัดแยกสีของมะเขือเทศ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงเป็นหลักในการออกแบบ โดยเน้นให้สามารถปฏิบัติงานได้ดี และต้นทุนในการสร้างต่ำ

ระบบตรวจวัดสีสามารถที่จะใช้ในการคัดแยกสีของมะเขือเทศที่มีสีต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งเราสามารถกำหนดมาตรฐานที่เราต้องการได้ สำหรับส่วนประกอบของระบบเพื่อใช้ในการคัดแยกสีของมะเขือเทศประกอบด้วย วงจรตรวจวัดสี วงจรเปรียบเทียบสี วงจรตรวจจับตำแหน่งของมะเขือเทศ และ วงจรประมวลผล ในการตรวจวัดสีนี้จะใช้คุณสมบัติการสะท้อนของแสง ซึ่งจะตรวจวัดแสงที่สะท้อนออกมาจากมะเขือเทศว่า ตรงตามมาตรฐานที่ตั้งไว้หรือไม่โดยใช่วงจรเปรียบเทียบสี และจะนำค่าที่ได้มาพร้อมกับสัญญาณจากวงจรตรวจจับตำแหน่งของมะเขือเทศ เพื่อผ่านวงจรประมวลผลให้ได้สัญญาณที่จะนำไปประกอบกับเครื่องคัดแยกมะเขือเทศต่อไป

ABSTRACT

THIS PROJECT IS MADE UP FOR THE TOMATO-SHADE INSPECTION WITH OPTICAL SENSOR. IT CAN OPERATE WELL AND FIXED COST IS LOW PRICE.

THE SHADE-INSPECTED SYSTEM CAN TEST THE COLOR THAT LOWER THAN THE STANDARD AND IT CAN FIX THE SPECIFIC STANDARD BY YOURSELF. THE SHADE INSPECTION USES THE REFLECTION'S QUALITY. IT CAN INSPECT THE BEAM THAT REFLECTS FROM TOMATO'S SKIN. THE REFLECTED BEAM CAN BE CHECKED THE STANDARD BY THE SHADE-COMPARATOR CIRCUIT. THE OUTPUT SIGNAL OF THIS CIRCUIT CAN CONCLUDE WITH SIGNAL FROM THE POSITION-CHECKED CIRCUIT AND THIS BOTH SIGNAL ARE TAKEN TO THE COMPILED CIRCUIT THAT GIVE THE OUTPUT SIGNAL TO COMPOSE WITH THE TOMATO-SEPARATED MACHINE.

เอเจนซี่ที่มีชื่อเสียงที่ให้บริการนั้น มีทั้งบริการที่ปรึกษาและดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กติการมประกาศ

โครงการนี้จะไม่สามารถดำเนินงานให้สำเร็จลงได้ ถ้าปราศจากความอุปการะและความร่วมมือจากบุคคลต่อไปนี้

ดร.วันชัย ธีรรัฐฯ ผู้ให้คำปรึกษา ให้แนวทางในการแก้ปัญหา รวมถึงคอยดูแลเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

อ.ปรเมษฐ์ ผู้คอยดูแล ติดตาม สอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการอย่างสม่ำเสมอ

พี.เกษมจิตต์ ผู้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการดำเนินงานอย่างดียิ่ง

หงษ์, สัน, ปิง เพื่อนผู้คอยให้ความเป็นห่วง และร่วมปฏิบัติงานในสามค่าคืน

รวมทั้งขอขอบคุณในคำแนะนำต่างๆ จากคณาจารย์ และเพื่อนๆในภาคทุกคน.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 1 บทนำ                                  | 1    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ                       | 3    |
| - แสง   | 3    |
| - อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง                | 5    |
| - คุณสมบัติทางลักษณะปรากฏ                     | 19   |
| บทที่ 3 การดำเนินงาน                          | 25   |
| - หลักการเบื้องต้น                            | 25   |
| - การทดลองในสภาวะแสงต่างๆ                     | 26   |
| บทที่ 4 วงจรและหลักการทำงาน                   | 41   |
| - วงจร WINDOW COMPARATOR                      | 43   |
| - วงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR สี                  | 45   |
| - วงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR ตำแหน่งของมะเขือเทศ | 47   |
| - TIMING DIAGRAM                              | 49   |
| - วงจรรวมของระบบคิดแยก                        | 52   |
| บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์                      | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า   | 4    |
| รูปที่ 2 แสดงแสงที่ตาคนมองเห็นและมองไม่เห็น  | 4    |
| รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างกับระยะทาง  | 5    |
| รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของ Phototube  | 6    |
| รูปที่ 5 แสดงวงจรขณะใช้งานของหลอด Phototube  | 6    |
| รูปที่ 6 แสดงลักษณะของหลอด Phhototube แบบสุญญากาศ  | 7    |
| รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทั่วไปของหลอด Photomultiplier  | 8    |
| รูปที่ 8 แสดงการดูดกลืนแสงขนาดต่างๆของสารกึ่งตัวนำ   | 9    |
| รูปที่ 9 แสดงถึง Photocurrent ที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน   | 10   |
| รูปที่ 10 แสดงถึงการกระตุ้นอิเล็กตรอนในลักษณะต่างๆ   | 11   |
| รูปที่ 11 แสดงวงจรการใช้งานของ Photoconductive cell  | 12   |
| รูปที่ 12 แสดงตัววัดแสง CdS แบบพลิกเดี่ยว  | 13   |
| รูปที่ 13 แสดงตัววัดแสง CdS แบบฟิล์มบาง  | 13   |
| รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบพี                   | 15   |
| รูปที่ 15 แสดงโครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น                 | 16   |
| รูปที่ 16 แสดงโครงสร้างตัววัดแสงเซเลเนียม  | 16   |
| รูปที่ 17 แสดงผลตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงของสารกึ่งตัวนำเทียบกับความรู้สึกของตามนุษย์              | 16   |
| รูปที่ 18 แสดงลักษณะกระแส-ความเข้มแสงของตัววัดแสงเซเลเนียมเมื่อเทียบกับความต้านทานโหลดค่าต่างๆ | 17   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| รูปที่ 19 | แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยอลูมิเนียมและซิลิคอนแบบเอ็น                     | 18 |
| รูปที่ 20 | แสดงเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยอลูมิเนียมและซิลิคอนแบบเอ็น | 18 |
| รูปที่ 21 | แสดงโครงสร้างของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์  | 19 |
| รูปที่ 22 | แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น  | 19 |
| รูปที่ 23 | แสดงการกระจายของแสงเมื่อส่องผ่านวัสดุอาหาร  | 22 |
| รูปที่ 24 | แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง และการตรวจวัดการสะท้อนแสง                      | 23 |
| รูปที่ 25 | แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง และการตรวจวัดการส่องผ่านตลอด                   | 24 |
| รูปที่ 26 | แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง และการตรวจวัดการส่องผ่านบางส่วน                | 24 |
| รูปที่ 27 | แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองเบื้องต้น   | 25 |
| รูปที่ 28 | แสดงการทดลองในสภาวะแสงต่างๆ   | 26 |
| รูปที่ 29 | แสดงวงจรของ LDR ที่ใช้ในการทดสอบสภาวะแสง  | 27 |
| รูปที่ 30 | แสดงวงจรที่ใช้ในการแยกแยะสี   | 39 |
| รูปที่ 31 | แสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบคัดแยกสีมะเขือเทศ                                       | 42 |
| รูปที่ 32 | แสดงวงจร WINDOW COMPARATOR  | 44 |
| รูปที่ 33 | แสดงวงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR สี  | 46 |
| รูปที่ 34 | แสดงวงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR ตำแหน่งของมะเขือเทศ   | 48 |
| รูปที่ 35 | แสดง TIMING DIAGRAM ของสัญญาณ   | 50 |
| รูปที่ 36 | แสดงวงจรรวมในการคัดแยก  | 51 |
| รูปที่ 37 | แสดงระดับสัญญาณเมื่อสีที่ตรวจสอบต่างจากสีมาตรฐานมากๆ                                    | 55 |
| รูปที่ 38 | แสดงระดับสัญญาณเมื่อสีที่ตรวจสอบใกล้เคียงกับสีมาตรฐาน                                   | 55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันคุณภาพ และ ความเร็วของการผลิตสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสิ่งจำเป็นและต้องการของผู้ผลิต ดังนั้นจึงมีการนำเครื่องมือที่ทันสมัยมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นแต่เครื่องมือต่างๆมักต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศซึ่งจะมีราคาแพงและอาจไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ

จากการนำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่งผลให้การผลิตสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและเที่ยงตรงยิ่งขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเป็นมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงก็นับเป็นอุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

ลักษณะการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงมีดังนี้

1. การควบคุมระดับ
2. การนับด้วยความเร็วสูง
3. การคัดเลือกและแบ่งชนิด
4. การตรวจสอบขนาด
5. การตรวจสอบอัตโนมัติ
6. การตัดขาดของระบบสายพาน
7. การป้องกันอันตรายในการใช้เครื่อง
8. การจัดกลุ่มหรือกองโดยอัตโนมัติ
9. การวัด

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปัจจุบันมีการคิดค้นมาหลายชนิดเพื่อตอบสนองความต้องการ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าศึกษาว่าเราจะนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงนี้ มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารการคัดแยกผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อใช้ในการผลิตอาหาร ซึ่งใช้สีของผลิตภัณฑ์เป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์ในการคัดแยก เช่น การผลิตข้อสมมะเขือเทศ การคัดแยกมะเขือเทศที่จะใช้ในกระบวนการผลิต โดยใช้คนเป็นผู้คัดแยก จะทำให้การคัดแยกเป็นมาตรฐานเดียวกันได้ยาก เนื่องจากการมองเห็นสีของมนุษย์มีขอบเขตจำกัด อีกทั้งจะต้องใช้คนเป็นจำนวนมากและแรงงานต้องมีความชำนาญเป็นพิเศษ นอกจากนี้ความเหนื่อยล้าอาจทำให้ผิดพลาดได้ และยังอาจเกิดความล่าช้าในการคัดแยกอีกด้วย ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงควรมีเครื่องคัดแยกสีของวัตถุดิบทางการเกษตร เพื่อการคัดที่มีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ โดยการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงมาประยุกต์ใช้ ทั้งนี้ยังช่วยให้การผลิตทางอุตสาหกรรมเกษตร และ อาหารเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมาตรฐาน

วัตถุประสงค์การดำเนินงาน

- สร้างและออกแบบระบบ SENSOR เพื่อคัดแยกสีของมะเขือเทศโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### แสง(LIGHT)

แสงเป็นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ฉะนั้น คำว่าแสงในที่นี้จึงมิได้หมายถึงแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าเท่านั้น อาจหมายถึงคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ใด ๆ ก็ได้ เช่น แสงอินฟราเรด อุลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ ฯลฯ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมทั้งหมด ดังรูป ที่ 1 จะเห็นว่าช่วงความถี่ของแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า นั้นแคบมากเมื่อเทียบกับช่วงสเปกตรัมทั้งหมด ฉะนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะกล่าวต่อไป อาจจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่ใช้งานกับแสงที่ตามนุษย์มองไม่เห็นก็ได้

แสงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

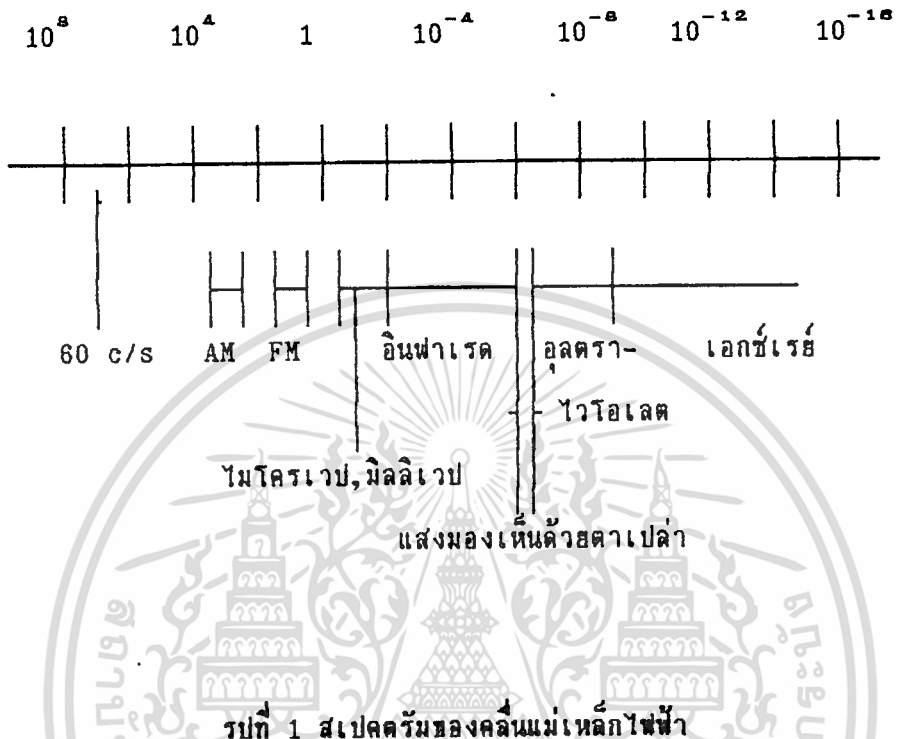
1. แสงที่ตาคนมองเห็น (Visible Light)
2. แสงที่ตาคนมองไม่เห็น (Invisible Light)

แสงที่ตาคนมองเห็นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  เมตรคือสีทั้ง 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง

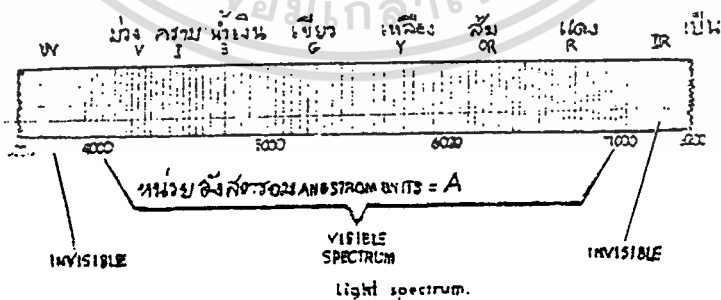
แสงที่ตาคนมองไม่เห็นคือ แสงอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าคลื่นสีม่วงและแสงอินฟราเรด (Infrared) เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าคลื่นสีแดง ดูจากรูป ที่ 2

สำหรับความสว่างของแสง จะขึ้นอยู่กับความห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงและฉาก โดยจะเป็นส่วนกลับกำลังสองของความห่าง(ระยะทาง) ดังแสดงดังรูปที่ 3

(ขนาดคลื่น หน่วยเป็น เมตร)

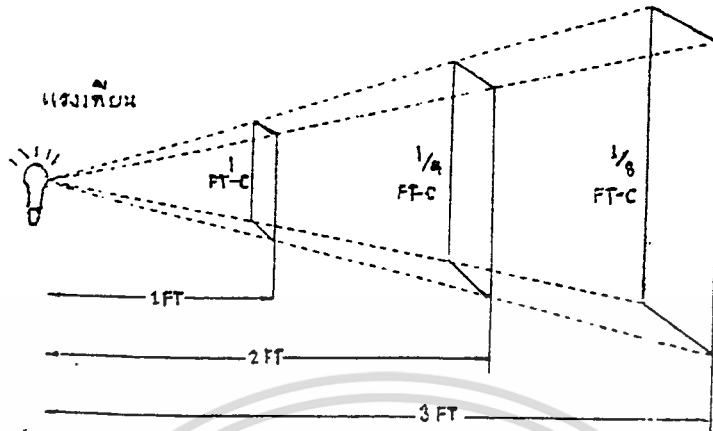


รูปที่ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2 แสดงแสงที่ตาคนมองเห็นและมองไม่เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างกับระยะทาง

### อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (Photoelectronic Devices)

หลักการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงเป็นดังนี้ คือ เมื่อฉายแสงตกกระทบสสารพลังงาน และโมเมนตัมของแสงจะกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นในเนื้อสาร หรือ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระจากสสารนั้นได้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงนั้นพอจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. โฟโตอิมิสซีฟ (Photoemissive)
2. โฟโตคอนดักตีฟ (Photoconductive)
3. โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic)

#### 1.1 โฟโตอิมิสซีฟ (Photoemissive)

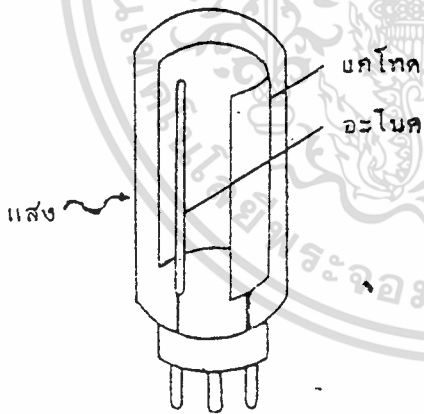
เป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระจากผิวโลหะ และการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นในเนื้อสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ตัวอย่างของโฟโตอิมิสซีฟ ได้แก่

1. หลอด Phototube
2. หลอด Photomultiplier

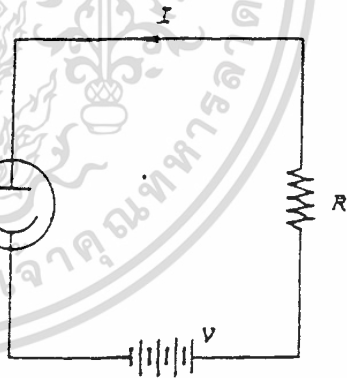
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หลอด Phototube

การทำงานของหลอดสามารถอธิบายได้ด้วย ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Photoemissive effect โครงสร้างของหลอดแสดงดังรูปที่ 4 คือเป็นหลอดรูปทรงกระบอกกลาส มีขั้วแคโทดเป็นรูปทรงกระบอกผ่าครึ่งและขั้วแอโนดเป็นรูปทรงเข็ม ภายในหลอดเป็นสภาพสุญญากาศ ขณะที่นำไปใช้งานจะต่อกับวงจรกับแหล่งกำเนิดไฟกระแสตรงและโหลด ดังรูปที่ 5 โฟโตอิเล็กตรอนจะกระเด็นหลุดออกจากขั้วแคโทดเมื่อมีแสงฉายตกกระทบ และอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด ซึ่งมีศักดาเป็นบวก จึงเกิดกระแสไหลในวงจร กระแสที่ไหลนี้เรียกว่า Photocurrent ซึ่งเป็นปริมาณที่แปรผันตามความเข้มของแสง หรือจำนวนโฟตรอนที่ตกกระทบหลอด Phototube จึงมีประโยชน์ใช้เป็นตัววัดแสงได้ ตัวอย่างลักษณะสมบัติของหลอด Phototube เห็นแสดงไว้ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสที่ขั้วแอโนด โดยมีความเข้มของแสงเป็นพารามิเตอร์ หลอด Phototube นี้ให้ค่า Photocurrent ที่ต่ำมาก (มีหน่วยเป็นไมโครแอมป์) จึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าทางแสงชนิดอื่น ๆ

