



รายงานการวิจัย

การตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำยางพาราโดยวิธีการทางแสง

Measurement of Para rubber Latex Concentration Using Optical Method

โดย

RCB

TK

48486

ร.251

พิมล ผลพฤกษา

อิทธิพล พจนลัจ

อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ

พรรณนิภา ชัยยศ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

73028

27 ส.ย. 2550

กิติพล ชิตสกุล (ที่ปรึกษาโครงการวิจัย)

b. 11768046  
i. ....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2549

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิมล ผลพฤษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชื่อโครงการวิจัย

(ภาษาไทย) การตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำยางพาราโดยวิธีการทางแสง

(อังกฤษ) Measurement of Para rubber Latex Concentration Using Optical Method

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ประจำปี 2549 จำนวนเงิน 367,580 บาท

ระยะเวลาการทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2548 ถึง เดือนกันยายน 2549

## หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัยพร้อมหน่วยงานที่สังกัดและหมายเลขโทรศัพท์

แผนก/ภาควิชา	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
กอง/คณะ	วิทยาเขตชุมพร
กรม/มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กระทรวง	ทบวงมหาวิทยาลัย
ที่อยู่	17/1 หมู่ 6 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160
โทรศัพท์	0-7750-6422
โทรสาร	0-7750-6410

## คณะผู้วิจัย และสัดส่วนที่ทำงานวิจัย

### 3.1 ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

นายกิติพล ชิตสกุล

Mr.Kitiphol Chitsakul

ตำแหน่ง หัวหน้าภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง แขวง/เขต

ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

### 3.2 หัวหน้าโครงการวิจัย

นายพิมล ผลพฤษา

Mr. Phimon Phonphruksa

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

## 3.3 ผู้ร่วมวิจัย

## 3.3.1 นายอิทธิพล พจนสัจ

Mr. Itiphol Potejanasaja

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

## 3.3.2 นายอรรถศาสตร์ นาคเทวัญ

Mr. Autthasat Naktawan

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

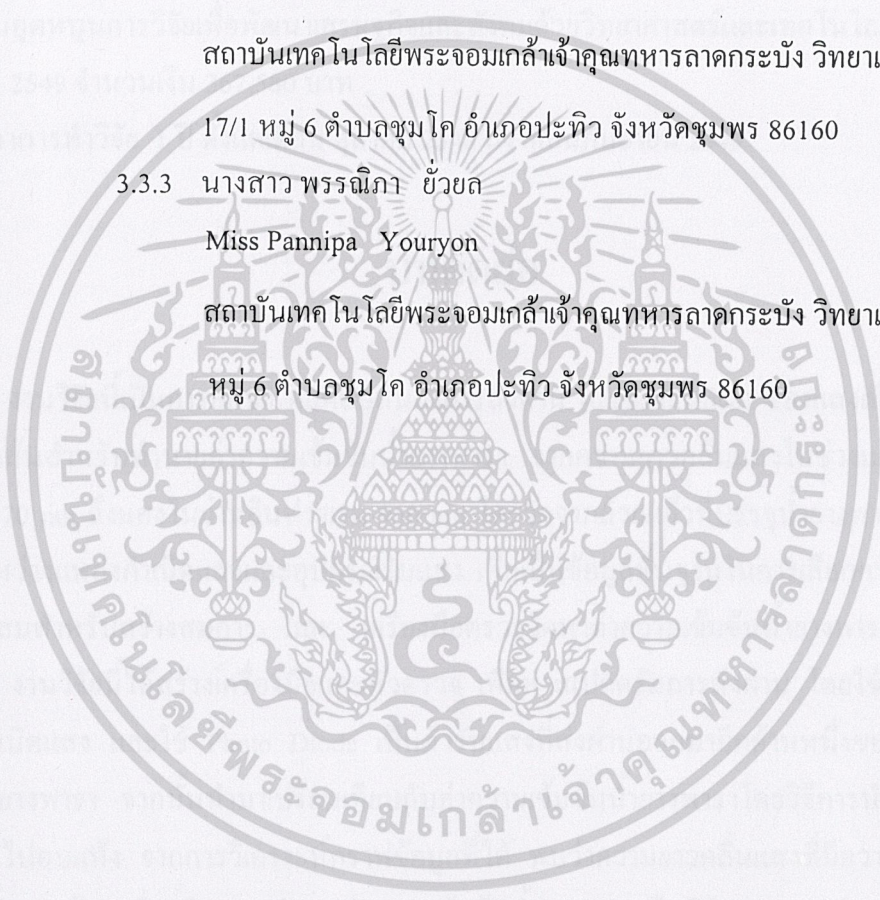
17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

## 3.3.3 นางสาวพรรณีภา ชัยยศ

Miss Pannipa Youryon

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชื่อโครงการวิจัย การตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำยางพาราโดยวิธีการทางแสง

ชื่อผู้วิจัย นายพิมล ผลพุกงษา  
 นายอิทธิพล พจนสัง  
 นายอรรถศาสตร์ นาคเทวัญ  
 นางสาว พรรณิภา ยั่วยล  
 นายกิตติพล ชิตสกุล (ที่ปรึกษาโครงการวิจัย)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 ประจำปี 2549 จำนวนเงิน 367,580 บาท  
 ระยะเวลาการทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2548 ถึง เดือนกันยายน 2549

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ผลตอบสนองการส่งผ่าน (transmittance) ของแสงเพื่อหาสมการแบบเชิงเส้นสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา จากความยาวคลื่นแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต 370 nm ถึงแสงในย่านอินฟราเรด 950 nm โดยวัดจากถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพาราจะอยู่ตรงกลางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสร้างสมการ และ เครื่องมือตรวจวัดหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีการทางแสง งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องมือและหัตถตรวจ เพื่อหาสเปกตรัมการส่งผ่าน โดยใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้ Photo Diode เป็นตัวรับแสงที่ส่งผ่านออกมาอีกด้านหนึ่งของถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยวิธีการนำตัวอย่างน้ำยางพาราไปอบแห้ง จากการวิเคราะห์กราฟข้อมูลที่ได้ พบว่าความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้สำหรับนำมาสร้างเครื่องมือตรวจวัดหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีการทางแสง อยู่ในช่วง 370-426 nm และในช่วง 625 – 645 nm จากนั้นได้เลือกความยาวคลื่นแสง 400 nm, 630 nm และ 645 nm สำหรับวัดค่าการส่งผ่านและสร้างสมการในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา จากสมการแบบเชิงเส้น โดยใช้แสงสองความยาวคลื่น สามารถทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากการทำให้แห้ง จากข้อมูล 20 ครั้ง มีความผิดพลาดน้อยกว่า 5 % ถูกต้องเป็นจำนวนมากกว่า 18 ครั้ง (90 % จาก 20 ครั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Research Title