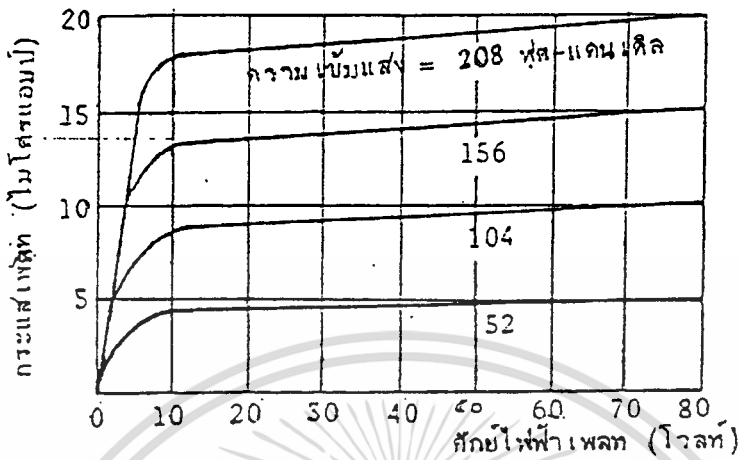


รูปที่ 4 โครงสร้าง Phototube



รูปที่ 5 วงจรขณะใช้งานของหลอด Phototube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

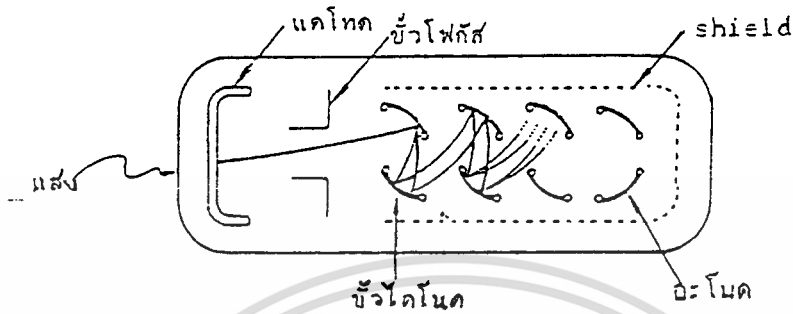


รูปที่ 6 ลักษณะของหลอด Phototube แบบสุญญากาศ

หลอด Photomultiplier

เนื่องจากกระแสที่ไหลในหลอด Phototube มีค่าน้อยมาก จึงไม่สะดวกแก่การใช้ งานเป็นตัววัดปริมาณแสงเท่าใดนัก การเพิ่มกระแสให้มีความสูงขึ้นนั้นทำได้โดย การเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งจากขั้วแคโทด ไปยัง ขั้วแอโนด หลอด Photo-multiplier สามารถทำหน้าที่สนองความ ต้องการดังกล่าวนี้ได้ กล่าว คือ สามารถเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ของ secondary electron emission ภายในหลอด Photomultiplier จะมีขั้วโลหะเพิ่มเติมอีกหลาย ขั้ว เรียกว่า dynodes เพื่อทำหน้าที่สร้าง Secondary electron ดังโครงสร้างที่แสดงไว้ในรูป ที่ 7 เมื่อแสงตกกระทบบนขั้วแคโทดจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนขึ้น อิเล็กตรอนนี้เรียกว่า Primary electron อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกโฟกัสเพื่อให้มีทิศทางที่แน่นอน และวิ่งเข้าชนขั้ว dynodes เพื่อผลิต Secondary electron อีกหลายตัว อิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้จะทำหน้าที่เป็น Primary electron เพื่อสร้างอิเล็กตรอนใหม่จากขั้ว dynodes อันต่อไป ผลสุดท้ายจะได้อิเล็กตรอน จำนวนมากพอ ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรเป็นปริมาณมาก สะดวกแก่การวัด หลอด Photomultiplier จึงเหมาะแก่การใช้งานวัดในปริมาณแสงมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 โครงสร้างทั่วไปของหลอด Photomultiplier

2.1 โฟโตคอนดักตีฟ (Photoconductive)

เป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ที่เกิดจากการที่สภาพการนำไฟฟ้าของชั้นสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงฉายตกกระทบ เรียกว่า Photoconductive ขนาดของการเปลี่ยนแปลงไปที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความเข้มแสง ฉะนั้นเราจึงสามารถ ประยุกต์ใช้เป็นตัววัดความเข้มของแสงได้

เมื่อฉายแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำนั้น ถ้าพลังงานของโฟตรอนมีขนาดเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นแล้ว ( $h\nu > E_g$ ) จะเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำจึงสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นมาใหม่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮล นี้จะเท่ากับจำนวนโฟตรอนที่ฉายเข้าไป และเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำไฟฟ้าไปตามสูตร

$$\Delta = (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

ซึ่ง  $n, p$  เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่เปลี่ยนแปลงไป

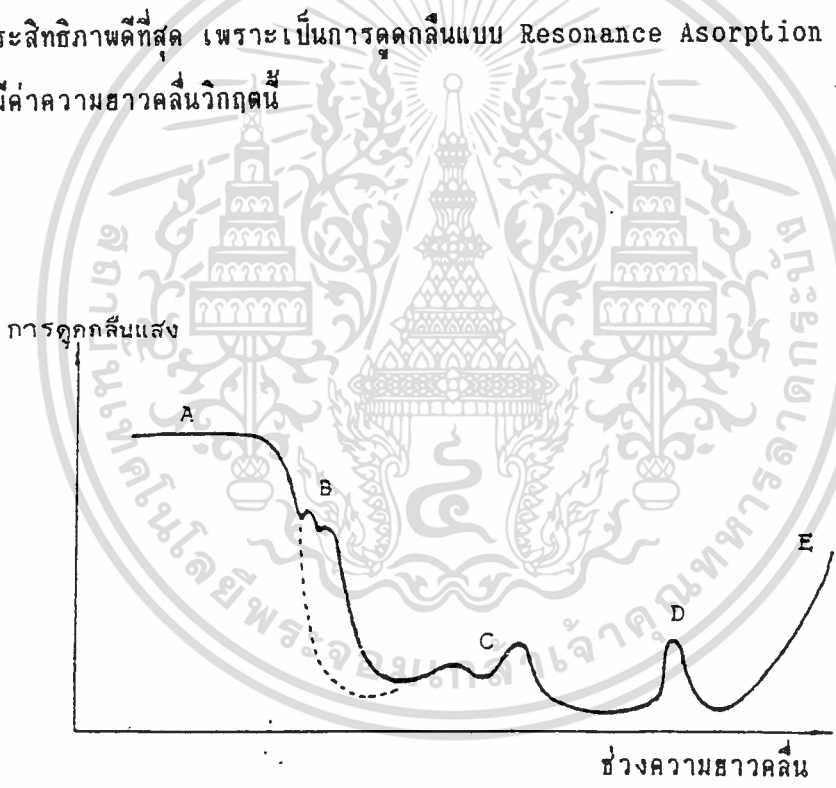
$\mu_n, \mu_p$  เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



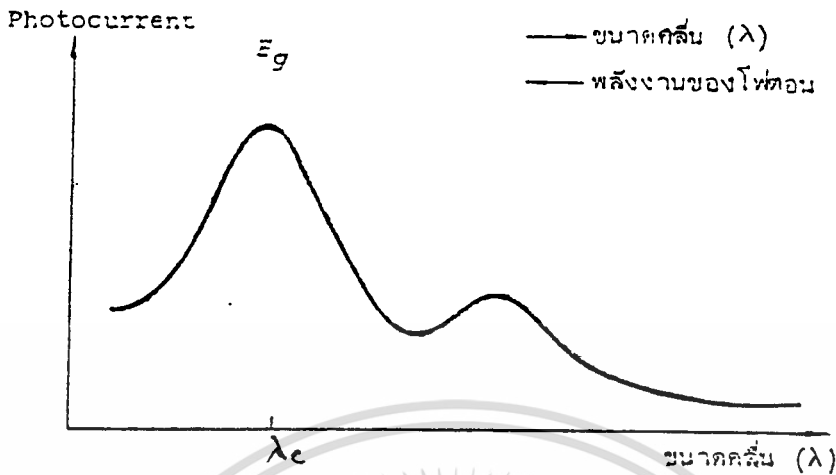
การสร้างพาหะนำไฟฟ้าชนิดใหม่ด้วยพลังงานโฟตรอนนี้ ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำดีขึ้น หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Photoconduction ขึ้น เพื่อทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ให้ดีขึ้น เรามาพิจารณาการดูดกลืนแสงที่มีขนาดความยาวคลื่นต่าง ๆ ในสารกึ่งตัวนำ พร้อมทั้งดู Photocurrent ที่เกิดขึ้นด้วย ดังมีผลแสดงในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9

เมื่อแสงมีพลังงานโฟตรอนมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำการดูดกลืนแสงจะเป็นแบบ Band-to-Band Absorption กล่าวคือ เป็นการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำนั่นเอง จึงเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า Intrinsic Excitation เมื่อแสงมีขนาดคลื่นยาวถึงค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความยาวคลื่นวิกฤต ( $\lambda_c$ ) พลังงานของโฟตรอนจะมีขนาดเท่ากับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำพอดี การดูดกลืนพลังงานโฟตรอนเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด เพราะเป็นการดูดกลืนแบบ Resonance Absorption ฉะนั้น Photocurrent จะมีค่าความยาวคลื่นวิกฤตนี้



รูปที่ 8 แสดงถึงการดูดกลืนแสงขนาดต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงถึง Photocurrent ที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน

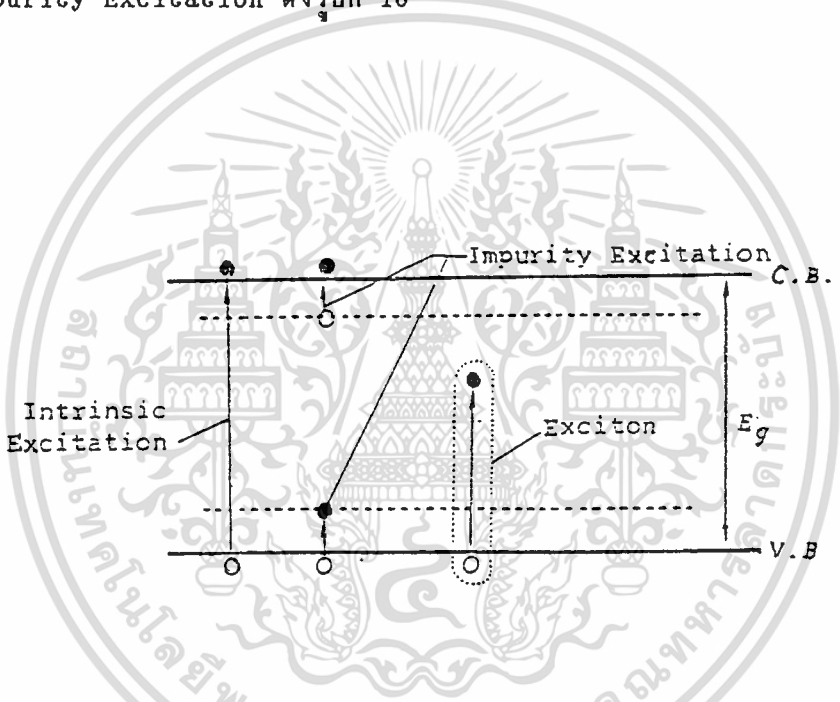
แสงที่มีขนาดคลื่นสั้นกว่า  $\lambda_c$  หมายถึงโฟตรอนที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จึงมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้เสมอ ในช่วงขนาดคลื่นสั้นกว่า  $\lambda_c$  นี้ค่าการดูดกลืนแสงจะสูง ดังแสดงเช่นส่วน A ในรูปที่ 8 แต่เมื่อขนาดคลื่นของแสงยาวกว่า  $\lambda_c$  โฟตรอนจะมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด Band-to-Band Absorption ได้ การดูดแสงในช่วงนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เราจึงเรียกชื่อ  $\lambda_c$  ว่าเป็น Absorption edge ของสารกึ่งตัวนำนั้น และ Photocurrent ก็จะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน

เมื่อพลังงานโฟตรอนมีค่าน้อยกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือใช้แสงที่มีขนาดคลื่นยาวกว่า  $\lambda_c$  นั้น การดูดกลืนแสงจะลดน้อยลง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า จะไม่สามารถสร้างให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ได้ การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์อาจเกิดขึ้นได้ แต่คู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะไม่แยกจากกันเป็นอิสระ จะเคลื่อนไหวอยู่ในพริกเป็นคู่ ๆ โดยยึดเหนี่ยวกันไว้ด้วยแรงคูลอมบ์ คู่อิเล็กตรอนในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เอ็กซิตอน(Exciton) เนื่องจากเอ็กซิตอนมีค่าประจุทางไฟฟ้าเป็นกลาง จึงไม่มีอิทธิพลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแต่อย่างใด จนกว่าจะไปชนกับอะตอมของสารเจือปน หรือ จุดบกพร่องทางผลึกอื่น ๆ แล้วเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จึงจะมีผลทางไฟฟ้าเกิดขึ้น การดูดกลืนแสงในช่วงนี้แสดงดังส่วน B ของ รูปที่ 8 (ส่วนเส้นประนั้นหมายถึง กรณีที่ไม่มีกรกระตุ้นให้เกิดเอ็กซิตอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน เมื่อขนาดคลื่นของแสงยาวขึ้นไปอีก พลังงานโฟตรอนจะน้อยลงจนพอดีที่จะกระตุ้นค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจากชั้นสารเจือปนที่เป็นโดเนอร์ (donor) ขึ้นไปสู่แถบความนำหรือกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่ชั้นเจือปนที่เป็นแอคเซปเตอร์ (acceptor) ได้เป็นผลให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าขึ้นภายในผลึกสารกึ่งตัวนำแบบมีสารเจือปนเดิมอยู่ การดูดกลืนแสงในลักษณะนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 8 ที่เป็นส่วน c และเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำได้ เป็นผลให้เกิด Photocurrent ขึ้นดังรูปที่ 9

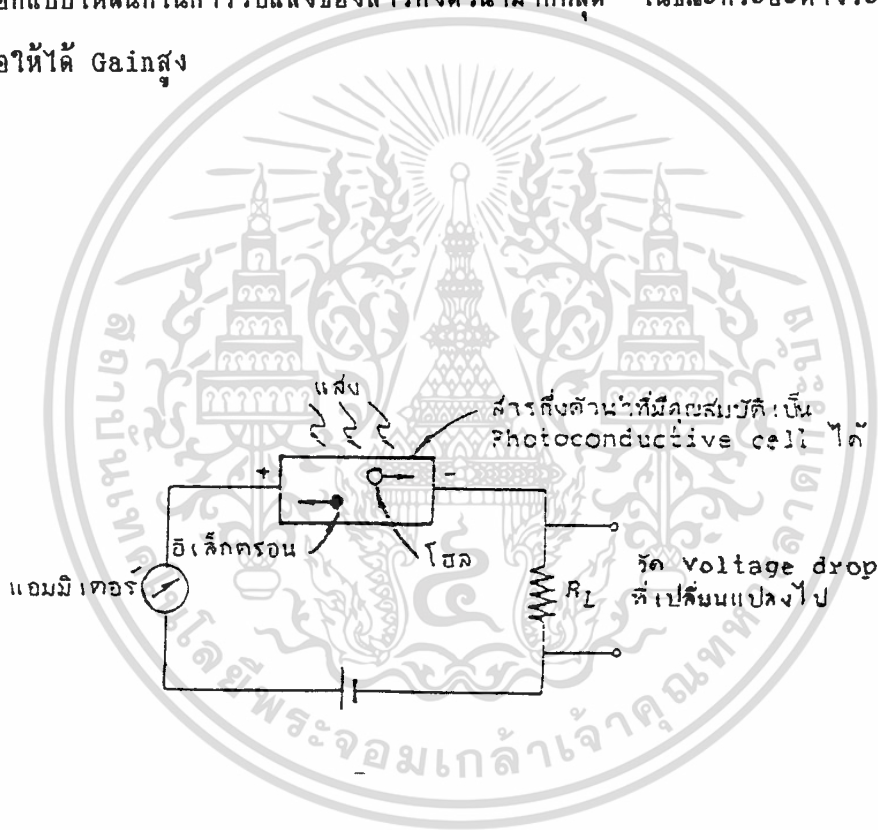
การดูดกลืนแสง ทั้งสามลักษณะที่กล่าวมาแล้ว จะมีผลให้เกิด Photoconductivity ได้ 2 ลักษณะ คือแบบ Intrinsic Excitation (หรือ Band-to-Band Absorption) และแบบ Impurity Excitation ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงถึงการกระตุ้นอิเล็กตรอนในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ Intrinsic Excitation Impurity Excitation และการเกิด Exciton