### Measurement of Para rubber Latex Concentration Using Optical Method

**Research Team:** Mr. Phimon Phonphruksa

Mr.Itiphol Potejanasaja

Mr. Autthasat Naktawan

Miss Pannipa Youryon

Mr.Kitiphol Chitsakul (Advisor)

## ABSTRACT

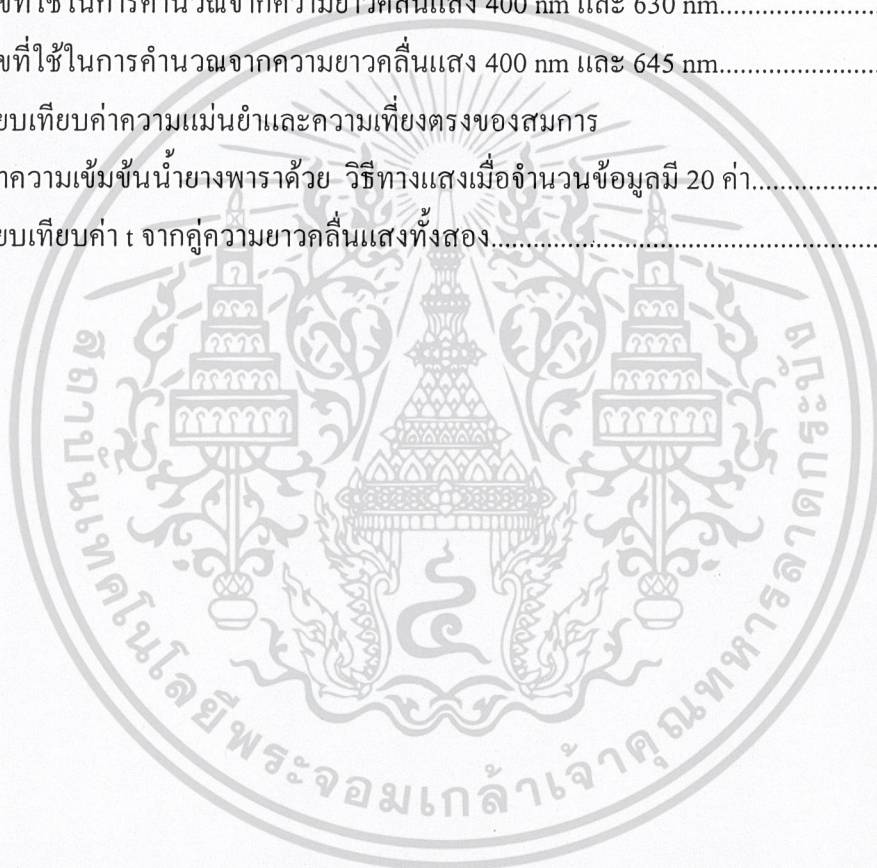
The objective of the present study is to investigate an optical transmittance system for prediction percentage of Latex concentrate from Para Rubber Milk by linear equation from the wavelength in the range of 370 nm to 950 nm. We constructed a simplified system with a light detecting by probe (placed LED and Photo Diode opposite side of glass cup were contained Para rubber milk) to determine the transmittance spectra. We compared the results from our simplified measurement system with the Dry rubber content method. From the analysis, we discovered that wavelengths between 370 nm to 426 nm, and between 625 to 645 nm are potential optimal choices for use to predict the Latex concentration value. Then, Three LEDs (400 nm, 630 nm and 645 nm) were used as the source which shone light through a glass cup, while the photodiode was placed at the opposite side of the glass cup for light transmission detection. We calibrated our system with the 20 sample Latex concentration levels measured by the Dry rubber content method to obtain the linear equation model. We compared the results of our linear equation model for predicting the Latex concentration levels with measured Latex concentration levels from the Dry rubber content method. From our analysis, the error obtained from the linear equation was less than 5% in more than 18 samples of the 20 collected data from the sample of Para rubber milk.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อ.....	IV
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อยาง ในน้ำยางพาราด้วยวิธีการทางแสง.....	8
บทที่ 3 ไดโอดเปล่งแสง โฟโตไดโอด วงจรขยายสัญญาณ และรูปแบบของหัวตรวจ.....	25
บทที่ 4 เครื่องมือและหัวตรวจ (Probe) สำหรับวัดค่าการส่งผ่าน.....	46
บทที่ 5 ความยาวคลื่นแสงสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา.....	55
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดลองและค่าความผิดพลาด.....	69
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตัวอย่างรายละเอียดของ LED ที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.2 รายละเอียด Photo Diode ที่ใช้ในการทดลอง.....	51
5.1 ค่าความเข้มข้นน้ำยาที่ทำการศึกษาในการทดลองครั้งที่ 1.....	57
5.2 จำนวนครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 2.....	57
5.3 ค่าตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm.....	66
5.4 ค่าตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 645 nm.....	68
6.1 การเปรียบเทียบค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของสมการ ทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราด้วย วิธีทางแสงเมื่อจำนวนข้อมูลมี 20 ค่า.....	71
6.2 การเปรียบเทียบค่า $t$ จากคู่ความยาวคลื่นแสงทั้งสอง.....	72



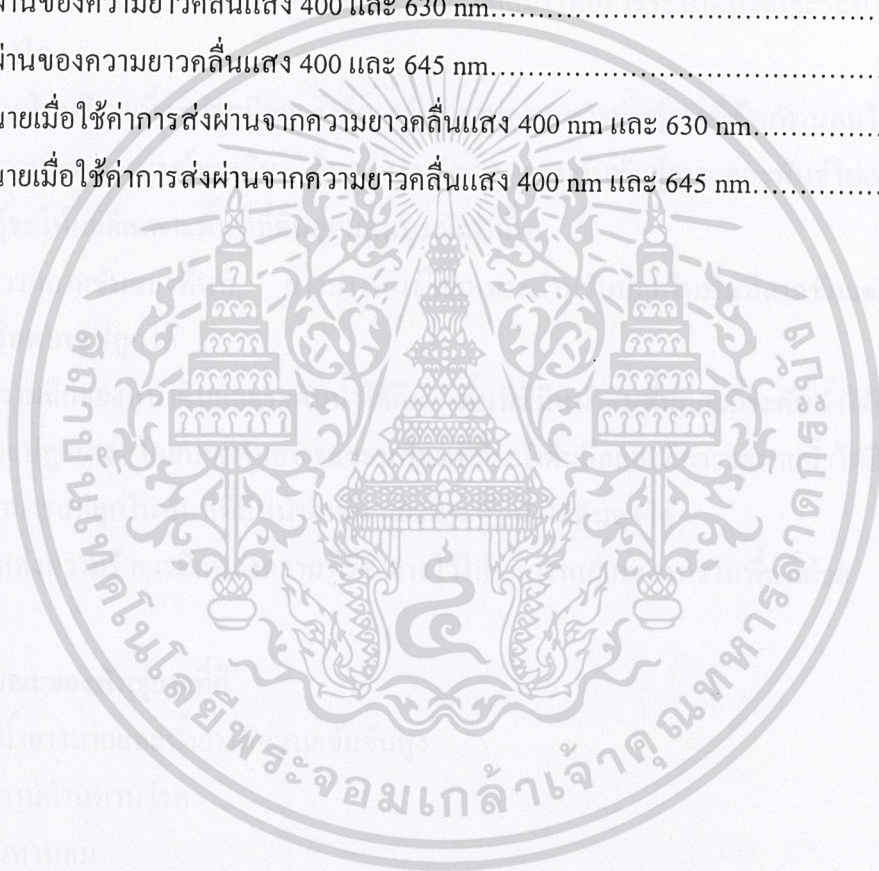
# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วิธีการตลาดยางพารา.....	2
1.2 เมโทเรล็ค หรือ ลาเทคโซมิเตอร์.....	4
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านและการดูดกลืนของแสง.....	11
2.2 การดูดกลืนของเม็ดเลือดแดงที่จับตัวกับออกซิเจน (HbO <sub>2</sub> ) และที่ไม่จับตัวกับออกซิเจน (Hb).....	14
2.3 การดูดกลืนของความเข้มข้นน้ำยางพาราค่าต่างๆต่อความยาวคลื่นแสง.....	15
2.4 องค์ประกอบของน้ำยางพาราที่มีผลต่อค่าการส่งผ่านแสง.....	17
3.1 พื้นฐานการทำงานของ LED.....	27
3.2 กราฟกระแสและแรงดันในขณะได้รับไบอัสตรงของ LED.....	29
3.3 มุมของแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED.....	30
3.4 การจัดวงจรขับ LED แบบพื้นฐาน.....	31
3.5 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ P-N เมื่อได้รับแสง.....	32
3.6 พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด.....	33
3.7 กราฟกระแสเข้าที่พู่ทที่ความเข้มแสงค่าต่างๆของโฟโตไดโอด.....	35
3.8 ลักษณะของ P-I-N โฟโตไดโอด.....	36
3.9 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตไดโอด.....	38
3.10 วงจรขยาย Transimpedance แบบพื้นฐาน.....	39
3.11 หัวตรวจชนิดตรวจรับค่าการส่งผ่าน.....	44
3.12 หัวตรวจแบบตรวจรับค่าการสะท้อนกลับ.....	45
4.1 โครงสร้างหัวตรวจสำหรับวัดค่าการส่งผ่านแสงจากถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา.....	47
4.2 ถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา.....	47
4.3 Block diagram การทำงานของเครื่องมือสำหรับวัดหาค่าการส่งผ่าน.....	48
4.4 ลักษณะของหัวตรวจที่บรรจุ LED และ โฟโตไดโอด.....	49
4.5 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์และส่วนที่ทำหน้าที่เลือก LED ทีละดวง.....	52
4.6 วงจรรับสัญญาณอินพุทจากการกด Switch เลือก LED ให้เปล่งแสง.....	53
4.7 วงจรแสดงผลโดยใช้ไอซี TSL230R ที่ให้เอาต์พุตออกมาเป็นความถี่.....	54
4.8 จอแสดงผลแบบ LCD.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ลักษณะกราฟการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงในช่วง 370 – 950 nm.....	59
5.2 การส่งผ่านความยาวคลื่นแสง 625, 630, 635 และ 645 nm.....	60
5.3 การส่งผ่านความยาวคลื่นแสงในช่วง 370 nm ถึง 426 nm.....	61
5.4 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400, 630 และ 645 nm.....	63
5.5 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400 และ 630 nm.....	65
5.6 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400 และ 645 nm.....	65
5.7 การทำนายเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm.....	67
5.8 การทำนายเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 645 nm.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันนี้ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย [1-5] เป็นผลให้เกษตรกรนิยมปลูกกันเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกษตรกรทางภาคใต้ซึ่งจะมีพื้นที่ สภาพแวดล้อมเหมาะสมในการปลูกยางพารา เกษตรกรที่จะปลูกยางพาราจะต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจคือ

1. โรคยาง ในแต่ละท้องถิ่นมีการระบาดของโรคแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ดังนั้นก่อนที่จะปลูกยางพาราควรศึกษาและพิจารณาก่อนว่าพื้นที่ที่จะปลูกมีโรคอะไรระบาดบ้างและระบาดรุนแรงมากน้อยเพียงใด

2. ลม ในบริเวณที่จะปลูกมีลมแรงก็ควรพิจารณาปลูกเฉพาะพันธุ์ยางที่ต้านทานลมได้ดี

3. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดินแต่ละชนิดเหมาะสมกับพันธุ์ยางแต่ละพันธุ์ไม่เหมือนกัน บางพันธุ์จะให้ผลดีเฉพาะพื้นที่ที่ดินอุดมสมบูรณ์เท่านั้น

4. ความลาดชันของพื้นที่ บางพันธุ์ไม่เหมาะสำหรับปลูกในพื้นที่ลาดชันแต่บางพันธุ์เหมาะสมหรือพอจะปลูกได้

5. ความลึกของหน้าดินและระดับน้ำใต้ดิน พื้นที่ที่มีหน้าดินตื้นและมีระดับน้ำใต้ดินสูงไม่เหมาะสมที่จะปลูกยาง โดยปกติต้นยางจะชอบพื้นที่ที่มีหน้าดินลึกและมีการระบายน้ำได้ดี แต่บางพันธุ์ก็สามารถปลูกในพื้นที่ที่มีหน้าดินตื้นและมีระดับน้ำใต้ดินสูงได้

6. แหล่งความรู้ ควรมีแหล่งความรู้เรื่องยางไว้ให้บริการแก่เกษตรกรในพื้นที่ด้วย

### ลักษณะของพันธุ์ยางที่ดี

- ให้น้ำยางมากและน้ำยางมีความเข้มข้นสูง
- มีความต้านทาน โรค
- ต้านทานลม
- เจริญเติบโตเร็วและสม่ำเสมอทั้งก่อนกรีดและหลังกรีด
- เป็นโรคเปลือกแห้งน้อย
- เปลือกที่กรีดแล้วออกเร็วและหนาใกล้เคียงกับเปลือกเดิม
- หากใช้สารเคมีเร่งน้ำยางช่วย จะได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นมาก

### ชนิดของพันธุ์ยางที่เกษตรกรนิยมปลูกกัน

พันธุ์ยางชั้น 1 ได้แก่ ยางพันธุ์ดี เกษตรกรจะปลูกโดยไม่จำกัดพื้นที่ปลูก เช่น

เอกสารนี้เป็นเอ BPM 24 , สงขลา 36 , RRIM 600 , GT 1 , PR255 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PR261

พันธุ์ยางชั้น 2 ได้แก่ ยางพันธุ์ดี เกษตรกรจะปลูก โดยจำกัดพื้นที่ปลูก ปลูกได้ไม่เกิน ร้อยละ 30 ของพื้นที่ปลูกยางที่ถือครอง แต่ละพันธุ์ควรปลูกไม่น้อยกว่า