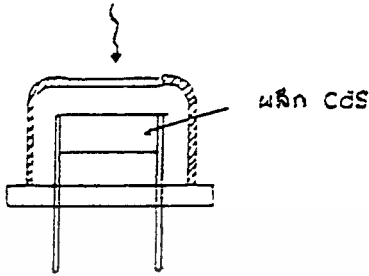
ตัวอย่างการใช้งานแบบ Intrinsic Excitation ได้แก่ Photoconductive Cell ที่ทำจาก CdS (Cadmium Sulfide) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบกลุ่ม II-VI ที่มีแถบพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานของแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ( $E_g = 2.42 \text{ eV}$ ) จึงมีความรู้สึกในการรับแสงได้ดี เช่นเดียวกับตามนุษย์ คือ มีความรู้สึกดีที่สอดคล้องกับขนาดคลื่นประมาณ 500 อังสตรอม จึงถูกนำมาใช้เป็นตัววัดแสงในกล้องถ่ายรูปอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ส่วนตัวอย่างของ Photoconductive แบบ Impurity Excitation ก็ได้แก่ ตัววัดแสงอินฟราเรดที่ทำจากสาร GaAs ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจอร์เมเนียมที่มีทอง หรือทองแดงเป็นสารเจือปน อุณหภูมิการทำงานของตัววัสดุแสงที่อาศัยการกระตุ้นพาหะนำไฟฟ้าจากชั้นพลังงาน สารเจือปนนี้จะต้องต่ำมาก ๆ เพื่อป้องกันมิให้อะตอมของสารเจือปนนั้นแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากพลังงานความร้อน เช่น ตัววัสดุแสง Au doped Ge จะต้องใช้งานที่อุณหภูมิมีเงื่อนไขแสดงดังรูป ที่ 11 คือ ต้องมีการไบอัสขึ้นสารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้เกิด Photocurrent โทลในวงจรได้ ความเข้มของแสงจะแสดงให้เห็นปรากฏในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานโหลด รูปที่ 12 และรูปที่ 13 เป็นตัวอย่างของการวัสดุแสงที่ทำจาก Cds ที่เป็นแบบผลึกเดี่ยว และแบบฟิล์มบาง ตามลำดับ แต่แบบหลังมีการใช้งานกันอยู่ทั่วไป เพราะมีราคาถูกกว่า และมีการออกแบบให้พื้นที่ในการรับแสงของสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะแคบที่สุดเพื่อให้ได้ Gain สูง

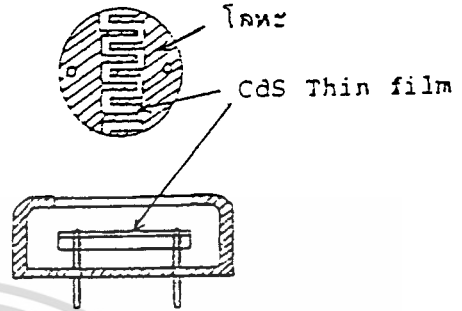


รูปที่ 11 วงจรการใช้งานของ Photoconductive cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 ตัววัดแสง CdS แบบผลึกเดี่ยว



รูปที่ 13 ตัววัดแสง CdS แบบฟิล์มบาง

เส้นโค้งที่เขียนในรูปที่ 8 นั้น เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ขนาดคลื่น ต่าง ๆ โดยใช้แหล่งกำเนิดที่แปรขนาดคลื่นได้ ฉายส่องไปบนชั้นสารกึ่งตัวนำแล้ววัดหาปริมาณการสะท้อนกลับของแสงอย่างแท้จริง แต่เมื่อแสงมีขนาดคลื่นยาวขึ้นหรือความถี่ต่ำลง จนมีขนาดใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นไหวของอะตอมในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ของแสงอินฟราเรด จะเกิดการสะท้อนกลับของแสงที่ความถี่นั้นเป็นอย่างมาก เรียกว่า Reststrahlen Reflection จะทำให้ปริมาณของการทะลุผ่านมีค่าลดน้อยลงจึงเกิดยอดส่วนโค้ง D ในรูปที่ 8 ยอดส่วนโค้ง D จึงเกิดการสะท้อนแสงมากกว่าการดูดแสง ส่วนปลายของเส้นโค้งในรูปที่ 12 คือช่วง E นั้นจะเพิ่มสูงขึ้นตามความยาวของขนาดคลื่นโดยแปรผันตาม  $\lambda^2$  การดูดกลืนโฟตอนที่มิพลังงานน้อยๆ นี้เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron absorption)

จากที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่า อุปกรณ์ไฟฟ้าทางแสงที่อาศัยปรากฏการณ์ ของ Photoconductivity จึงถูกใช้งานเป็นตัววัดปริมาณแสง หรือเป็นตัวรับสัญญาณคลื่นแสงเพื่อใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติต่าง ๆ ได้ ข้อดีของอุปกรณ์พวกนี้ คือ มีโครงสร้างง่ายไม่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากเหมือนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่น ๆ ข้อเสียก็คือ มีความไวต่อการรับแสงต่ำ เช่น CdS Photoconductive Cell ใช้งานได้กับแสงที่เป็นพัลส์ไม่เกิน 100 c/s เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic)

เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณหัวต่อพีเอ็น หรือหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติเป็นผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแสจะเกิดแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้นปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ เรียกว่า Photovoltaic อุปกรณ์ไฟฟ้าทางแสงที่อาศัยหลักการทำงานดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. ตัววัดแสงที่ทำจากเซลล์เนียม
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

#### ต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

การทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำนั้น จะได้ผิวสัมผัส 2 ลักษณะ คือ ผิวสัมผัสแบบ โอห์มมิก และผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแส (Ohmic & Rectifying Contacts) ผิวสัมผัสที่ทำขึ้นจะมีคุณสมบัติเป็นแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ใช้ตลอดจนถึงขั้นตอนของการทำผิวสัมผัสนั้นๆ ผิวสัมผัสที่เป็นแบบโอห์มมิกจะมีคุณสมบัติยอมให้กระแสผ่านได้ทั้งสองอย่างสะดวก โดยปกติโลหะที่ใช้เป็นขั้วเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ต่าง ๆ จะต้องมีความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ เพื่อจะได้ลักษณะที่แท้จริงของอุปกรณ์ นั้น ๆ เช่น การเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นผิวสัมผัสและขั้วเชื่อมกับซิลิคอนแบบพีและเอ็นบวก แล้วนำไป anneal ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของสารคู่ผสมนั้นๆ ส่วนที่สัมผัสที่เราสนใจเป็นพิเศษนี้ได้แก่ ผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแส ซึ่งมีคุณสมบัติตรงข้ามกับผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก คือ ยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียว คุณสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแสนี้ได้แก่ โลหะแคดเมียม กับ สารกึ่งตัวนำเซลล์เนียมแบบพี (Cd-p.Si) เป็นต้น

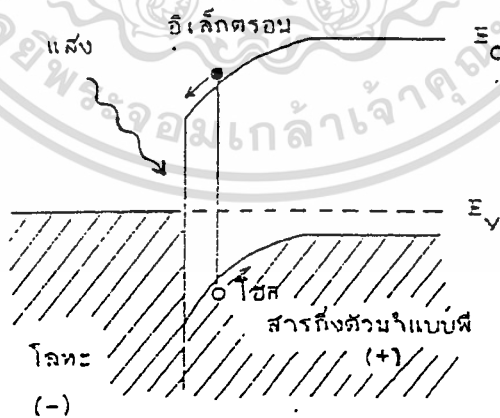
โครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะ และ สารกึ่งตัวนำแบบพีที่มีคุณสมบัติเป็นผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแส มีเขียนแสดงดังรูปที่ 14 ที่บริเวณหัวต่อจะเกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้า (Potential Barrier) ขึ้น เพื่อกั้นกระแสให้ไหลได้ทางเดียว เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณหัวต่อดังกล่าวนี้ และพลังงานโฟตอนมีค่าสูงพอที่จะทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮล คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะถูกขับเคลื่อนให้ไหลออกจากหัวต่อ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนเข้าสู่ด้านโลหะและโฮลจะเคลื่อนเข้าสู่ด้านสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้น โดยมีศักย์ไฟฟ้าเป็นดาวน์ลงทางด้านโลหะ และศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกทางด้านสารกึ่งตัวนำ ส่วนรูปที่ 15 แสดงถึงโครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น ที่มีคุณสมบัติเป็นผิวสัมผัสแบบ เรียงกระแสเมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณหัวต่อก็จะได้แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่มีทิศทางกลับกัน ของรูปที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัววัดแสงเซเลเนียม (Selenium Photoelectric Battery)

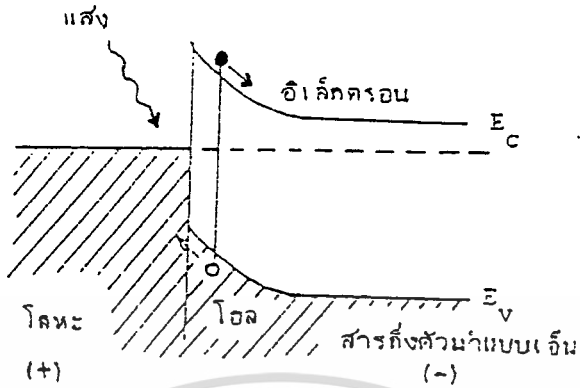
ตัววัดแสงเซเลเนียม เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงที่มีโครงสร้างเป็นหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ดังเขียนแสดงดังรูปที่ 16 กล่าวคือ บนผลึกเซเลเนียมแบบพีจะมีชั้นโลหะแคดเมียมบาง ๆ ฉาบติดอยู่ และมีชั้นของทองฉาบทับเป็นชั้นบางๆ อีกทีหนึ่ง แสงที่ตกกระทบจะผ่านชั้นบางของทองแดงและแคดเมียม เข้าที่หัวต่อระหว่างแคดเมียมและเซเลเนียม เพื่อกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลไปรวมทางแคดเมียม และโฮลไหลไปรวมทางเซเลเนียม จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีค่าแปรผันตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบอุปกรณ์ชนิดนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัววัดปริมาณแสงได้เนื่องจาก เซเลเนียมเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการรับความรู้สึกต่อแสงคล้ายตามนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งเป็นผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง และถ้าเลือกใช้ฟิวเตอร์ที่ถูกต้องด้วยแล้วอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงชิ้นนี้จะมีประโยชน์มากในการใช้เป็นตัววัดแสงที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น เครื่องวัดแสงในการถ่ายรูป เป็นต้น

ในรูปที่ 18 แสดงถึงลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสง ของตัววัดแสงเซเลเนียม เมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีน้อย กล่าวคือค่าความต้านทานภายในของมิเตอร์วัดกระแสมีค่าต่ำ ลักษณะสมบัติที่ได้จะเป็นเส้นตรง จึงสะดวกต่อการใช้งาน แต่ตัววัดแสงเซเลเนียมมีจุดอ่อนที่ไม่สามารถใช้ได้ในที่อุณหภูมิสูง หรือใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานานได้

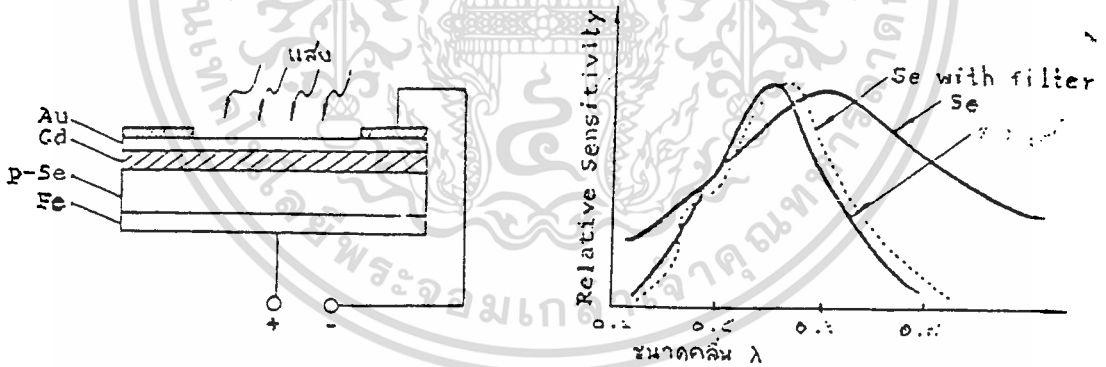


รูปที่ 14 โครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



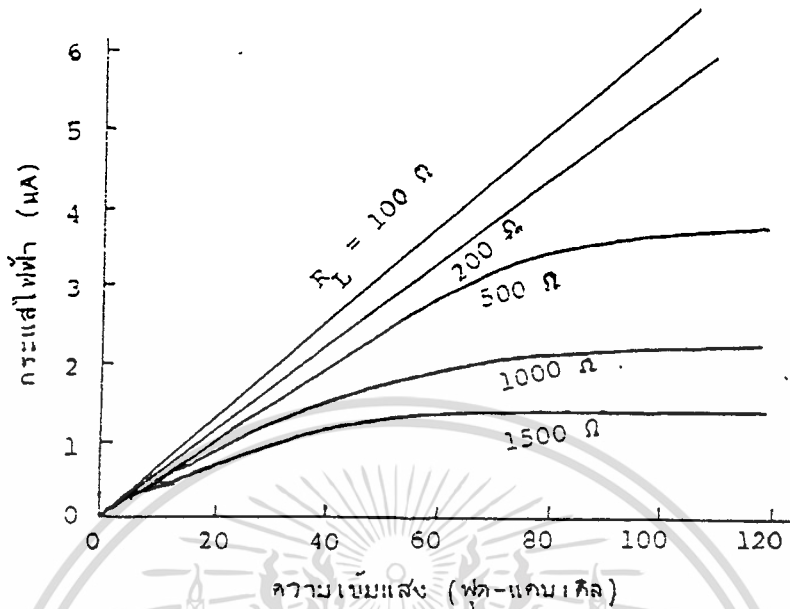
รูปที่ 15 โครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบเอิน ที่มีคุณสมบัติเป็นนิวสันส์แบบ เรืองกระแส



รูปที่ 16 แสดงถึงโครงสร้างของตัววัดแสงเซเลเนียม

รูปที่ 17 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงของสารเซเลเนียมเทียบกับความรู้สึกของตามมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



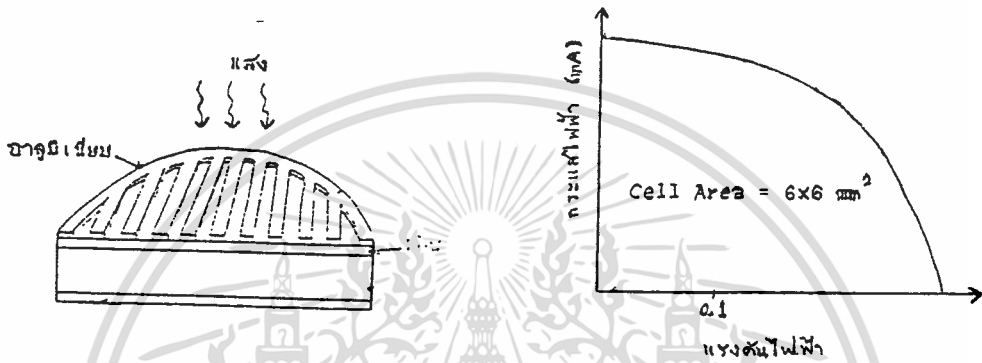
รูปที่ 18 ลักษณะกระแส-ความเข้มแสง ของตัววัดแสงเซเลเนียมเมื่อต่อกับ ความต้านทานโหลดค่าต่าง ๆ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบชอตกกีแบเรีย (Schottky Barrier Solar Cell)

เป็น Photovoltaic effect ที่ใช้หัวต่อที่ทำจากโลหะและสารกึ่งตัวนำประเภทอื่นที่ไม่ใช่เซเลเนียม ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเป็นพลังงานไฟฟ้าจะดีขึ้น เช่น หัวต่อระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนแบบเอ็น หรือดีบุกกับซิลิคอนแบบพี เป็นต้น หัวต่อแบบนี้จึงนำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบหัวต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนี้ เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบชอตกกีแบเรีย โครงสร้างของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เขียนแสดงได้เช่นเดียวกับรูปที่ 14 และ 15

ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบชอตกกีแบเรียนี้ คือ มีโครงสร้างที่ง่ายจึงใช้กรรมวิธีการผลิตที่ง่าย ราคาต้นทุนการผลิตของเซลล์แบบนี้จะถูกมาก เพราะเพียงฉาบชั้นโลหะลงบนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำก็ใช้งานได้ ตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบชอตกกีแบเรียที่ทำจากอลูมิเนียมและแผ่นผลึกซิลิคอนแบบเอ็น พร้อมทั้งเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ที่มีพื้นที่รับแสงประมาณ 6\*6 เซนติเมตร มีเขียนไว้ในรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียเปรียบ ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบชนิดกึ่งแบบเวียเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็นก็คือ มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำ คือ สูงเพียง 2-3 % เท่านั้น แต่การไว้ประโยชน์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องคำนึงถึงทั้งราคาและต้นทุนการผลิตและประสิทธิภาพของเซลล์ควบคู่กันเสมอ



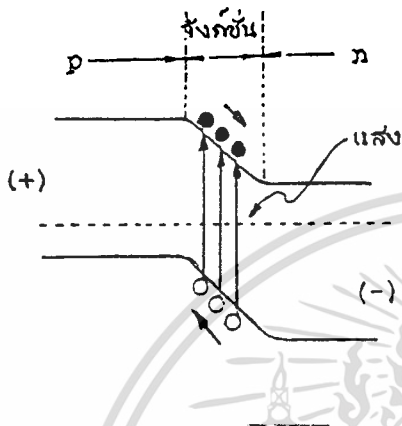
รูปที่ 19 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยซิลิคอนแบบเอ็นและซิลิคอนแบบพี

รูปที่ 20 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยซิลิคอนแบบ N

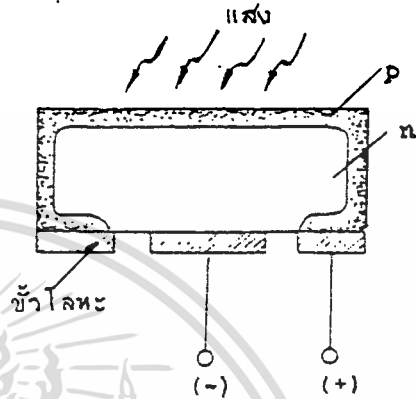
เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น

ปัจจุบันนิยมนำใช้มากที่สุด หัวต่อพีเอ็นดังกล่าวนี้จะต้องได้รับการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งไม่เหมือนกับหัวต่อพีเอ็นที่ใช้ทำไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป เช่น ต้องคำนึงถึงความลึกของหัวต่อจากผิวที่แสงตกกระทบ ขนาดของสารเจือปนที่ควรเติม และ ค่าความต้านทานจำเพาะของแวนผลิก ฯลฯ โครงสร้างของแถบพลังงานของหัวต่อพีเอ็นมีเขียนแสดงดังรูปที่ 21 เมื่อมีโฟตอนตกกระทบบริเวณหัวต่อพีเอ็นจะเกิดการกระตุ้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น และเนื่องจากมีกำแพงศักย์ที่หัวต่อ อิเล็กตรอนจะไหลเข้าสู่ด้านที่เป็นเอ็น และ โฮลไหลเข้าสู่ด้านที่เป็นพีจึงเกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้น ส่วนรูปที่ 22 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารซิลิคอนแบบเอ็น กล่าวคือ นำแวนผลิกซิลิคอนแบบเอ็นมาเติมด้วยสารเจือปนโบรอน (Boron) โดยกระบวนการแพร่ซึม (Diffusion) เพื่อสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำแบบพีขึ้น แล้วฉาบผิวโลหะภายหลังไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวต่อพีเอ็นที่ทำขึ้นจะตัน และมีพื้นที่รับแสงมากที่สุดจึงมีประ-สิทธิภาพดี