7 ไร่ เช่น PB 217, RRIC 110, RRIC 100, PB 260,

PB 255, PB 235

พันธุ์ยางชั้น 3 ได้แก่ พันธุ์ยางดี เกษตรกรจะปลูก โดยจำกัดพื้นที่ปลูก ปลูกได้ไม่เกิน ร้อยละ 20 ของพื้นที่ปลูกยางที่ถือครอง แต่ละพันธุ์ควรปลูกไม่น้อยกว่า

7 ไร่ เช่น KRS 251, PR 350, PR 302, RRIC 101,

BPM 1, RRIM 712, KRS 250, KRS 226, KRS

225, KRS 218, PB 311, RRIC 121

### วิธีการตลาดยางพารา



### รูปที่ 1.1 วิธีการตลาดยางพารา

#### การหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง

น้ำยาง หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า น้ำยางสด ซึ่งในที่นี้จะหมายถึง น้ำยางที่กรีดได้จากต้นยางพารา ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น มีกลิ่นหอมเล็กน้อย มีความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นประมาณ 0.98

#### ส่วนประกอบของน้ำยาง

1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง ประมาณ 22% - 48%

2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง ประมาณ 65%

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำ ประมาณ 60%

เอกสารนี้เป็น 2.2 ส่วนที่เป็นสารต่างๆ ประมาณ 5% การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อยางแห้ง คือ ปริมาณที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยาง เมื่อถูกทำให้เกิดการจับตัว อย่างสมบูรณ์จะสามารถนำไปรีดให้เป็นแผ่นบาง เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้แผ่นยางใส เมื่อนำไปช่างคำนวณออกมาแล้วจะสามารถบอกได้ว่ายางจำนวนนั้นมีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่เท่าใด

ปัจจุบันความต้องการของน้ำยางชั้นในวงการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางมีมากขึ้น ทำให้เกษตรกรชาวยางหันมาขายน้ำยางกันมากขึ้น แต่การซื้อขายน้ำยางสดนั้นราคาที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด ดังนั้นการหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด จะต้องถูกต้องและชัดเจน ซึ่งจะทำให้ได้รับความยุติธรรมทั้งผู้ซื้อและเกษตรกรชาวสวนยาง

การหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมปฏิบัติกันอยู่ในขณะนี้ มี 2 วิธี คือ

1. วิธีใช้เครื่องมือวัดเมโทรแล็ค (Metrolac)
2. วิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

#### วิธีใช้เครื่องมือเมโทรแล็ค

เมโทรแล็ค หรือ ลาเทคโซมิเตอร์ (Latexometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเข้มข้นของน้ำยาง ถ้าในน้ำยางมีอนุภาคของน้ำยางหนาแน่นมาก (ปริมาณเนื้อยางมาก) เมโทรแล็คก็จะจมลงมาก ค่าที่อ่านได้ค่าเนื้อยางสูง แต่ถ้าหากน้ำยางมีอนุภาคของน้ำยางหนาแน่นน้อย (ปริมาณเนื้อยางน้อย) เมโทรแล็คก็จะจมลงไปน้อย ค่าที่อ่านได้ค่าเนื้อยางต่ำ

วิธีการหาค่าปริมาณเนื้อยางแห้งโดยใช้วิธีนี้จะเป็นที่นิยมใช้ในภาคสนาม เช่น โรงงาน และจุดรับซื้อน้ำยางในสวนยางขนาดใหญ่ซึ่งจะคำนวณหาปริมาณเนื้อยางแห้งได้เร็ว เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่ผลที่ได้จากการวัด จะเป็นค่าคะแนนเท่านั้น ทำให้เกิดข้อผิดพลาดค่อนข้างสูง

#### ข้อพึงระวังในการใช้เมโทรแล็ค

1. ไม่เจือปนสิ่งอื่นใดลงในน้ำยางโดยเด็ดขาด
2. น้ำที่นำมาผสมในน้ำยางจะต้องสะอาดและควรมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับน้ำยาง
3. ผสมน้ำยางกับน้ำสะอาดในอัตรา 1:2 หรือ 1:1
4. ต้องล้างเมโทรแล็คให้สะอาด และในขณะที่ใช้ต้องแช่เมโทรแล็คลงในน้ำที่เตรียมไว้ เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ และลดแรงตึงผิว
5. ต้องอ่านค่าเมโทรแล็คขณะหยุดนิ่ง และอ่านที่บริเวณผิวหน้ายางตัดกับก้านเมโทรแล็คเท่านั้น

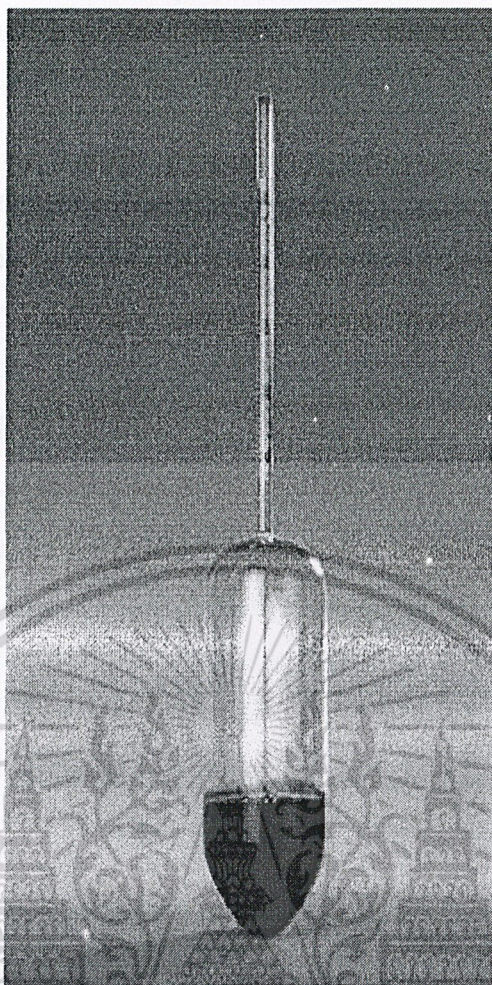
#### ชนิดของเมโทรแล็ค

เมโทรแล็คที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 2 ระบบ คือ

-ระบบอังกฤษ

-ระบบเมตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 เมโทรเล็ก หรือ ลาเทคโซมิเตอร์