รูปที่ 21 โครงสร้างของแถบพลังงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดระบบหัวต่อพีเอ็นที่ทำจากซิลิคอน



รูปที่ 22 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดระบบหัวต่อพีเอ็นที่ทำจากซิลิคอน

คุณสมบัติทางลักษณะปรากฏ (Optical Property)

คุณลักษณะพิเศษประการหนึ่งในหลายประการของวัสดุอาหาร คือ สี โดยรวมทั้งสีภายใน และสีภายในของวัสดุ ซึ่งแสดงถึงความลึกและคุณภาพของวัสดุอาหาร ดังนั้นการแบ่งเป็นประเภทของวัสดุอาหารวิธีหนึ่งคืออาศัยการเปลี่ยนแปลงของสีนี้เอง นอกจากสีแล้ว การสะท้อนแสง การปล่อยผ่านแสง ก็เป็นคุณสมบัติที่ช่วยในการหาคุณสมบัติอื่นอีกหลายประเภท

สีต่างๆ ที่มองเห็นนั้น เป็นการแผ่รังสีทางแม่เหล็กไฟฟ้าของความยาวคลื่นหลายๆช่วง โดยวัตถุจะมีการดูดกลืน หรือการสะท้อนแสงของความยาวคลื่นต่างๆ ที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการวัดจึงเป็นการกระทำโดยการใช้ Monochromatic Light ของความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้ซึ่งนั้นแบ่งออกเป็น 8 ระยะ ตามคุณสมบัติพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของสี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ความยาวคลื่น(micron) | สี(color)   |
|----------------------|-------------|
| 340-450              | ม่วง        |
| 450-480              | น้ำเงินเข้ม |
| 480-510              | น้ำเงิน     |
| 510-550              | เขียว       |
| 550-575              | เหลืองเขียว |
| 575-585              | เหลือง      |
| 585-620              | ส้ม         |
| 620-760              | แดง         |

สีต่างๆ จำนวนมากที่เรามองเห็นได้นั้น เกิดจากการรวมกันของแม่สี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง สีน้ำเงิน โดยมีความสัมพันธ์ทางสัดส่วนในแต่ละสี เพื่อให้เกิดเป็นสีอื่นเป็น

$$COLOR = x'X+y'Y+z'Z$$

เมื่อ X, Y, Z, เป็นแม่สี (แดง, เหลือง, น้ำเงิน)

x', y', z' เป็นสัดส่วนของแม่สีแต่ละสี

### 1. คุณสมบัติการสะท้อน (Reflectance Properties)

ความต้องการหลักอย่างหนึ่งในการกระทำเกี่ยวกับวัสดุอาหาร คือ การคงสภาพของสีของวัสดุอาหาร หลังจากที่มีการเก็บรักษาในช่วงระยะเวลาหนึ่งโดยปราศจากการเกิดสีน้ำตาล (browning) ซึ่งขนาดของการเกิดสีน้ำตาลนี้ จะได้จากการสะท้อนแสงของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น เพราะว่าการสะท้อนแสงของวัตถุสีน้ำตาลนั้น เป็นการลดลงอย่างผิดปกติ ในช่วงความยาวคลื่นสีส้ม (600-650 micron)

ในกรณีการคำนวณนั้น ได้มีการแนะนำให้เลือกคุณลักษณะพิเศษของการสะท้อนแสง 2 ค่าคือ  $R_1$  และ  $R_2$  โดยค่าทั้งสองนี้ หมายถึงค่าของความยาวคลื่นที่ได้จากดัชนีสี ดังนั้นค่าของการสะท้อนแสง คือ  $I = (R_1 - R_2) / R_2$

### 2. คุณสมบัติการส่งผ่านของแสง (Transmittance Properties)

ในการศึกษาโดยอาศัยเฉพาะคุณสมบัติการสะท้อนแสงนั้นไม่เพียงพอสำหรับที่จะใช้ในการศึกษาถึงคุณสมบัติภายในของวัสดุอาหารได้ จะศึกษาได้ก็เฉพาะคุณสมบัติภายนอกของวัสดุอาหารอันได้แก่ สีภายนอก และกลิ่นเฉพาะปรากฏเท่านั้น ดังนั้นการวัดสีภายในของวัสดุอาหาร จึงมีการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติการส่งผ่านแสงมาทำการวัด ซึ่งการส่งผ่านแสงนี้จะเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นเช่นเดียวกับการสะท้อนแสง

### 3. การใช้คุณสมบัติทางการมองเห็น (Use of optical property)

ในการคัดแยกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เกณฑ์สำคัญประการหนึ่งของผลิตภัณฑ์ทางอาหารคือ การหาค่าคุณภาพของอาหาร และการคัดเลือกวัสดุ ซึ่งจากการศึกษาของวิศวกร และนักวิจัยมีหลายวิธีที่ใช้ในการหาค่าคุณภาพของอาหาร และลักษณะที่เห็นได้ชัดระหว่างผลิตภัณฑ์ อาหารกับวัสดุอื่นๆ วิธีหนึ่งที่เป็นเทคนิคที่ใช้ได้ดีคือ การใช้เทคนิคของ electro-optical โดยอาศัยพื้นฐานของคุณสมบัติทางการมองเห็นของผลิตภัณฑ์หรือสีของผลิตภัณฑ์ นั้นเอง

#### 1. แนวคิด (General Concept)

เมื่อแสงสว่างส่องลงบนวัตถุ ส่วนหนึ่งของแสงจะสะท้อนกลับโดยพื้นผิว และส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยผ่านเข้าไปในวัตถุ แสงบางส่วนที่ผ่านวัตถุเข้ามา จะถูกดูดกลืนไว้ บางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่พื้นผิวและบางส่วนจะถูกปล่อยผ่านวัตถุออกไป ส่วนของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ อาจจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นรูปอื่นของรังสีได้ เช่นคุณสมบัติของหินใสมบางชนิด ซึ่งสามารถรับแสงสีม่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าไม่ได้ให้มองเห็นได้ (fluorescence) และ แสงที่เปล่งออกมาจากวัตถุตัวอย่างหลังจากที่แหล่งกำเนิดแสงถูกนำออกไปแล้ว (delayed-light emission) จำนวนของพลังงานที่ส่งรังสีใน reflectance transmittance absorption หรือ emission จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัตถุและรังสีที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการหาค่าลักษณะทางการมองเห็นของวัตถุนั้น สามารถหาความรู้จากคุณสมบัติอื่นๆของวัตถุได้

#### 2. ปฏิภาณวิทยาที่มีต่อกันระหว่างแสงกับวัสดุอาหาร

##### (Interaction Between Light and Food Materials)

พื้นฐานในการวิเคราะห์คุณภาพของอาหาร จากคุณสมบัติทางการเห็นต้องเข้าใจถึงปฏิภาณวิทยาที่มีต่อกันระหว่างแสงและวัสดุอาหาร ซึ่งวัสดุอาหารส่วนมากจะไม่มีลักษณะการเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อคู่ด้วยสายตา แต่จะประกอบด้วยส่วนเล็ก ๆ จำนวนมากอยู่ภายใน แสงที่ผ่านวัสดุจะถูกทำให้กระจัดกระจายไปทุกทิศทางทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 23 เมื่อแสงสว่างส่องลงบนวัสดุอาหารจะมีประมาณ 4% ของรังสีที่ปล่อยออกมาเท่านั้นที่ถูกสะท้อนกลับ ส่วนรังสีที่เหลือจะถูกปล่อยผ่านบริเวณผิวหน้า และเกิดการปะทะกันเล็กน้อยในโครงสร้างของ cellular และ อยู่ห่างๆกันในทิศทางทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ส่วนมากจะกระจายกลับไปยังผิวหน้า และออกจากวัสดุอาหารในจุดที่ใกล้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคียงกันกับบริเวณที่แสงตกลงมายังวัสดุอาหาร ลักษณะการสะท้อนแบบนี้เรียกว่า body reflectance และแสงกระจัดกระจายที่เหลือจะแพร่กระจายลึกเข้าไปในวัสดุอาหาร และ ในที่สุดจะแพร่ไปที่บริเวณ ผิวหน้าวัสดุ โดยมีระยะห่างจากจุดที่แสงตกลงมายังวัสดุอาหารการเดินทางของแสงเข้าไปในวัสดุอาหารนี้ แสงจะถูกดูดกลืนโดยส่วนประกอบต่างๆของวัสดุอาหาร พลังงานของแสงที่ถูกดูดกลืนนี้จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปอื่น ส่วนวัสดุบางส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืน อาจจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นรังสีรูปอื่น เช่น fluorescence และ delayed-light emission ดังนั้นรังสีที่แพร่ออกจาก ผิวหน้าวัสดุอาหาร จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบเพียงตัวเดียว หรือ มากกว่า เช่น regular reflectance, body reflectance, transmittance และ emission



รูปที่ 23 แสดงการกระจายของแสงเมื่อส่องผ่านวัสดุอาหาร

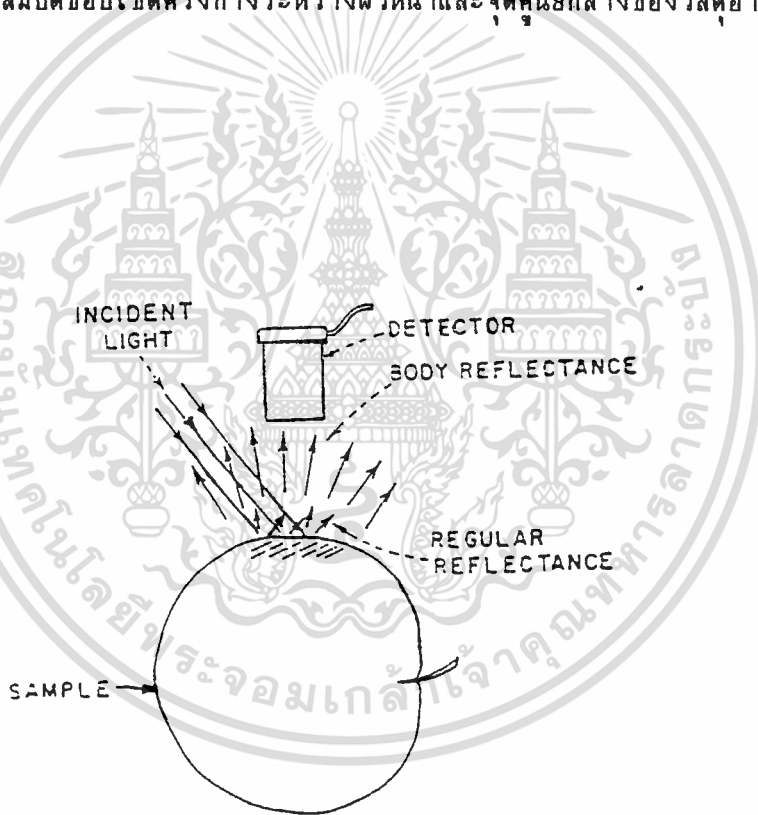
3. ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง , ตัวอย่างวัสดุอาหาร และ ตัวจับคลื่นแสง (Relative Positions of Light Sources , Sample and Detector)

ในการวัดค่าปัจจัยของคุณภาพของขอบเขตที่แน่นอน ของตัวอย่าง จำเป็นจะต้องวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่าง และตัวจับคลื่นแสง ดังนั้นแสงที่ใช้วัดส่วนมากจะผ่านบริเวณของส่วนที่สนใจงานไว้รูปที่ 24-26 แสดงถึงการจัดวางตัวของความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงกับตัวจับคลื่นแสง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

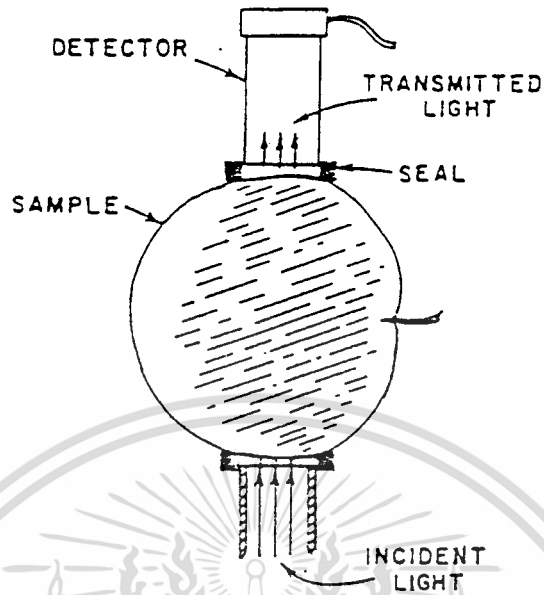
กำเนิดแสง ตัวอย่างวัสดุอาหาร และตัวจับคลื่นแสงโดยบริเวณเงาที่บจะแสดงบริเวณที่แสงใช้วัดถูกส่งผ่านโดยประมาณ ในการวัด body reflectance รูปที่ 24 แสดงถึงความรู้ทั่วไปอย่างง่ายของการสะท้อน จะต้องหาคุณลักษณะพิเศษของขอบเขตใกล้กับผิวหน้า ในจุดที่ใกล้เคียงกับจุดที่แสงจะตกลงมายังวัตถุ การวัดในลักษณะนี้จะใช้สำหรับการวัดปัจจัยทางคุณภาพของสีภายนอกของวัสดุอาหาร การสูญเสียที่บริเวณผิวหน้า รอยขีดข่วน หรือดลอก ความแตกต่างภายนอกระหว่าง 2 วัตถุเป็นต้น รูปร่างภายนอกที่แสดงในรูปที่ 24 ทำให้สะดวกในการวัดแสงที่ปล่อยผ่านตัวอย่างวัสดุอาหาร ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการตรวจวัดปัจจัยทางคุณภาพภายใน เช่น สีภายในของมะเขือเทศ

รูปร่างภายนอกที่แสดงในรูปที่ 26 ถึงแม้ว่าจะไม่เป็นการใช้แบบธรรมดา แต่จะใช้สำหรับหาค่าคุณสมบัติขอบเขตครึ่งทางระหว่างผิวหน้าและจุดศูนย์กลางของวัสดุอาหาร

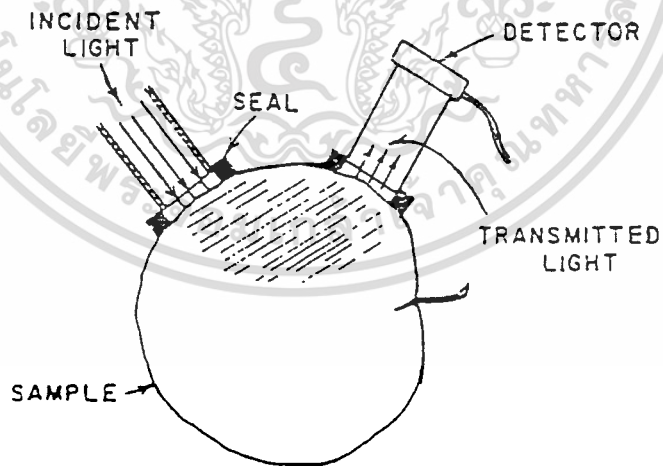


รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและการตรวจวัดการสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและการตรวจวัดการส่องผ่านตลอด



รูปที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและการตรวจวัดการส่องผ่านบางส่วน

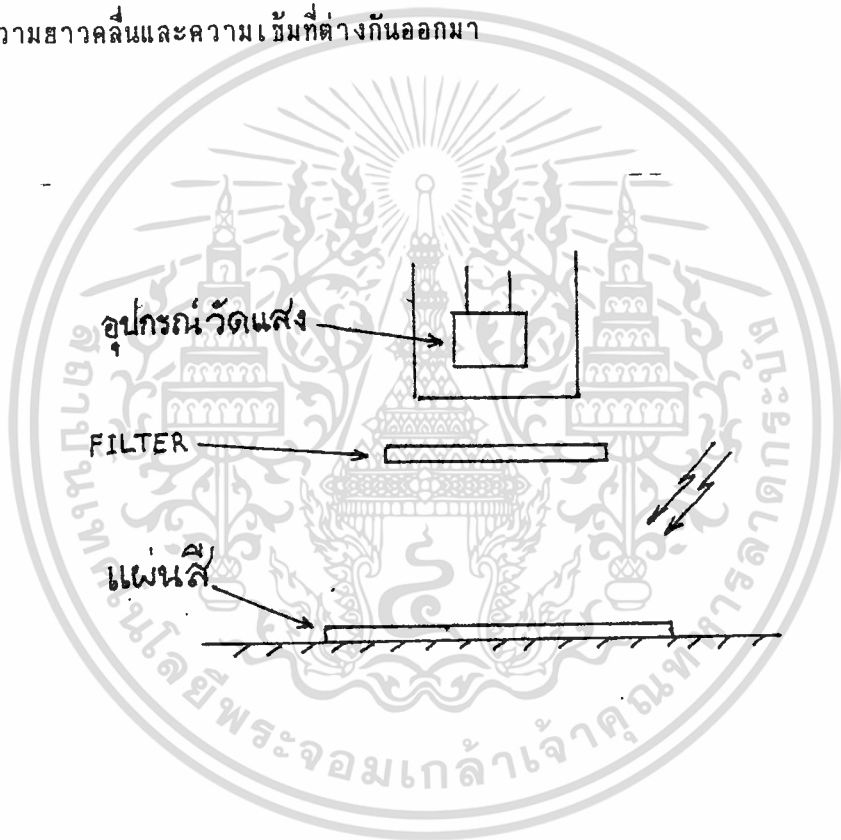
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การดำเนินงาน

#### 1. หลักการเบื้องต้น

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการคัดแยกผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลำแสง เราสามารถใช้หลักการของการสะท้อนแสงของวัตถุ โดยธรรมชาติของแสงเมื่อตกกระทบวัตถุที่มีสีต่างกัน ก็จะสะท้อนแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มที่ต่างกันออกมา



รูปที่ 27

จากการทดลอง เราจะใช้แผ่นสีต่างๆแทนผลมะเขือเทศ ในการหาผลตอบสนองของอุปกรณ์ โดยเราจะใช้ Filter กรองเฉพาะสีที่เราต้องการ และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงเป็นตัววัดความเข้มของสีนั้นๆ