#### ขั้นตอนการวัดค่าเนื้อยางแห้งโดยใช้เมโทรเล็ก

1. ก่อนใช้เมโทรเล็กควรแช่เมโทรเล็กในกระบอกบรรจุน้ำสะอาดที่เตรียมไว้ เพื่อให้อุณหภูมิคงที่และช่วยลดแรงตึงผิว
2. ตวงน้ำยางที่ต้องการวัด 1 ส่วน ผสมกับน้ำสะอาด 1 หรือ 2 ส่วน เทลงในกระบอกตวงแล้วกวนให้เข้ากัน
3. เป่าฟองอากาศที่ลอยอยู่บนผิวเหนือกระบอกตวงให้หมด แล้วค่อยๆ หย่อนเมโทรเล็กลงไป ในกระบอกตวงแล้วปล่อยให้ลอยอย่างอิสระ
4. เมื่อเมโทรเล็กหยุดนิ่งแล้วอ่านค่าที่ก้านเมโทรเล็ก โดยอ่านที่บริเวณผิวน้ำตัดกับเมโทรเล็ก
5. ค่าที่อ่านได้หากผสมน้ำ 1 ส่วน น้ำยาง 1 ส่วน ให้คูณด้วย 2 หากผสมน้ำ 2 ส่วน น้ำยาง 1 ส่วน ให้คูณด้วย 3

### ตัวอย่างระบบอังกฤษ

สมมุติว่ายางมีความเข้มข้น 45% จะอ่านค่าได้จากเมโทรแล็คคือ

$$\text{ค่าที่อ่านได้} = 1.5$$

$$\text{ปริมาณเนื้อยางแห้ง} = 1.5 \times 3 = 4.5$$

(หมายความว่า น้ำยาง 1 แกลลอน มีเนื้อยางแห้งจำนวน 4.5 ปอนด์ หรือ 45%)

### ตัวอย่างระบบเมตริก

สมมุติว่ายางมีความเข้มข้น 45% จะอ่านค่าได้จากเมโทรแล็คคือ

$$\text{ค่าที่อ่านได้} = 150$$

$$\text{ปริมาณเนื้อยางแห้ง} = 150 \times 3 = 4.5$$

(หมายความว่า น้ำยาง 1 ลิตร มีเนื้อยางแห้งจำนวน 450 กรัม หรือ 45%)

### วิธีการคิดเงิน

ขายได้เงิน = (เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง / 100) x น้ำหนักยาง x ราคาต่อกิโลกรัม

ตัวอย่าง น้ำยาง 50 ลิตร (กิโลกรัม) วัดเนื้อยางแห้งได้ 45% ราคาน้ำยางรับซื้อ กิโลกรัมละ 30 บาท จะได้เงินเท่ากับ

$$\text{เงินที่ได้} = (45 / 100) \times 50 \times 30 = 675 \text{ บาท}$$

### วิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

วิธีนี้ส่วนมากผู้ซื้อน้ำยางสดจะนำมาตัดแปลงให้มีการปฏิบัติที่สะดวกและง่ายขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำสูงมาก เกษตรกรชาวสวนยางสามารถเรียนรู้ได้ไม่ยาก และสามารถนำไปปฏิบัติเองแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับพ่อค้าขายได้

ข้อดีของวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ คือ ให้ค่าความถูกต้องแม่นยำสูง

ข้อเสียของมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ คือ จะใช้เวลาดำเนินการ 1-2 วัน

### ขั้นตอนการหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้วิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

1. สุ่มตัดตัวอย่างน้ำยางที่ต้องการหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง
2. ชั่งน้ำยางตัวอย่างใส่จานๆ ละ 10 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งชนิดละเอียดหรือเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
3. เติมน้ำกลั่นหรือน้ำสะอาดลงในถ้วยๆ ละ ประมาณ 20 ซีซี
4. เติมกรดอะซิติก 2% ลงในถ้วยๆ ละ ประมาณ 15-20 ซีซี
5. วางไว้ให้ยางจับตัวประมาณ 30 นาที

6. นำยางแผ่นตัวอย่างที่จับตัวแล้วมารีดให้เป็นแผ่นให้มรขนาดบาง 2 มิลลิเมตร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำยางแผ่นตัวอย่างที่รีดจนบางแล้วล้างให้สะอาด
8. นำยางแผ่นตัวอย่างไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นานประมาณ 16 ชั่วโมง
9. นำยางแผ่นที่อบแห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จนน้ำหนัก แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งต่อไป
10. ทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้สูตร  
 เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง = (น้ำหนักแผ่นยางแห้ง / น้ำหนักยางสด) x 100

ตัวอย่าง

สมมติ

น้ำยางสดหนัก = 10 กรัม

แผ่นยางแห้งหนัก = 4.5 กรัม

เมื่อแทนค่าในสูตร จะได้

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง} &= (4.5 / 10) \times 100 \\ &= 45\% \end{aligned}$$

วิธีการคิดเงิน

ขายได้เงิน = (เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง / 100) x น้ำหนักของน้ำยาง x ราคาต่อกิโลกรัม

**ข้อได้เปรียบในการซื้อขายน้ำยาง**

เกษตรกรชาวสวนยาง

1. ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ การแปรรูปยางแผ่นดิบ เช่น ตะกง จักรรีด ยางและน้ำกรด
2. ไม่ต้องเสียเวลาในการทำยางแผ่น
3. ได้รับเงินจากการขายน้ำยางได้เร็วขึ้น เพราะไม่ต้องเสียเวลาคอยให้แผ่นยางดิบแห้ง ซึ่งต้องใช้เวลา 5-7 วัน
4. ซื้อขายตามราคาที่ตกลงกัน และตามน้ำหนักเนื้อยางแห้ง ซึ่งเกษตรกรไม่ต้องเสียเวลาในการต่อรองราคาเหมือนยางแผ่นดิบ
5. ผู้ซื้อหรือผู้ประกอบการโรงงานแปรรูปยาง จะนำภาชนะไปตั้งจุดรับซื้อน้ำยางที่ใกล้ที่สุด และสะดวกแก่เกษตรกรที่จะนำน้ำยางมาขายให้
6. ขายได้ในราคาที่สูงกว่ายางแผ่นที่ไม่ร่นควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาวิธีการสร้างเครื่องตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นของปริมาณยางในน้ำยางโดยวิธีการทางแสง
2. เพิ่มประสิทธิภาพ ความละเอียด การใช้งานที่ง่าย และรวดเร็ว ในการตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำยางพารา
3. เพื่อตรวจสอบ รักษาหรือเพิ่มมาตรฐาน ในการควบคุมคุณภาพของน้ำยางพาราไทย

## ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาและทดลองการวัดความเข้มข้นของน้ำยางพารา ซึ่งมีระยะเวลาในการศึกษาและทดลอง 1 ปี ซึ่งเนื้อหาภายในเล่มนี้จะประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความป็นมาของโครงการ รายละเอียดเกี่ยวกับยางพารา วิธีวัดค่าความเข้มข้นของน้ำยางที่นิยมใช้กัน วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงทฤษฎี กฎของ Beer คือ การลดทอนลงของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง ซึ่งทฤษฎีนี้สามารถนำหลักการมาใช้ประกอบกับโครงการนี้ได้ รวมทั้งที่มาของสมการต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 3 การเลือกใช้งานไดโอดเปล่งแสง (LED) และโฟโตไดโอด (Photo Diode) และแนวความคิดในการออกแบบชุดหัวตรวจ