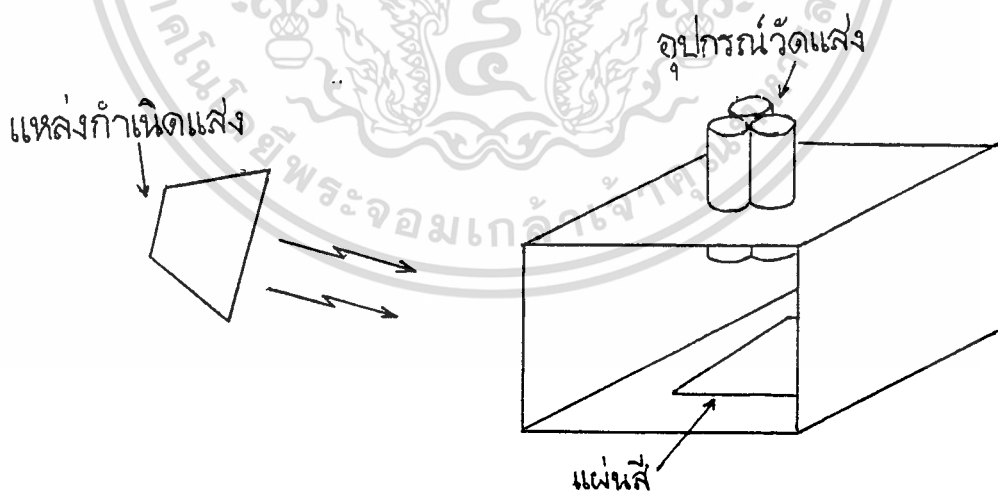
สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง ที่เราเลือกนำมาทดลอง เพื่อหาอุปกรณ์ที่มีผลตอบสนองซึ่งที่เหมาะสมกับโครงการของเราได้แก่ Phototransistor, LDR และ Photocell การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองโดยจัดวางอุปกรณ์ตามรูปที่ 27 โดยใช้แผ่นสีแดง-เหลืองใน shade ต่างๆกัน และใช้ Filter สีแดง, เหลือง และเขียว ในการกรองแสงที่สะท้อนออกมาจากแผ่นสีโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงดังที่กล่าวมาข้างต้น เป็นตัววัดความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมา ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับโครงการนี้คือ LDR เนื่องจากว่า LDR มีช่วงของผลตอบสนองที่กว้างกว่า และตอบสนองต่อช่วงความถี่ของแสงที่ตาคนมองเห็นได้ดีกว่าอุปกรณ์ตัวอื่นๆ

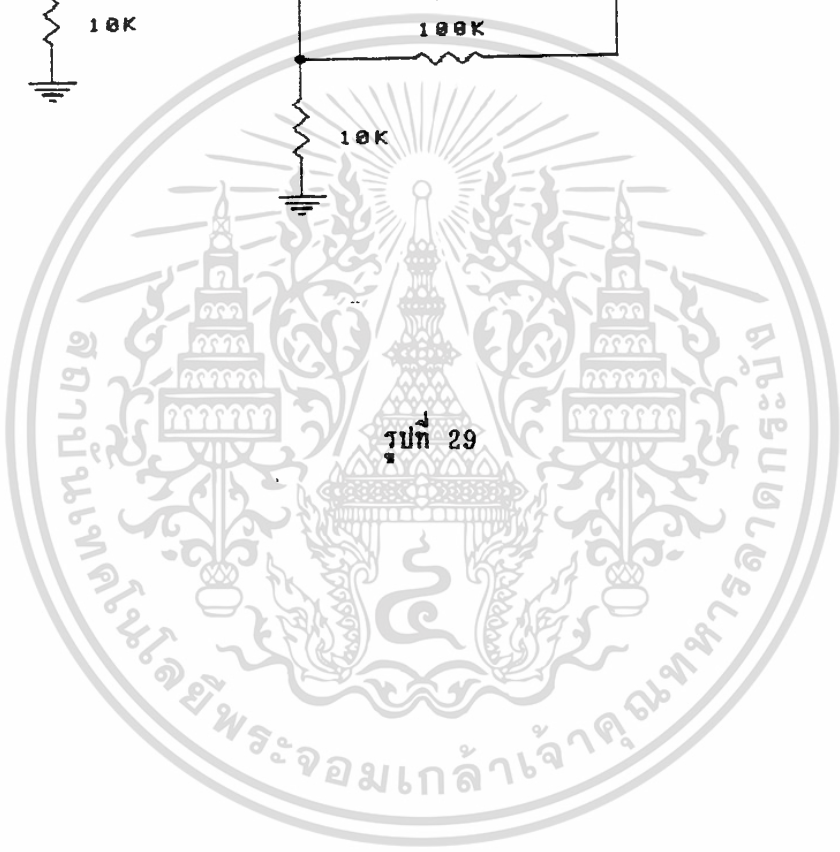
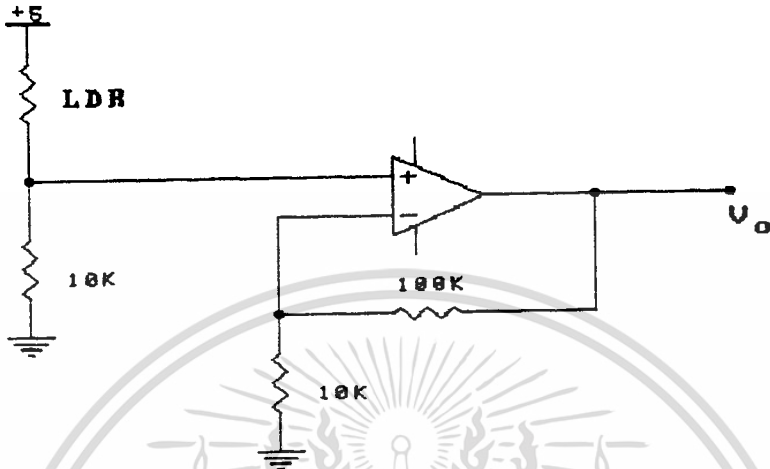
ส่วนเหตุผลที่ไม่เลือกใช้ Phototransistor และ Photocell เนื่องจากว่า Phototransistor ที่เราใช้ไม่สามารถหา Phototransistor ที่มีเอาต์พุตขนาดใหญ่ได้ทำให้ต้องสร้างวงจรขยายที่มีอัตราขยาย (gain) สูงๆ ซึ่งจะทำให้มีผลจาก noise เกิดขึ้นมาก นอกจากนี้ Phototransistor ส่วนมากจะตอบสนองในช่วงความถี่ Infrared ส่วน Photocell จะให้ผลตอบสนองช้ากว่า LDR

2. การทดลองในสภาวะแสงต่างๆ

ในสภาวะแสงที่ต่างๆกัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงย่อมให้ผลตอบสนองที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นเราจึงจะทำการทดลองในสภาวะแสงต่างๆเพื่อหาผลตอบสนองที่เหมาะสม



รูปที่ 28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1

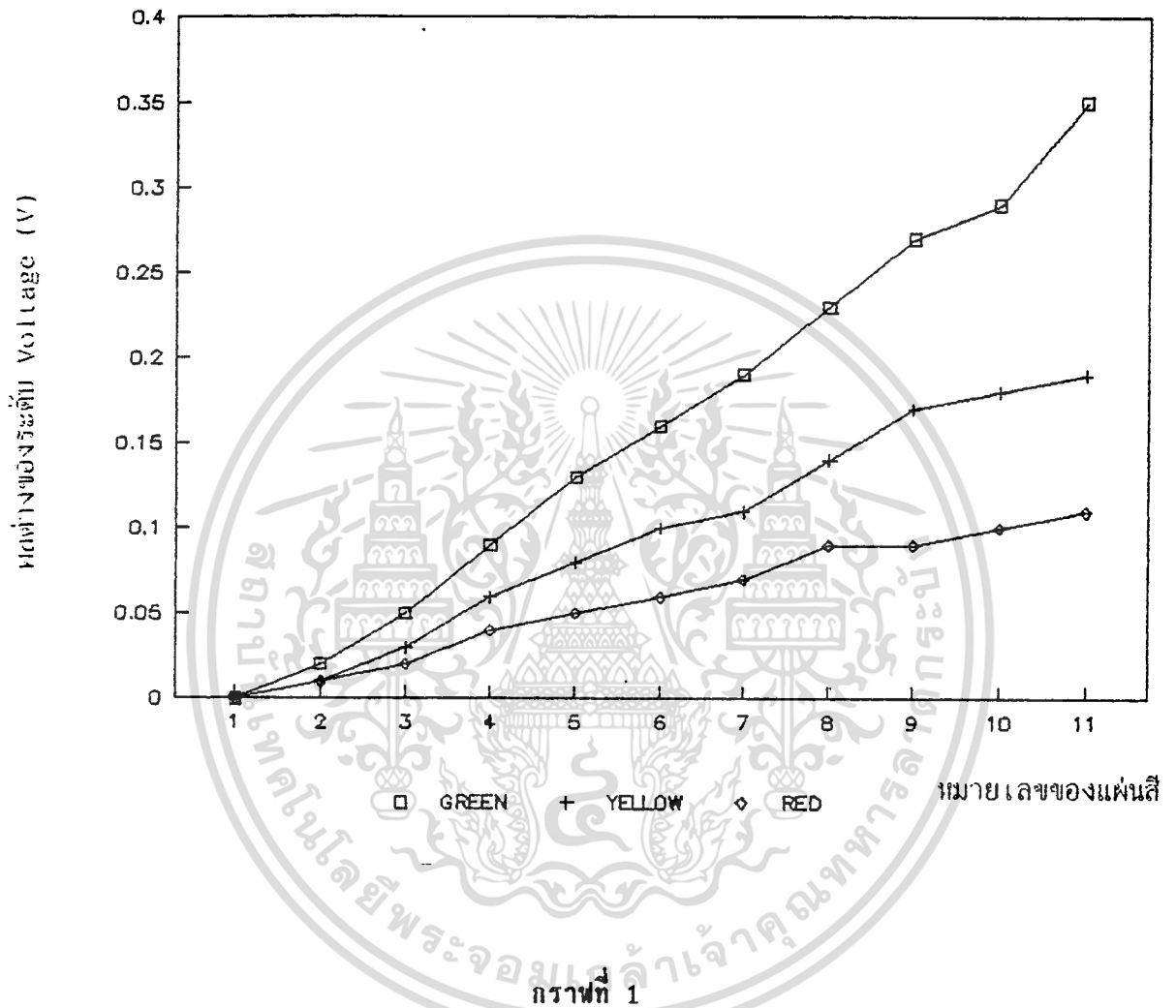
ในการทดลองเราจัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 28 และต่อ LDR เข้ากับวงจรในรูปที่ 29 โดยใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นเปลี่ยนแผ่นสีแดง-เหลืองใน shade ที่ต่าง ๆ กัน และทำการวัดโวลเตจ ( $V_o$ ) ที่ต่างกัน ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 1

| FILTER           | สีเหลือง<br>(V) | สีเขียว<br>(V) | สีแดง<br>(V) |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| เมื่อไม่มีแผ่นสี | 4.20            | 3.56           | 3.05         |
| แผ่นที่ 1        | 3.83            | 2.83           | 2.94         |
| แผ่นที่ 2        | 3.84            | 2.85           | 2.95         |
| แผ่นที่ 3        | 3.86            | 2.88           | 2.97         |
| แผ่นที่ 4        | 3.89            | 2.92           | 2.98         |
| แผ่นที่ 5        | 3.91            | 2.96           | 2.99         |
| แผ่นที่ 6        | 3.93            | 2.99           | 3.00         |
| แผ่นที่ 7        | 3.94            | 3.02           | 3.01         |
| แผ่นที่ 8        | 3.97            | 3.06           | 3.03         |
| แผ่นที่ 9        | 4.00            | 3.10           | 3.03         |
| แผ่นที่ 10       | 4.01            | 3.12           | 3.04         |
| แผ่นที่ 11       | 4.02            | 3.18           | 3.05         |

ตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังกราฟที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2

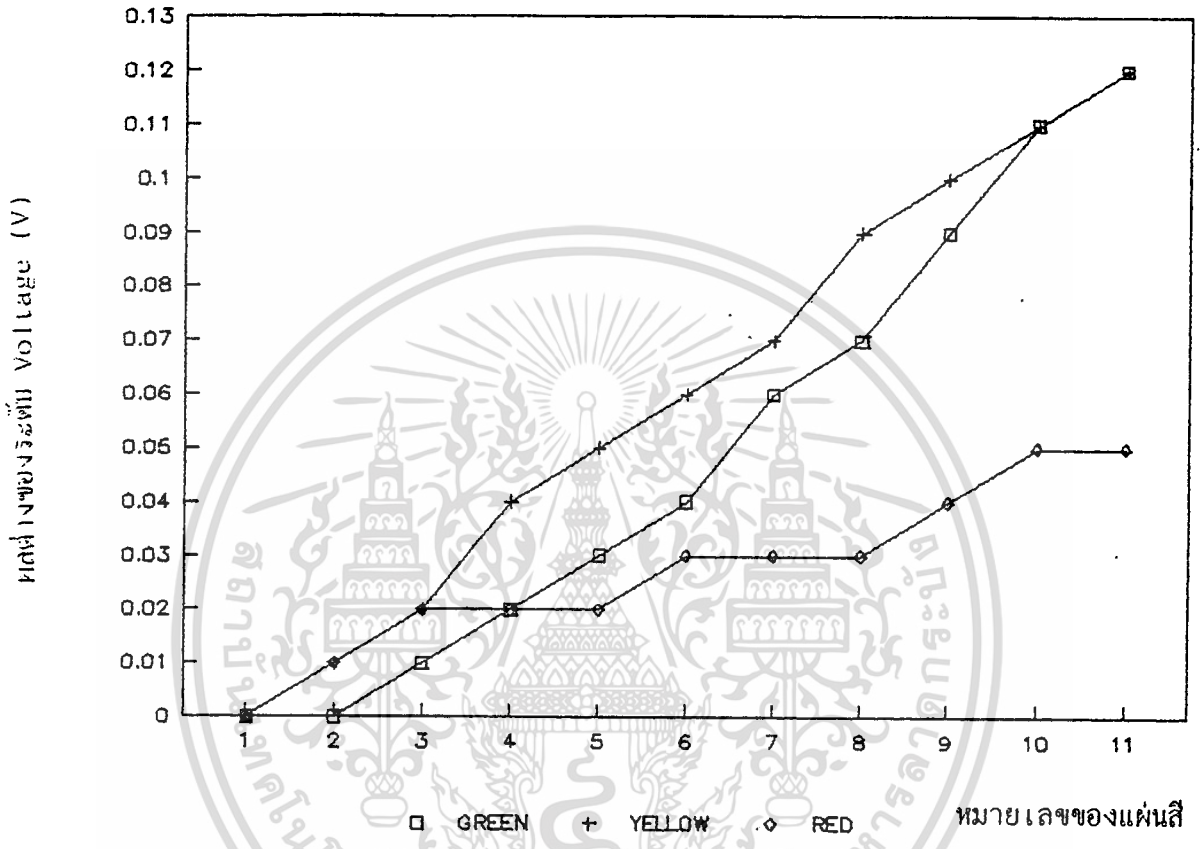
ทำการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงมาใช้แสงจากคอมไฟ  
ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 2

| FILTER           | สีเหลือง<br>(V) | สีเขียว<br>(V) | สีแดง<br>(V) |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| เมื่อไม่มีแผ่นสี | 4.14            | 3.41           | 3.69         |
| แผ่นที่ 1        | 3.94            | 3.13           | 3.71         |
| แผ่นที่ 2        | 3.95            | 3.13           | 3.72         |
| แผ่นที่ 3        | 3.96            | 3.14           | 3.73         |
| แผ่นที่ 4        | 3.98            | 3.15           | 3.73         |
| แผ่นที่ 5        | 3.99            | 3.16           | 3.73         |
| แผ่นที่ 6        | 4.00            | 3.17           | 3.74         |
| แผ่นที่ 7        | 4.01            | 3.19           | 3.74         |
| แผ่นที่ 8        | 4.03            | 3.20           | 3.74         |
| แผ่นที่ 9        | 4.04            | 3.22           | 3.75         |
| แผ่นที่ 10       | 4.05            | 3.23           | 3.76         |
| แผ่นที่ 11       | 4.06            | 3.25           | 3.76         |

ตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังกราฟที่ 2



กราฟที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3

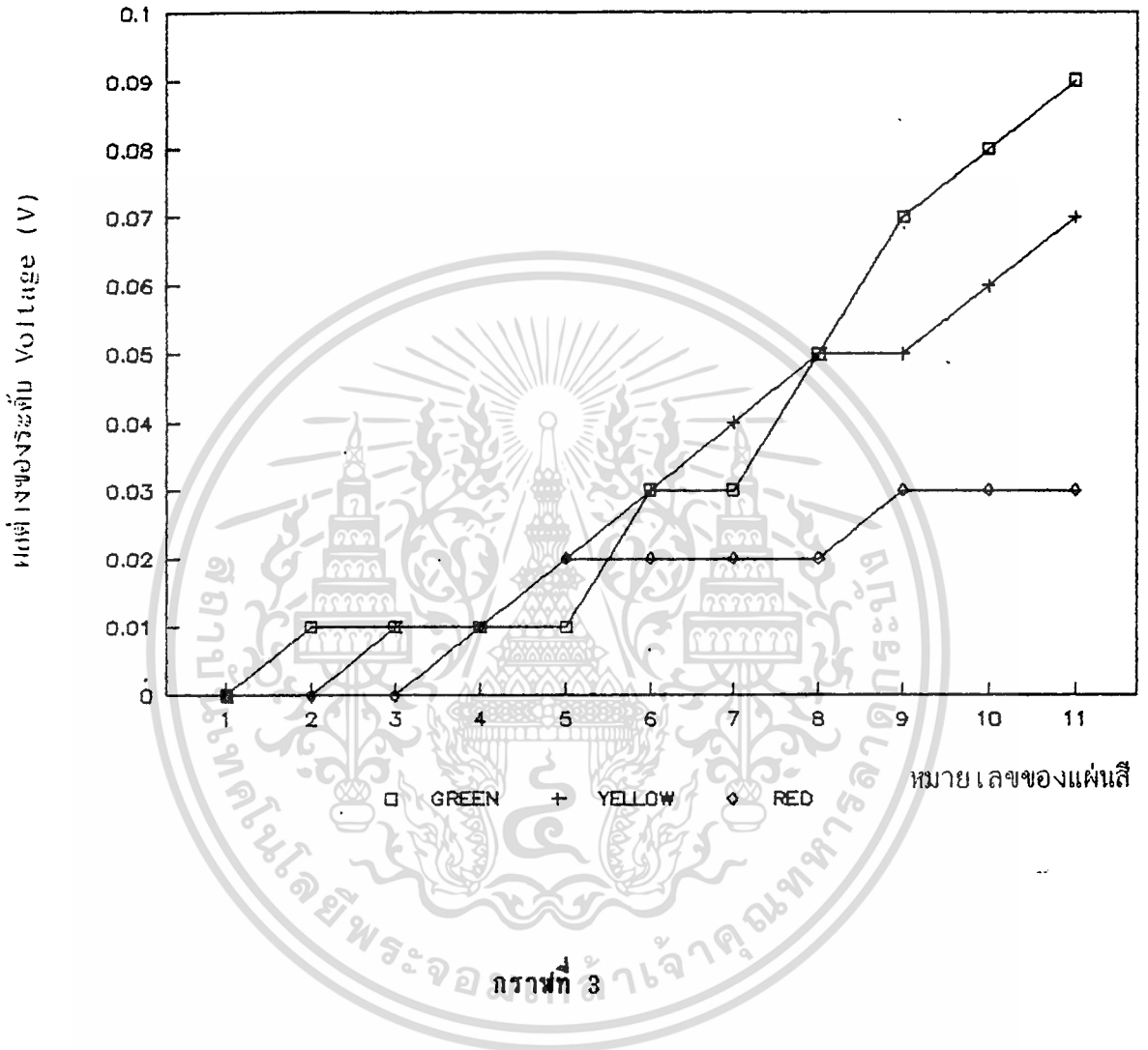
ทำการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงมาใช้แสงจากโคมไฟผ่าน Filter สีแดง ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 3

| FILTER           | สีเหลือง<br>(V) | สีเขียว<br>(V) | สีแดง<br>(V) |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| เมื่อไม่มีแผ่นสี | 3.99            | 3.07           | 3.78         |
| แผ่นที่ 1        | 3.92            | 2.93           | 3.80         |
| แผ่นที่ 2        | 3.92            | 2.94           | 3.80         |
| แผ่นที่ 3        | 3.93            | 2.94           | 3.80         |
| แผ่นที่ 4        | 3.93            | 2.94           | 3.81         |
| แผ่นที่ 5        | 3.94            | 2.94           | 3.82         |
| แผ่นที่ 6        | 3.95            | 2.96           | 3.82         |
| แผ่นที่ 7        | 3.96            | 2.96           | 3.82         |
| แผ่นที่ 8        | 3.97            | 2.98           | 3.82         |
| แผ่นที่ 9        | 3.97            | 3.00           | 3.83         |
| แผ่นที่ 10       | 3.98            | 3.01           | 3.83         |
| แผ่นที่ 11       | 3.99            | 3.02           | 3.83         |

ตารางที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังกราฟที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4

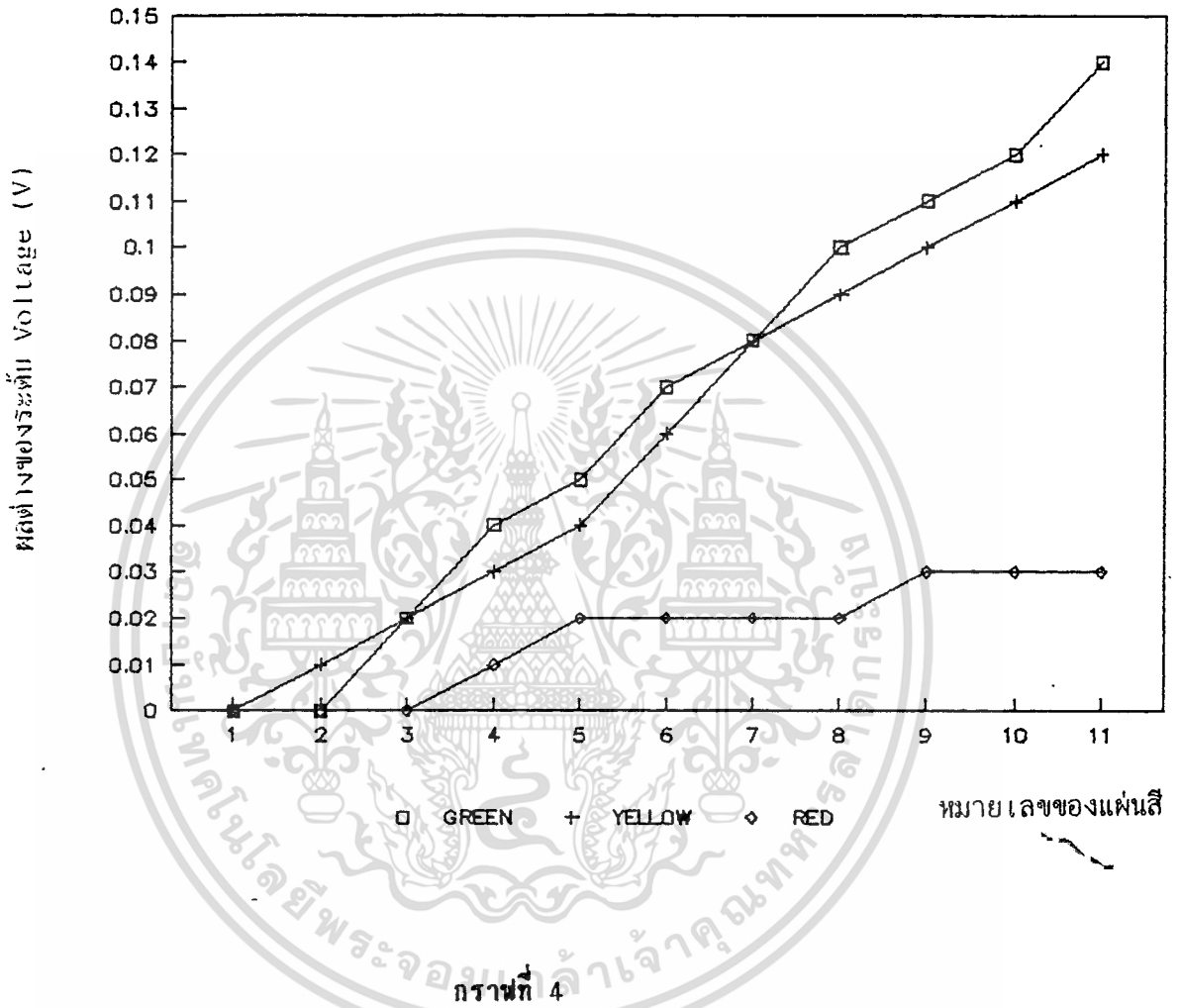
ทำการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงมาใช้แสงจากโคโมไฟ , ผ่าน Filter สีเหลือง ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4

| FILTER           | สีเหลือง<br>(V) | สีเขียว<br>(V) | สีแดง<br>(V) |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| เมื่อไม่มีแผ่นสี | 4.21            | 3.47           | 3.83         |
| แผ่นที่ 1        | 4.08            | 3.19           | 3.85         |
| แผ่นที่ 2        | 4.09            | 3.19           | 3.85         |
| แผ่นที่ 3        | 4.10            | 3.21           | 3.85         |
| แผ่นที่ 4        | 4.11            | 3.23           | 3.86         |
| แผ่นที่ 5        | 4.12            | 3.24           | 3.87         |
| แผ่นที่ 6        | 4.14            | 3.26           | 3.87         |
| แผ่นที่ 7        | 4.16            | 3.27           | 3.87         |
| แผ่นที่ 8        | 4.17            | 3.29           | 3.87         |
| แผ่นที่ 9        | 4.18            | 3.30           | 3.88         |
| แผ่นที่ 10       | 4.19            | 3.31           | 3.88         |
| แผ่นที่ 11       | 4.20            | 3.33           | 3.88         |

ตารางที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังกราฟที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 5

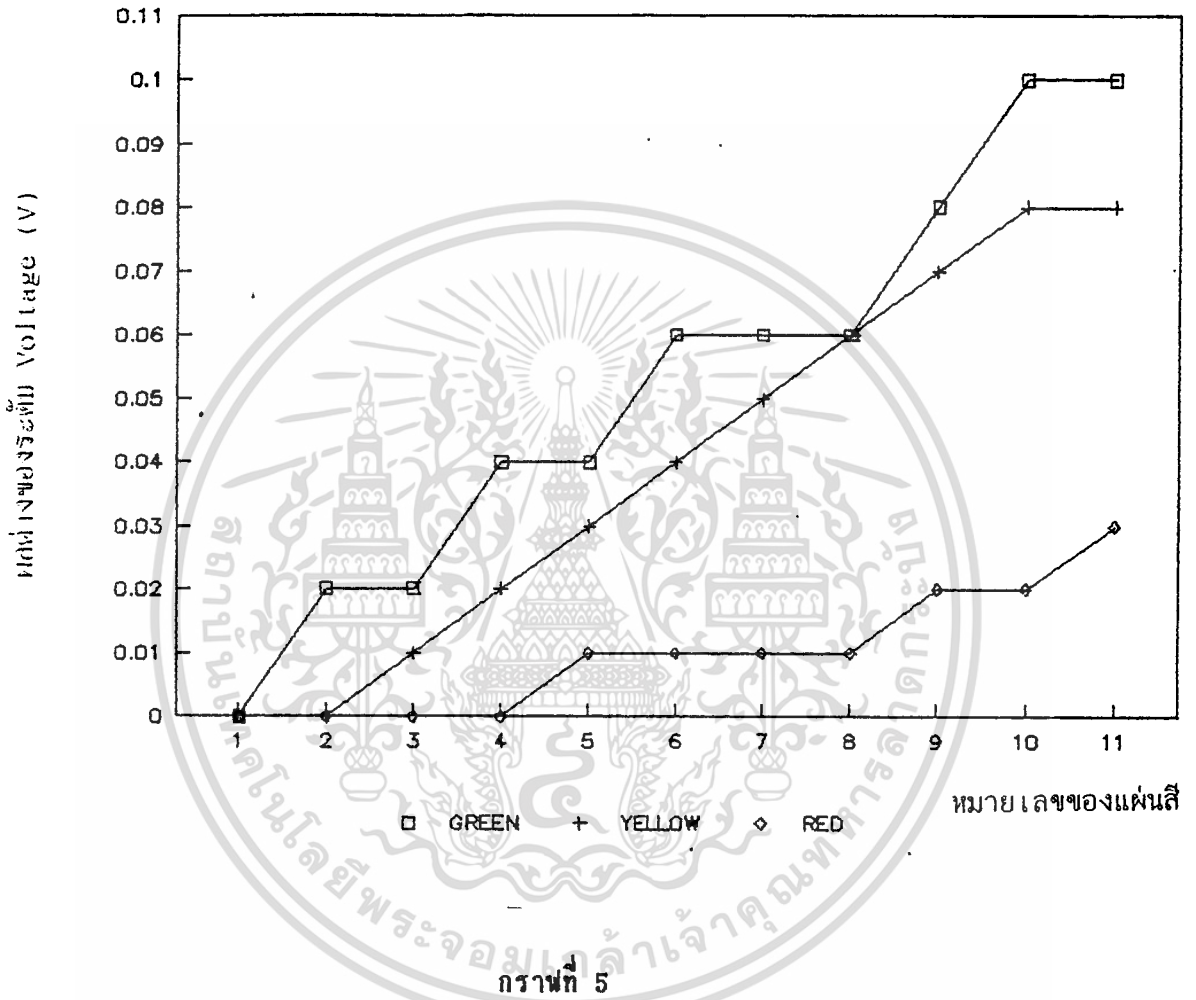
ทำการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงมาใช้แสงจากโคโมไฟผ่าน Filter สีเขียว ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 5

| FILTER           | สีเหลือง<br>(V) | สีเขียว<br>(V) | สีแดง<br>(V) |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|
| เมื่อไม่มีแผ่นสี | 4.13            | 3.75           | 3.60         |
| แผ่นที่ 1        | 3.98            | 3.57           | 3.66         |
| แผ่นที่ 2        | 3.98            | 3.59           | 3.66         |
| แผ่นที่ 3        | 3.99            | 3.59           | 3.66         |
| แผ่นที่ 4        | 4.00            | 3.61           | 3.66         |
| แผ่นที่ 5        | 4.01            | 3.61           | 3.67         |
| แผ่นที่ 6        | 4.02            | 3.63           | 3.67         |
| แผ่นที่ 7        | 4.03            | 3.63           | 3.67         |
| แผ่นที่ 8        | 4.04            | 3.63           | 3.67         |
| แผ่นที่ 9        | 4.05            | 3.65           | 3.68         |
| แผ่นที่ 10       | 4.06            | 3.67           | 3.68         |
| แผ่นที่ 11       | 4.06            | 3.67           | 3.69         |

ตารางที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังกราฟที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

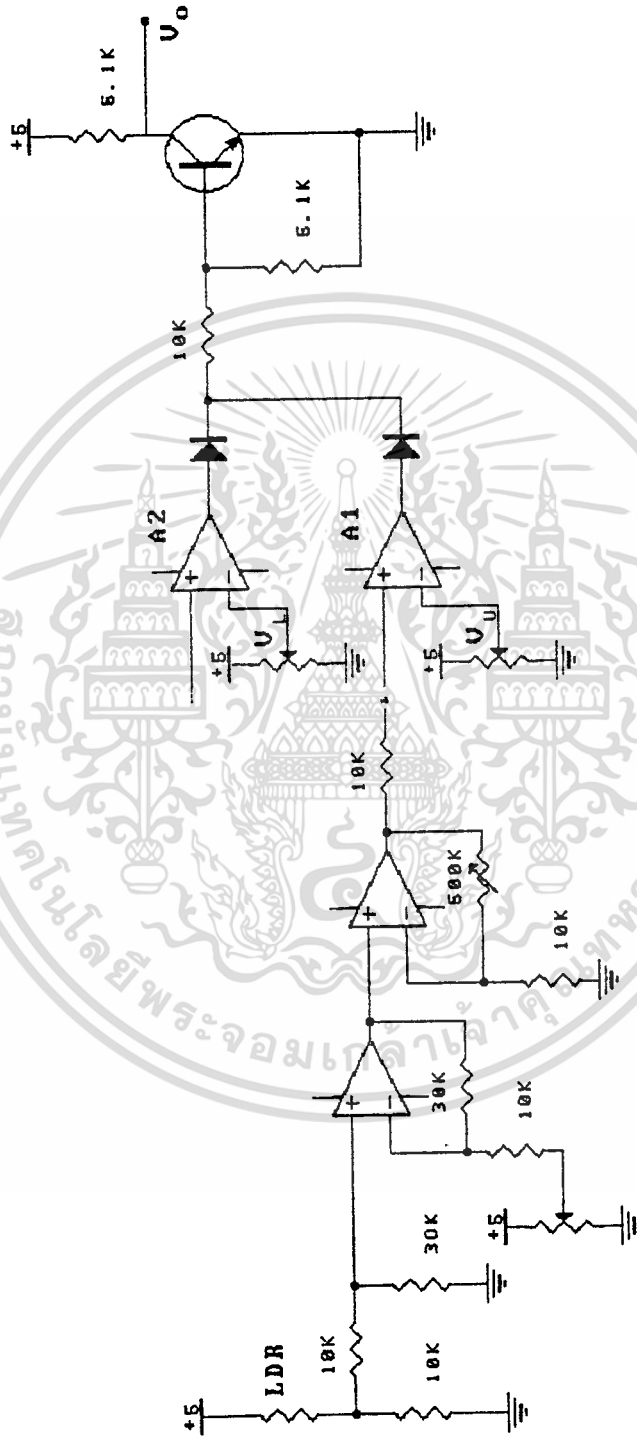
สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในสภาวะทั้ง 5 เราจะเห็นได้ว่าแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จะให้ช่วงของผลตอบสนองที่กว้างกว่า และ Filter แต่ละตัวจะให้ผลตอบสนองที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. วงจรที่ใช้ในงานทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรที่เราใช้งาน เราสามารถจะแยกระดับความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัว LDR โดยถ้าความเข้มแสงอยู่ในช่วงที่เราต้องการ เราจะได้ค่าโวลเตจเอาต์พุต ( $V_o$ ) เป็น 5 โวลท์ แต่ถ้าความเข้มแสงอยู่นอกเหนือช่วงที่เราต้องการ จะได้ค่าโวลเตจเอาต์พุต ( $V_o$ ) เป็น 0 โวลท์

ค่า  $V_1$  จะแปรผันตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนตัว LDR และเมื่อ  $V_1$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $V_U$  และ  $V_L$  ( $V_L < V_1 < V_U$ ) เราจะได้โวลเตจเอาต์พุต ( $V_o$ ) เป็น 5 โวลท์ ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดช่วงของความเข้มแสงที่ต้องการได้โดยปรับจากค่า  $V_U$  และ  $V_L$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