บทที่ 4 การออกแบบการออกแบบหัวตรวจและลักษณะการใช้งาน รวมถึงวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 5 การหาความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมสำหรับสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยวิธีการทางแสง การทดลองและการหาตัวแปรต่างๆในสมการ

บทที่ 6 จะกล่าวถึงการทดลอง การวิเคราะห์ความแม่นยำ และข้อผิดพลาดต่างๆ

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อเยื่อ ในน้ำยาทางพยาธิวิทยาด้วยวิธีทางแสง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการที่สำคัญ สำหรับนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อเยื่อทางพยาธิวิทยาด้วยวิธีการทางแสง โดยเริ่มจากสมการพื้นฐานของ Beer's Law จากนั้นจะกล่าวถึงการส่งผ่านและการดูดกลืนของแสง การนำสมการของ Beer's Law มาประยุกต์ใช้สำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาทางพยาธิวิทยา ในบทนี้ได้นำเสนอสมการสองรูปแบบคือ สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาทางพยาธิวิทยาจากค่าการดูดกลืน (absorbance) [11-14] และอีกสมการหนึ่งใช้ค่าการส่งผ่าน (transmittance) การทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาทางพยาธิวิทยา ในการทดลองครั้งนี้จะเน้นการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาทางพยาธิวิทยาจากค่าการส่งผ่านแสงผ่านหลอดแก้วที่บรรจุน้ำยาทางพยาธิวิทยาเป็นหลัก

### 2.1 Beer's Law

Beer's Law กล่าวถึงการลดทอนลงของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความสม่ำเสมอ (uniform) จะถูกดูดกลืนจากสารประกอบที่อยู่ในตัวกลาง การดูดกลืนจะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear) กับความหนาแน่น (concentration) ของสารประกอบในตัวกลางนั้น เราสามารถเขียนสมการ Beer's Law ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$A = \epsilon(\lambda)cd \quad (2.1)$$

เมื่อ  $A$  คือการวัดค่าการดูดกลืน  $\epsilon(\lambda)$  เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ขึ้นกับแต่ละความยาวคลื่น  $c$  เป็นความเข้มข้นของสารละลายในตัวกลาง  $d$  เป็นความยาวของตัวกลางที่แสงส่งผ่าน โดยทั่วไปในการทดลองวัดค่าความเข้มข้น มักจะใช้ในรูปของการส่งผ่าน โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\epsilon(\lambda)cd} \quad (2.2)$$

เมื่อแสงที่ส่งผ่านเป็นแสงความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) และแสงที่ตกกระทบ (incident light) มีความเข้มแสงเป็น  $I_0$  แสงที่ตกกระทบตัวกลางจะแยกออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆด้วยกัน คือแสงส่วนหนึ่ง

จะส่งผ่านออกไปสู่อีกด้านหนึ่งของตัวกลาง (transmitted) แสงอีกส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน (absorbed) จากตัวกลาง ถ้าความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากตัวกลางคือ  $I$  ความเข้มที่ส่งผ่านออกมาจากตัวกลางนี้จะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล ตามระยะทางความยาวของตัวกลาง เมื่อ  $\epsilon(\lambda)$  คือ extinction coefficient หรือความสามารถในการดูดกลืนของสสารที่ค่าความยาวคลื่นแสงนั้นๆ  $c$  เป็นความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของตัวกลาง และ  $d$  เป็นระยะทางของตัวกลางที่แสงส่งผ่านโดยค่าความเข้มข้นของตัวกลางจะวัดในหน่วยของ  $\text{mmol L}^{-1}$  และ extinction coefficient จะคิดในหน่วย  $\text{L mmol}^{-1} \text{cm}^{-1}$  Beer's Law มีพื้นฐานมาจากคุณสมบัติการรวมกันของแสงที่ส่งผ่านตัวกลางและแสงที่ถูกดูดกลืนจากตัวกลางที่ต้องมีค่าเท่ากับแสงที่ตกกระทบ โดยไม่รวมแสงที่เกิดจากการสะท้อน (reflection) บริเวณผิวหน้าของตัวกลางและแสงที่เกิดการกระจาย (scattering) ออกไปจากตัวกลาง

### 2.1.1 การส่งผ่าน (Transmittance) และการดูดกลืนของแสง (Absorbance)

แสงที่ส่งผ่านตัวกลาง ( $T$ ) เมื่อมีการดูดกลืนจากสสารในตัวกลางนั้น เป็นอัตราส่วนของแสงที่ส่งผ่านตัวกลางออกไปได้ ( $I$ ) ต่อแสงที่ตกกระทบบนตัวกลางก่อนที่จะผ่านตัวกลาง ( $I_0$ )

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\epsilon(\lambda)cd} \quad (2.3)$$

แสงที่มีการดูดกลืน ( $A$ ) โดยไม่มีการกระจายออกจากตัวกลางจะมีค่าเท่ากับ ค่าลบของ natural logarithm แสงที่ส่งผ่านตัวกลาง ทำให้ไม่ยุ่งยากในการหาค่าการดูดกลืนจากการส่งผ่านของแสงเมื่อไม่คิดการกระจายของแสงจากตัวกลาง (unscattered absorbance) การดูดกลืนจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.4 สำหรับการดูดกลืนบางครั้งเราก็เรียกว่าเป็นคุณสมบัติความหนาแน่นทางแสงของตัวกลาง (optical density of a medium)

$$A = -\ln T = \epsilon(\lambda)cd \quad (2.4)$$

การดูดกลืนของแสงหลายความยาวคลื่น จากตัวกลางที่มีสสารประกอบอยู่ด้วยหลายแบบจากคุณสมบัติของ Beer's Law การดูดกลืนแสงจากสสารในตัวกลางมากกว่าหนึ่งชนิดนั้นจะเป็นผลรวมของการดูดกลืนแสง ในแต่ละความยาวคลื่นแสงจากสสารแต่ละชนิดเข้าด้วยกันเป็นการดูดกลืนสุทธิ โดยสามารถแทนการดูดกลืนนั้นด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แบบวางซ้อน (super position) จากการดูดกลืนของแสงแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ผลที่ได้ก็จะเป็นการดูดกลืนของแสงทั้งหมด ( $A_t$ ) เมื่อมีการส่ง

แสงผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีสารประกอบหลายๆ ชนิดการดูดกลืนจากสาร  $n$  แบบก็จะมีค่าเท่ากับผลรวมของการดูดกลืน  $n$  ค่าเข้าด้วยกันดังสมการที่ 2.4 โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมของความหนาแน่นจากสารประกอบแต่ละแบบที่ค่า extinction coefficient ของความยาวคลื่นแสงแต่ละความยาวคลื่น

$$A_t = \epsilon_1(\lambda)c_1d_1 + \epsilon_2(\lambda)c_2d_2 + \dots + \epsilon_n(\lambda)c_nd_n = \sum_{i=1}^n \epsilon_i(\lambda)c_id_i \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\epsilon_i(\lambda)$  และ  $c_i$  แทน extinction coefficient และความหนาแน่นของสารในตัวกลางที่  $i$  และ  $d_i$  แทนความยาวตลอดช่วงที่มีการดูดกลืนจากตัวกลางที่แสงส่องผ่าน ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปจากสารที่ประกอบอยู่ในตัวกลางแต่ละแบบ โดย Beer's Law จะเป็นการหาความหนาแน่นของตัวกลางแต่ละแบบที่แตกต่างกัน  $n$  ชนิดที่รวมกันอยู่ในตัวกลางเดียวกัน ถ้าเราวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงแตกต่างกัน  $n$  ค่าและรู้ค่า extinction coefficient ของสารประกอบแต่ละตัวที่รวมอยู่ในตัวกลางนั้น

### 2.1.2 Spectrophotometers

Spectrophotometry เป็นพื้นฐานของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าองค์ประกอบต่างๆภายในของเหลว โดยได้มีการนำมาใช้เก็บข้อมูล เพื่อวิเคราะห์หาความยาวคลื่นแสงที่สามารถนำมาใช้วัดค่าต่างๆ เช่นหาค่าองค์ประกอบของเลือดจากภายนอกร่างกายเช่น ค่าความอิ่มตัวออกซิเจนเป็นต้น หรือค่าความเข้มข้นน้ำยาร่างกายที่จะได้กล่าวถึงในการทดลองครั้งนี้ โดยทั่วไปอะตอมของสารแต่ละอย่างจะมีการสั่นและกำเนิดความถี่ออกมาเป็นรูปแบบที่มีลักษณะเฉพาะ (specific patterns) ดังนั้นจึงสามารถใช้ลักษณะเฉพาะของความถี่นี้ในการจำแนกสารแต่ละชนิดได้ โดยนำรูปแบบของความถี่ที่กำเนิดออกมาจากสารแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานที่มีอยู่แล้ว นอกจากนี้เมื่อมีการส่งแสงผ่านสารนั้นๆ รูปแบบลักษณะการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงก็จะคล้ายกับความถี่ที่เกิดจากการสั่น spectrophotometer จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดหาความเข้มของแสงที่ส่งผ่านสารในแต่ละความยาวคลื่น สัดส่วนของการส่งผ่าน (transmitted) จะแปรผกผันกับการดูดกลืน (absorbed) โดยการดูดกลืนจะถูกกำหนดจากความสามารถในการดูดกลืน (absorptivity) หรือ extinction coefficient ของสารนั้นๆ ค่า extinction coefficient ของสารต่างๆสามารถหาได้โดยการวาดกราฟเพื่อดูลักษณะการดูดกลืนที่หลายๆความยาวคลื่นแสง โดยสเปกตรัมการดูดกลืนจะมีลักษณะเฉพาะไม่เหมือนกันสำหรับสารแต่ละอย่าง

Photo detector เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของแสงที่มาตกกระทบให้เป็นกระแสไฟฟ้า ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวโฟโตดีเทคเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน ออกมาตกกระทบตัวโฟโตดีเทคเตอร์ ในการวัดจะให้ความเข้มของแสงที่ตกกระทบตัวกลาง (incident light) แทนด้วย  $I_0$  และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากตัวกลาง (transmitted light) แทนด้วย  $I$  ค่าการส่งผ่าน (transmittance) แทนด้วย  $T$  จะสามารถคำนวณค่าการส่งผ่านได้ดังสมการที่ 2.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.6)$$

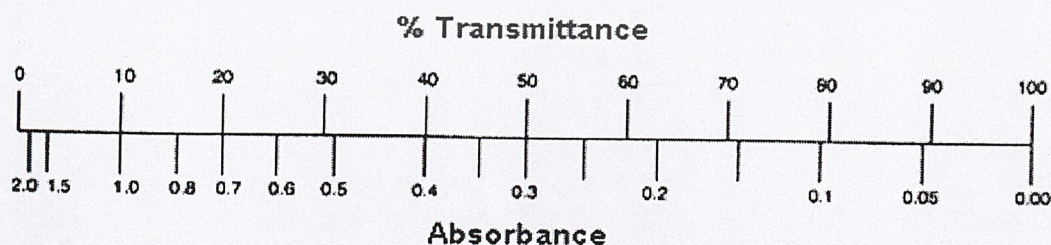
เนื่องจากว่าในแต่ละ Molecule ของสารจะมีสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่เท่ากัน ดังนั้นการดูดกลืนของแสงที่ส่งผ่านสารแต่ละแบบจะมีความเป็นเชิงเส้น (linear) กับเปอร์เซ็นต์ค่าความหนาแน่นของสาร นั้น จากการวัดหาค่าการส่งผ่าน ( $T$ ) ก็จะสามารถคำนวณหาค่าการดูดกลืน ( $A$ ) ได้ดังสมการที่ 2.7

$$A = 2 - \log(\% T) \quad (2.7)$$

เมื่อนำ Beer's Law มาใช้ประกอบเพื่อหาปริมาณของสารที่ประกอบอยู่ในของเหลวนั้นก็จะสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$A = \epsilon(\lambda)cd \quad (2.8)$$

ในรูปที่ 2.1 แสดงอัตราส่วนของการส่งผ่านแสงและการดูดกลืนแสง เมื่อแสงสามารถส่งผ่านตัวกลาง ได้ทั้งหมด 100 % นั่นคือค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0 แต่ถ้าแสงไม่สามารถส่งผ่านตัวกลางได้เลย นั่นคือการดูดกลืนจะมีค่าเป็นอนันต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านและการดูดกลืนของแสง

### 2.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของน้ำยางพารา

ในส่วนนี้จะพูดถึงรูปแบบของน้ำยางพาราในรูปแบบต่างๆ และคว่าน้ำยางพาราในรูปแบบใดที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดหาค่าความเข้มข้น นอกจากนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของน้ำยางพารารวมทั้งองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา การเลือกความยาวคลื่นแสงสำหรับวัดหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา การพิจารณาหาความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้สำหรับนำมาสร้างสมการ เพื่อหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราว่ามีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงใด และความเข้มข้นของน้ำยางพาราควรมีคุณสมบัติการดูดกลืน หรือว่าการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ได้ทำการทดลองเป็นอย่างไร

#### 2.2.1 องค์ประกอบของน้ำยางพารา

น้ำยางพารามีองค์ประกอบหลัก อยู่สามอย่างด้วยกันคือซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ น้ำ ส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง (Non rubber solid) และส่วนที่เป็นยาง (rubber hydrocarbon) [1-5] ส่วนที่เป็นน้ำ (Watery) ส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Medium) ของ (Colloids) มีอยู่ประมาณ 60% ของน้ำยางบริสุทธิ์ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1