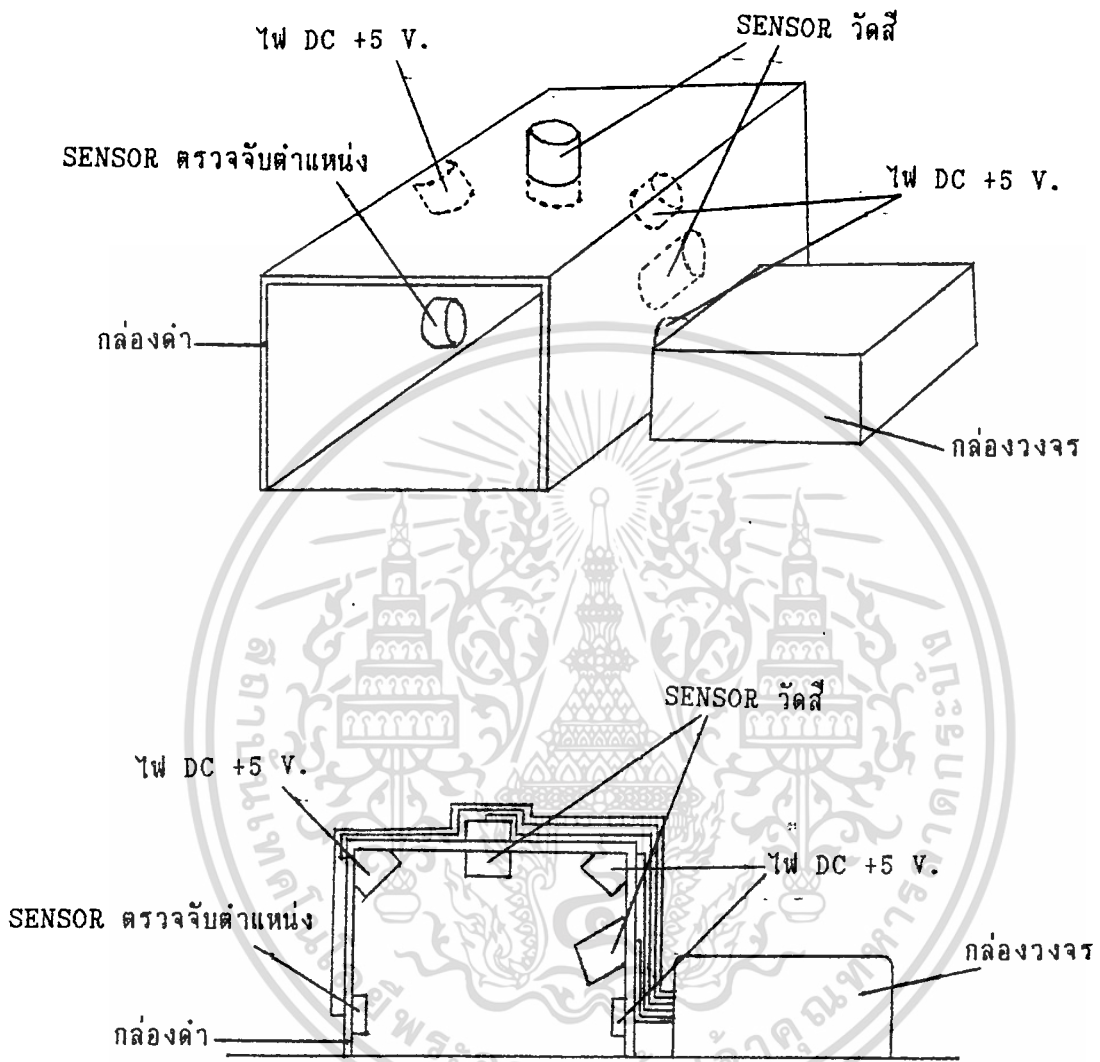
### วงจรและหลักการทำงาน

#### หลักการทำงาน

จากที่กล่าวมาแล้วว่า หลักการทำงานของอุปกรณ์จะใช้หลักการสะท้อนแสงของวัตถุ ซึ่งวัตถุที่มีสีต่างกันก็จะสะท้อนแสงที่มีความเข้มต่างกันออกมา นอกจากนี้ในตัวอุปกรณ์ในตัวอุปกรณ์ยังต้องมี SENSOR อีกตัวหนึ่งซึ่งเป็นตัวรับรู้ว่ามีมะเขือเทศผ่านเข้ามาในตำแหน่งที่เราจะทำการวัดสีแล้ว

จากรูปที่ 31 ในการจัดวางอุปกรณ์ เมื่อมีมะเขือเทศผ่านเข้ามาในตำแหน่งที่เราจะทำกรวัดสี มะเขือเทศจะบังแสงไฟที่มาจากกระทบ ทำให้ตัว SENSOR ซึ่งเป็น LDR อีกตัวหนึ่ง รับรู้ได้ว่ามีมะเขือเทศผ่านเข้ามาแล้ว ซึ่งจะให้ได้สัญญาณ pulse ออกมา

เมื่อมะเขือเทศอยู่ในตำแหน่งที่สามารถวัดสีแล้ว ตัว SENSOR ที่ใช้วัดสีทั้ง 2 ตัว ซึ่งจัดวางตำแหน่งดังรูปที่ 31 ก็จะเปลี่ยนค่าความต้านทานไป โดยที่เราจะนำค่าเฉลี่ยจากตัว SENSOR ทั้ง 2 ตัวมาเป็นเครื่องตัดสินว่า จะยอมรับสีของมะเขือเทศลูกนั้นหรือไม่ ถ้าสีของมะเขือเทศอยู่สูงกว่าเกณฑ์ที่เราตั้งไว้ก็จะมีสัญญาณ reject ออกมาจากวงจร แต่ถ้าสีของมะเขือเทศที่วัดได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่รับไว้ วงจรก็จะส่งสัญญาณ reject ออกมาเป็น pulse 1 ลูก เพื่อส่งไปยังอุปกรณ์ต่อไป



รูปที่ 31 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเครื่องตรวจวัดคลื่นที่ใช้นี้ เป็นระบบที่ประกอบด้วยวงจรรอฮยาหลายวงจรถูกทำงานร่วมกัน ซึ่งวงจรรอฮยาเหล่านี้มีหลักการทำงานดังที่จะกล่าวต่อไปน้

### วงจร WINDOW COMPARATOR

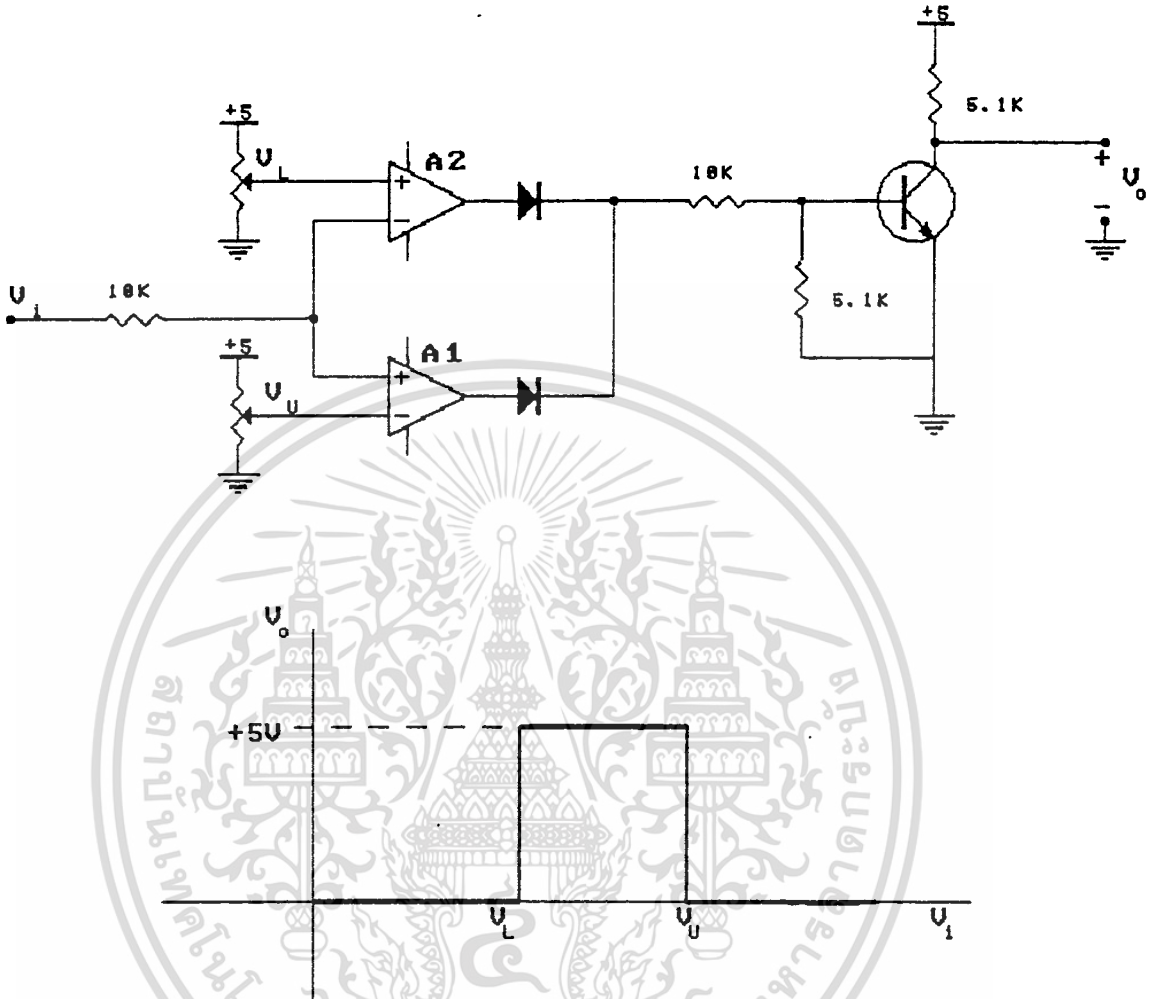
วงจร WINDOW COMPARATOR เป็นวงจรที่ใช้เปรียบเทียบระดับโวลเตจ ว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ โดยใช้ IC Comparator 2 ตัวทำงานร่วมกัน สำหรับวงจรที่ใช้งานนี้เลือกใช้ IC Comparator เบอร์ LM 311 ในการเปรียบเทียบ

การทำงานของวงจรเป็นดังนี้คือ Comparator  $A_1$  และ  $A_2$  จะถูกตั้งค่าของ voltage limit ( $V_U$  และ  $V_L$ ) ไว้ โดยที่ระดับของ  $V_U$  สูงกว่า  $V_L$  เพื่อใช้เป็นระดับสัญญาณที่เราอ้างอิง ถ้า Amplitude ของสัญญาณ Input ( $V_i$ ) มีค่าต่ำกว่า  $V_L$  ซึ่งก็จะได้ว่า  $V_U$  มากกว่า  $V_i$  ด้วย ดังนั้น จะได้ Output ของ  $A_1$  เป็น LOW (0 V.) และ Output ของ  $A_2$  เป็น HIGH (5 V.) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ Transistor  $Q_1$  ทำงานผ่านทาง  $D_2$  ( $D_1$  off) และ Output ของ  $Q_1$  เป็น LOW

ในทางกลับกัน ถ้าระดับสัญญาณของ  $V_i$  สูงกว่าทั้ง  $V_U$  และ  $V_L$  เราจะได้ Output ของ  $A_1$  เป็น LOW ส่วน Output ของ  $A_2$  เป็น HIGH จึงมีผลทำให้  $Q_1$  SATURATED และ สัญญาณ  $V_o$  เป็น LOW

ส่วนในกรณีที่ระดับสัญญาณของ  $V_i$  อยู่ระหว่าง  $V_U$  และ  $V_L$  ( $V_L < V_i < V_U$ ) จะได้ว่า Output ของทั้ง  $A_1$  และ  $A_2$  เป็น LOW และ  $Q_1$  ไม่ทำงาน ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณ Output เป็น HIGH

ในวงจรที่ใช้งาน เรานำวงจร WINDOW COMPARATOR มาใช้ในส่วนของตัว SENSOR เพื่อรับรู้ระดับสัญญาณโวลเตจว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ และในส่วนวงจรที่ใช้ในการปรับหรือตั้งค่าต่างๆก่อนการใช้งาน



รูปที่ 32 แสดงวงจร WINDOW COMPARATOR

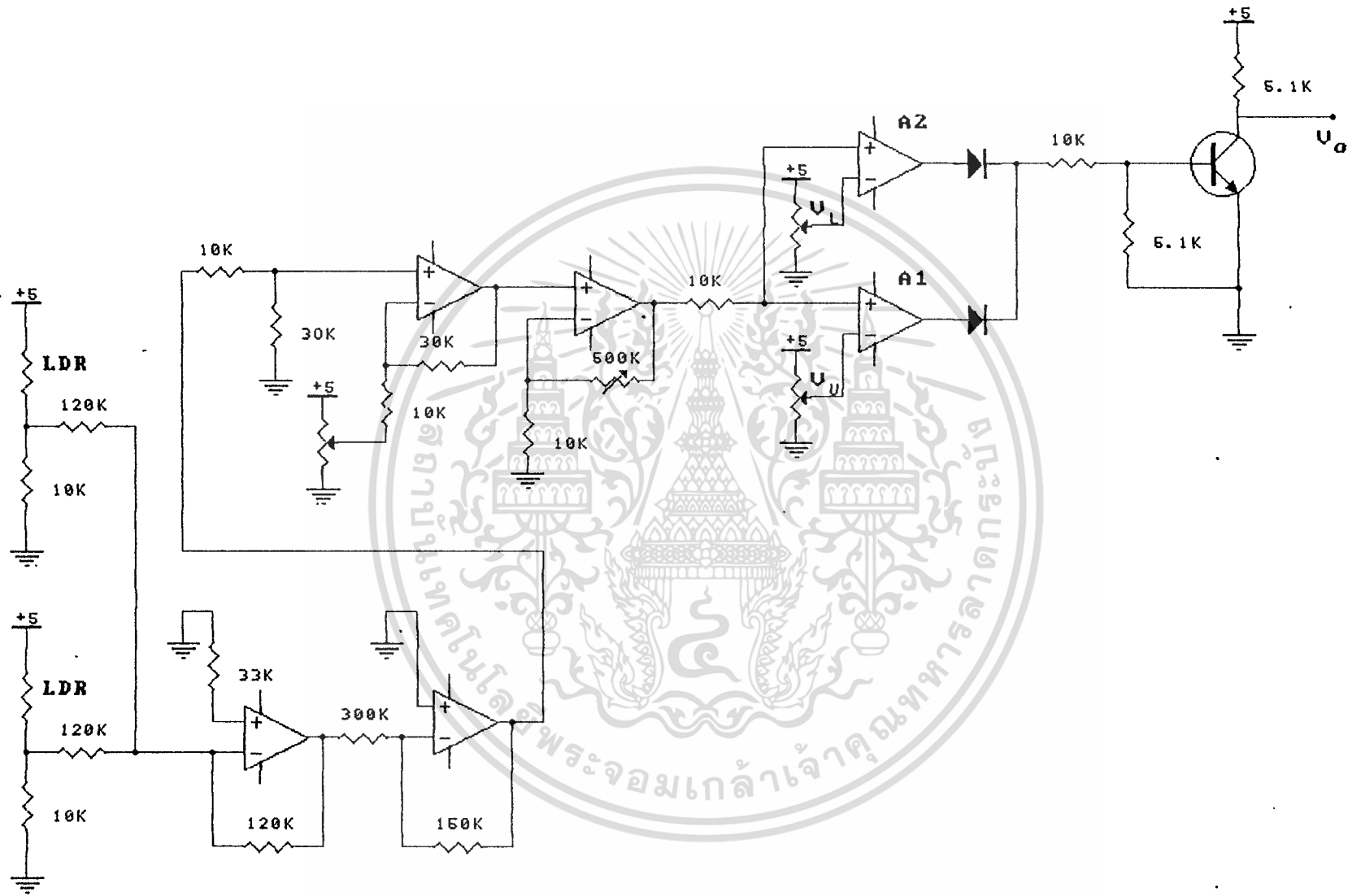
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR สี่

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า SENSOR ที่เราใช้งานคือ LDR ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง ประเภท Photoconductive โดยที่ตัว LDR นี้ จะมีค่าความต้านทานแปรผันกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ ถ้าความเข้มของแสงมาก ค่าความต้านทานของ LDR ก็จะน้อยลง และถ้าความเข้มแสงที่ตกกระทบน้อย ค่าความต้านทานของ LDR ก็จะมากขึ้น

เมื่อมะเขือเทศเข้ามาอยู่ในตำแหน่งที่จะทำการวัด ความเข้มของแสงที่มาตกกระทบที่ตัว LDR ก็จะเปลี่ยนไปตามสีของผลมะเขือเทศนั้น มีผลทำให้ความต้านทานของ LDR ทั้ง 2 ตัว มีการเปลี่ยนค่าตามไปด้วย ระดับโวลเตจ จากวงจร Divider ของ LDR ทั้ง 2 ตัว จะถูกส่งผ่านมายังวงจร Summing Amplifier และวงจร Inverting Amplifier ซึ่งมีอัตราขยายเป็น  $1/2$  ( $V_o = [V_1 + V_2] / 2$ ) เพื่อจะหาค่าเฉลี่ยของระดับโวลเตจทั้ง 2 ว่าจะจะเป็นค่าที่ยอมรับหรือไม่

สัญญาณ output ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ย จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณ  $V_U$  และ  $V_L$  ในวงจร WINDOW COMPARATOR ซึ่งเราตั้งระดับโวลเตจมาตรฐานไว้แล้ว ถ้าระดับสัญญาณไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ (สีของมะเขือเทศไม่ได้มาตรฐานที่เรากำหนดไว้) จะได้ระดับสัญญาณ output ของวงจร WINDOW COMPARATOR เป็น HIGH (5V.)



รูปที่ 33 แสดงวงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR สี

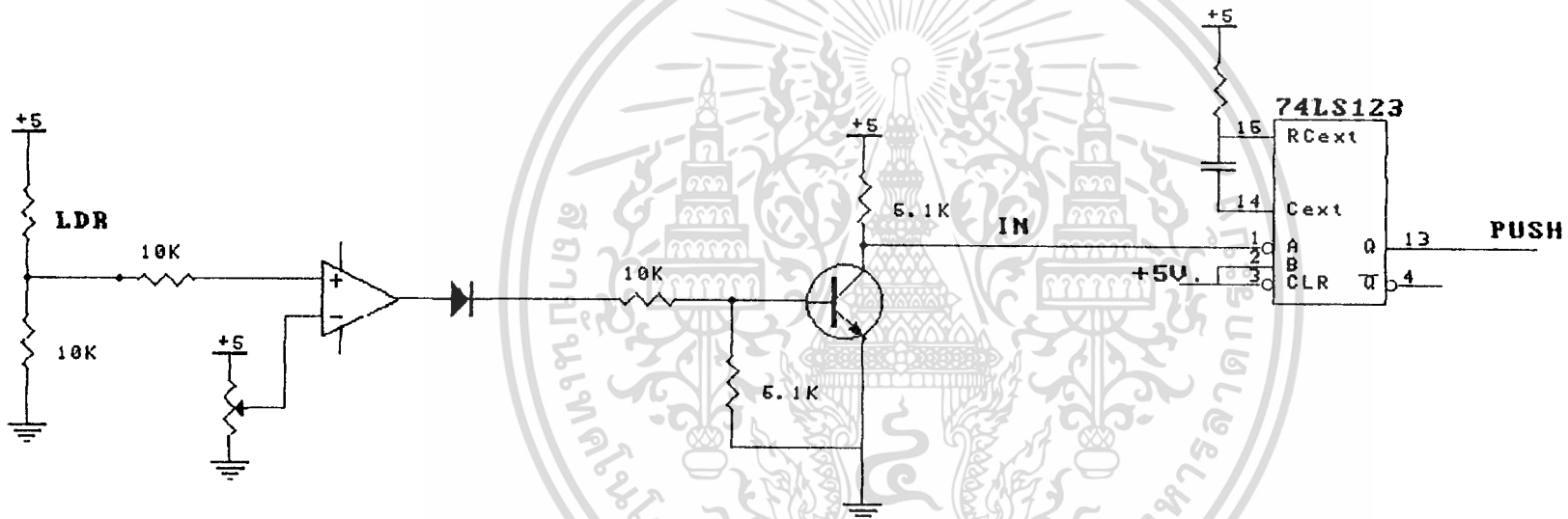
### วงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR ตำแหน่งของมะเขือเทศ

วงจรนี้เป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบว่า มีมะเขือเทศเข้ามาอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการจะวัดแล้วหรือยัง โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับรู้ก็จะใช้ LDR เช่นเดียวกับในส่วนที่ใช้ในการวัดสี

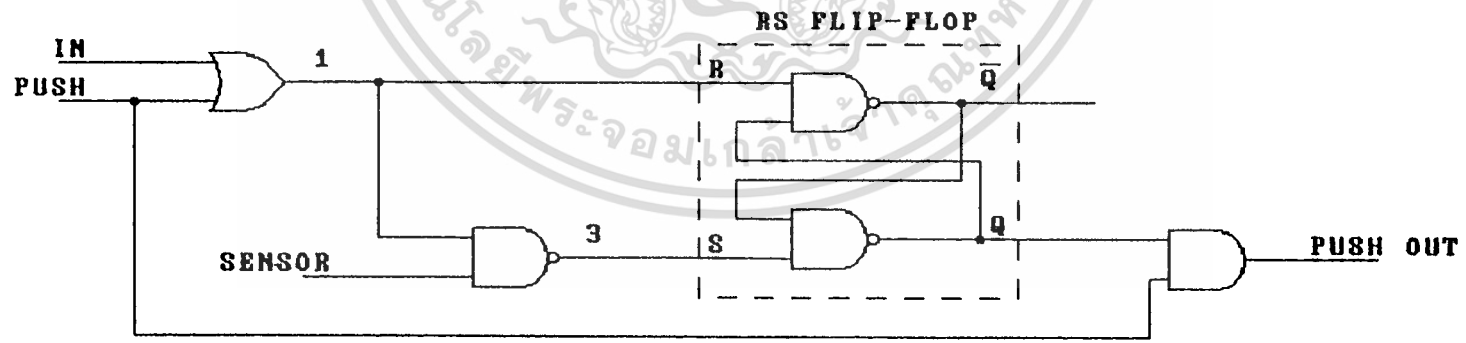
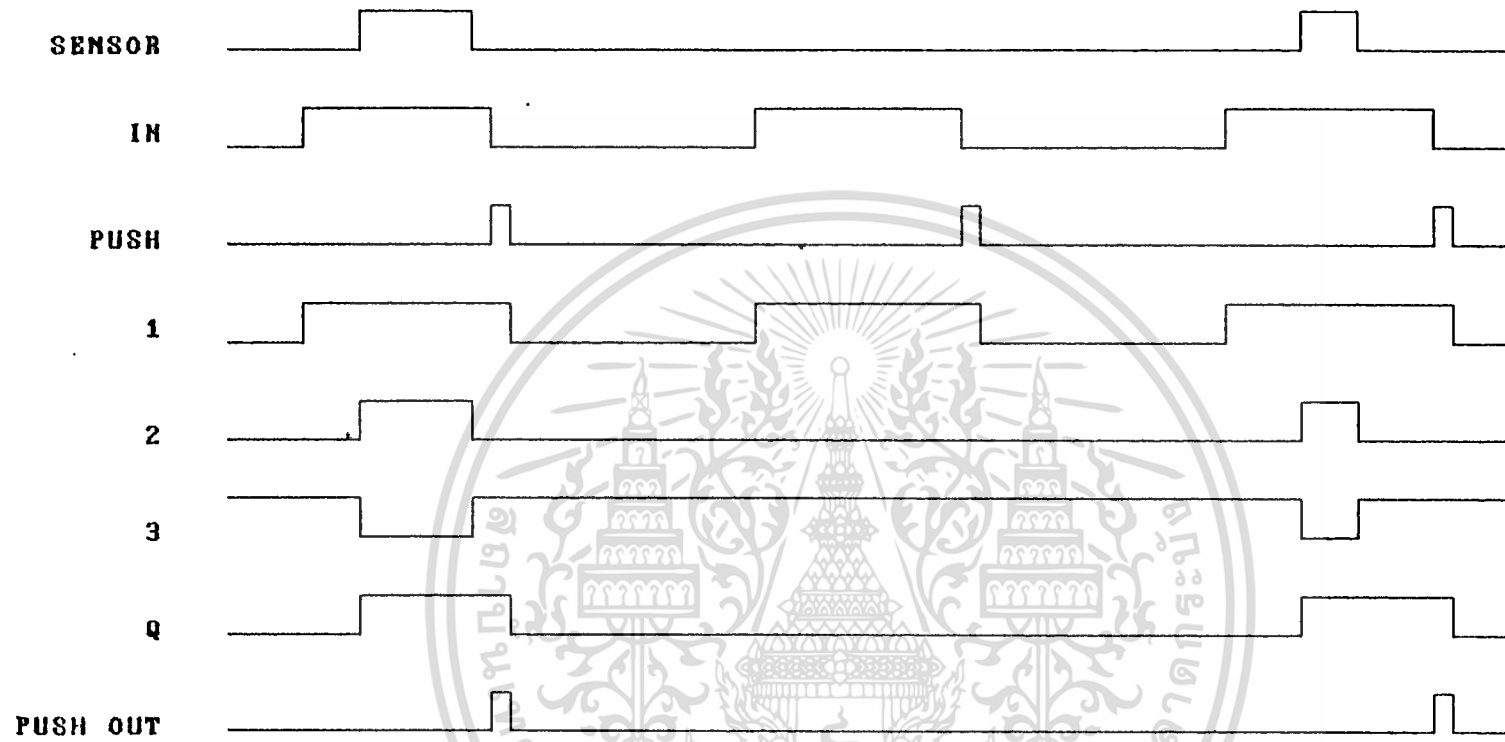
จากรูปในการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ เราจะใช้แสงไฟจากหลอดไฟส่องไปที่ตัว LDR เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาบังแสงที่มาตกกระทบ ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของ LDR เปลี่ยนแปลงไป (เพิ่มขึ้น)

สัญญาณ output จากวงจร divider จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระดับโวลเตจอ้างอิง ว่ามากกว่าระดับโวลเตจที่เราปรับค่าไว้หรือไม่ ถ้าระดับสัญญาณ output ของวงจร divider สูงกว่า แสดงว่ามีมะเขือเทศเข้ามาแล้ว ซึ่งเราจะได้ output ของ Comparator เป็น HIGH ส่วนในกรณีที่ไม่มีมะเขือเทศ จะได้ output ออกมาเป็น LOW

สัญญาณ output ของ Comparator นี้จะถูกส่งผ่านมายังวงจร Monostable ที่ใช้ในการตรวจสอบขอบเขตของสัญญาณ เพื่อที่จะใช้ในการรับรู้ว่ามีมะเขือเทศที่ทำการวัดสีได้ทำการวัดสีเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 34 แสดงวงจรที่ใช้ในส่วน SENSOR ตำแหน่งของมะเขือเทศ



รูปที่ 35 แสดง TIMING DIAGRAM ของสัญญาณ



รูปที่ 36 แสดงวงจรรวมในการคิดผล

### วงจรรวมของระบบ SENSOR สี่

วงจรที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริงจะเป็นไปตามรูปที่ จากรูปวงจรจะเห็นได้ว่า ใช้ LDR 2 ตัว จะสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า ซึ่งทำให้ผลการตรวจวัดได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่า หลังจากนั้นจะนำค่าโวลเตจจาก LDR ทั้งสองมาทำการเฉลี่ยสัญญาณโดยผ่านวงจร Summing Amp. และวงจร Inverting Amp. นำสัญญาณที่เฉลี่ยได้นี้ไปผ่านวงจร SENSOR ในการใช้งานวงจร SENSOR จะต้องปรับค่า ZERO และ SPAN ซึ่งในการปรับนี้จะกระทำเพื่อให้ระดับโวลเตจระหว่างการดำเนินงานอยู่ภายในช่วงของ SPAN นี้ เพื่อสะดวกสำหรับวงจร WINDOW COMPARATOR ในการเปรียบเทียบกับค่าของสปีมาตรฐาน

การปรับตั้งค่าสปีมาตรฐานนี้สามารถทำได้โดย นำมะเขือเทศที่มีสปีมาตรฐาน (มีความเข้มของสีแดงน้อยที่สุดเท่าที่จะยอมรับได้) ตามที่ต้องการใส่เข้ามาในเครื่องตรวจวัด หลังจากนั้นทำการปรับค่าของ LOWER ในวงจร WINDOW COMPARATOR ให้ได้ค่าเท่ากับค่าโวลเตจที่อ่านได้จากการวัดในขณะนั้น

หลังจากปรับตั้งค่าสปีมาตรฐานเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถใช้งานวงจรได้โดย ผ่านผลมะเขือเทศเข้ามาในเครื่องตรวจวัด ในขณะที่มีมะเขือเทศผ่าน วงจร SENSOR ก็จะทำการตรวจวัดสี ถ้าสีของมะเขือเทศต่ำกว่ามาตรฐาน ระดับสัญญาณ input ที่เข้ามาในวงจร WINDOW COMPARATOR ก็จะสูงกว่าค่า LOWER ที่ตั้งไว้ ทำให้ได้ output ของ วงจร WINDOW COMPARATOR เป็น HIGH (5V.) แต่ถ้าสีของมะเขือเทศได้มาตรฐาน โวลเตจที่วัดได้ก็จะต่ำกว่าค่า LOWER จึงทำให้ได้สัญญาณ output ออกมาเป็น LOW (0V.)

สัญญาณที่ได้จากวงจร SENSOR สี่นี้ เราจะนำมาประมวลผลรวมกับ สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับตำแหน่งของมะเขือเทศ ซึ่งในการทำงานของวงจรตรวจจับตำแหน่งนี้ ในขณะที่ไม่มีมะเขือเทศผ่านจะต้องทำการปรับค่าโวลเตจอ้างอิงที่ Inverting input ของ Comparator ให้มีค่าสูงกว่าค่าโวลเตจจาก LDR ซึ่งอยู่ที่ Non-inverting input เล็กน้อย ในขณะที่มีมะเขือเทศผ่านเข้ามาจะทำให้ระดับโวลเตจจาก LDR สูงขึ้นมากกว่าโวลเตจอ้างอิง จึงทำให้ได้ output ของ Comparator เป็น HIGH (5V.) จนกระทั่งมะเขือเทศผ่านไปแล้ว ระดับสัญญาณก็จะกลับมาเป็น LOW จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้นี้ไปผ่านวงจร Monostable (IC 74LS123) เพื่อตรวจจับขอบขาลงของสัญญาณนี้ ดังนั้นเราจะได้สัญญาณ pulse ออกมาเมื่อมะเขือเทศผ่านออกมาจากเครื่องตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานวงจรที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณก็จะเป็นไปตาม TIMING DIAGRAM ที่ได้แสดงมาแล้ว ซึ่งจาก TIMING DIAGRAM แสดงให้เห็นว่าสามารถตัดแยกสี่ของมะเขือเทศได้ ถ้าสี่ของมะเขือเทศต่ำกว่ามาตรฐานก็จะให้สัญญาณ pulse ออกมาเมื่อมะเขือเทศผ่านเครื่องตรวจวัดแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

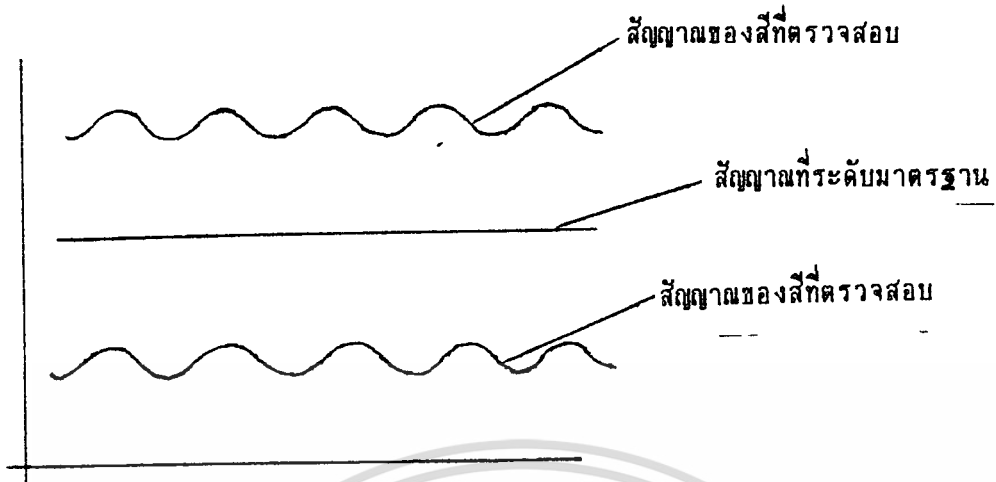
## บทที่ 5

### สรุปผลและวิจารณ์

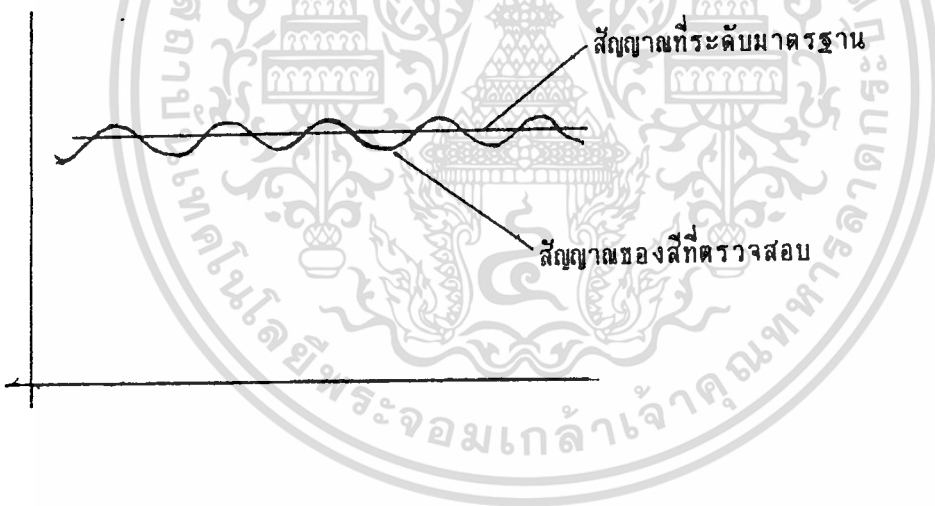
สำหรับผลการดำเนินงาน ในขั้นต้นของการดำเนินงานจะเป็นการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง ที่สามารถหาง่าย ราคาถูก มาทำการทดลอง เพื่อหาอุปกรณ์ที่จะให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมกับโครงงาน ซึ่งจากผลการทดลอง เราได้ว่า LDR เป็นอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสม เนื่องจากมีความไวพอสมควร และมีช่วงผลตอบสนองที่กว้าง

ในขั้นต่อมา เป็นการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในสภาวะแสงที่ต่างกันว่าสภาวะแสงใดสามารถให้ผลในช่วงที่กว้างและสามารถแยกสีได้อย่างชัดเจน ซึ่งจากผลการทดลอง สภาวะแสงที่ใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

หลังจากได้สภาวะแสงที่ต้องการ ก็ได้ทำการทดลองวงจรเปรียบเทียบสีที่ออกแบบไว้ จากการทดลองเราสามารถแยกสีที่ต่างจากสีมาตรฐานที่ตั้งเอาไว้ได้ แต่จะเกิดปัญหาคือ สามารถแยกได้เฉพาะสีที่แตกต่างจากสีมาตรฐานอย่างเห็นได้ชัด ส่วนสีที่ใกล้เคียงกับสีมาตรฐานไม่สามารถแยกได้อย่างเด่นชัด ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง สำหรับสาเหตุ จากการตรวจสอบก็เกิดจากการที่เราใช้แสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเมื่อใช้ตัว SENSOR วัดแสงที่สะท้อนออกมา เราจะได้สัญญาณออกมาเป็นสัญญาณรูป sine ซึ่งมีความถี่ 50 HZ เท่ากับความถี่ของแสงไฟ และ เมื่อนำสัญญาณนี้ไปผ่านวงจรเปรียบเทียบสี ถ้าสีที่ต่ำกว่ามาตรฐานมากๆ ก็จะได้ดังรูปที่ 37 และ ถ้าใกล้เคียงกันก็จะเป็นดังรูปที่ 38 ซึ่งจะมีช่วงที่ต่ำและสูงกว่าค่ามาตรฐานทำให้ไม่สามารถแยกสีได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 37 แสดงระดับสัญญาณเมื่อลิที่ตรวจสอบต่างจากสีมาตรฐานมากๆ



รูปที่ 38 แสดงระดับสัญญาณเมื่อลิที่ตรวจสอบมีความใกล้เคียงกับสีมาตรฐาน

ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาจึงจะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไฟกระแสดตรง เพื่อให้ได้แสงไฟที่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้สัญญาณไม่เป็นสัญญาณรูป sine

หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบวงจรรวมทั้งหมด และทำการทดลองวงจร ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ของโครงการนี้ว่า ระบบ SENSOR สามารถคัดแยกสีของมะเขือเทศได้ โดยเราสามารถที่จะตั้งค่าของสีมาตรฐานของมะเขือเทศไว้ที่ใดก็ได้ เมื่อเราใส่มะเขือเทศผ่านเข้ามาในระบบ SENSOR ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามะเขือเทศมีสีต่ำกว่ามาตรฐาน ระบบ SENSOR ก็สร้างสัญญาณ pulse ออกมา 1 ลูก ในขณะที่มะเขือเทศเคลื่อนผ่านออกมา โดยสัญญาณ pulse ที่ได้สามารถนำไปต่อกับเครื่องคัดแยกผลผลิตผักต่อไปได้

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือ ในการคัดแยกนี้ มะเขือเทศที่ใช้จะต้องมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างผิวของมะเขือเทศกับตัว SENSOR ทั้ง 2 ตัว จะต้องมีค่าไม่ต่างกันมากนัก มิฉะนั้นค่าของระยะห่างนี้จะมีผลทำให้ระดับโวลเตจที่วัดได้ผิดพลาดไป นอกจากนี้ก็ปัญหาหนึ่งก็คือ การปรับค่า SPAN และ ZERO โดยใช้อ้างอิงที่ออกแบบมาจะเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในระหว่างที่ปรับเราไม่ทราบค่าของโวลเตจที่แท้จริงว่าห่างจาก ZERO หรือ SPAN เป็นเท่าไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้