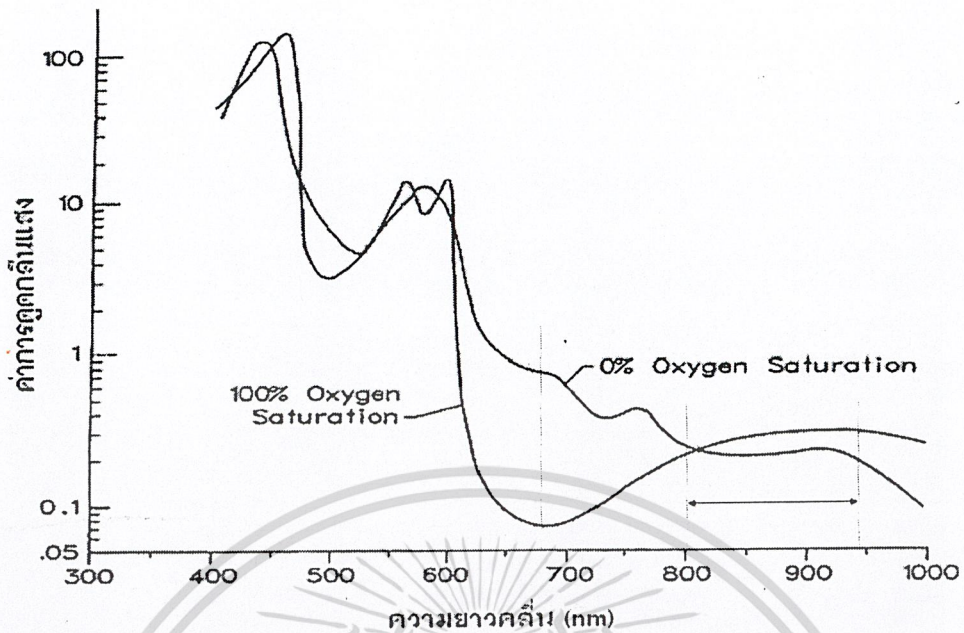
ส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) ประกอบด้วย Protein, Lipids, Carbohydrate และ Inorganic salts มีอยู่ทั้งสิ้นประมาณ 5% โดยน้ำหนักของน้ำยาง มีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและสารแขวนลอยขององค์ประกอบเหล่านี้ทำให้ส่วนที่เป็นน้ำกลายเป็นน้ำที่ไม่บริสุทธิ์น้ำยางที่รวมเอาส่วนนี้เข้าไปด้วยเรียกว่า Serum มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.02

ส่วนที่เป็นยาง (Rubber Hydrocarbon) เป็นส่วนที่มนุษย์เรานำไปใช้ประโยชน์ พวกยางแผ่น ยางแท่ง ยางเครพ หรือยางทุกรูปแบบที่ซื้อขายกันอยู่ในตลาดได้ไปจากส่วนนี้ทั้งสิ้น น้ำยางที่ยังสดอยู่ ส่วนนี้จะอยู่กันเป็นเม็ดๆ เรียกว่า อนุภาคยาง (Rubber Particles) ซึ่งแขวนลอย (Suspended) อยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว (Serum) และมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Negative Charges) อนุภาคยางมีความถ่วงจำเพาะ 0.92 ซึ่งเบากว่าส่วนที่เป็นตัวกลางซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.02 แต่ที่อนุภาคยางไม่ลอยฟ่องอยู่บนผิวของตัวกลางก็เพราะว่า แรงผลักรันซึ่งกันและกันอันเนื่องมาจากการมีประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันทำให้อนุภาคยางเคลื่อนที่ไปมาแบบไร้ทิศทาง (Brownian Movement) อยู่เสมอ ส่วนที่เป็นยางนี้มีอยู่ในน้ำยางในปริมาณไม่แน่นอน มีตั้งแต่ 22% จนถึง 48% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ อายุ ระบบกรีด และ

ฤดูกาล ดังนั้นในการซื้อจากน้ำหนักหรือปริมาณของน้ำยางโดยตรงได้ จะต้องใช้น้ำหนักของส่วนที่เป็นยางเรียกว่า DRC หรือ Dry Rubber Content แต่เพียงอย่างเดียว แต่โดยทั่วไปแล้วน้ำยางสดจะมีส่วนเป็นยาง หรือ DRC เฉลี่ยประมาณ 35%

## 2.2.2 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้หลักการส่งผ่านแสงเพื่อหาค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบภายในของเหลว

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างเครื่องมือและหลักการเลือกความยาวคลื่นแสงสำหรับวัดค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือด (Pulse Oximeter) เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการส่งผ่านของแสงหาค่าองค์ประกอบภายในของเหลวที่ต้องการ และมีใช้อย่างแพร่หลายตามโรงพยาบาลทั่วไปในปัจจุบัน อย่างเช่นเครื่องมือในการวัดค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือด จากภายนอกร่างกายโดยใช้แสงสองความยาวคลื่น [6-10] โดยใช้แสงส่งผ่านหรือว่าดึงหูของผู้ป่วย ในการเลือกความยาวคลื่นแสงสำหรับวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือดนั้น จะเลือกความยาวคลื่นแสงที่มีการดูดกลืนที่แตกต่างกันสองความยาวคลื่น ความยาวคลื่นแสงแรกเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนมากที่สุด และความยาวคลื่นที่สองเป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวของออกซิเจน หรือมีการเปลี่ยนแปลงแต่น้อยและความยาวคลื่นแสงทั้งสองควรมีค่าการดูดกลืนค่อนข้างเป็นเส้นตรงในช่วงกว้าง เพราะเมื่อความยาวคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมีค่าผิดไปจากเดิมเช่นเปลี่ยน LED สำหรับกำเนิดแสงตัวใหม่ หรือเปลี่ยน probe อันใหม่ สมการที่ใช้สำหรับทำนายค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือดก็ยังคงมีความถูกต้อง โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟการดูดกลืนของเม็ดเลือดแดงที่จับตัวกับออกซิเจนทั้งหมด 100 % ( $\text{HbO}_2$ ) และที่เม็ดเลือดแดงไม่จับตัวกับออกซิเจน (Hb) จากกราฟจะเห็นว่ากราฟการดูดกลืนของเม็ดเลือดแดงทั้งสองรูปแบบ มีการดูดกลืนแตกต่างกันมากที่สุดที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 660 nm และลักษณะกราฟค่อนข้างเป็นเส้นตรง ดังนั้นความยาวคลื่นแสงนี้จึงใช้เป็นความยาวคลื่นสำหรับ ให้เปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือดที่มีการเปลี่ยนแปลง และความยาวคลื่นแสงอีกค่าหนึ่งที่ใช้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงจะอยู่ในช่วงประมาณ 800 - 950 nm ซึ่งเป็นช่วงที่มีการตัดกันของเส้นกราฟการดูดกลืนที่ความอิ่มตัวของออกซิเจน 0% และ 100 % ความยาวคลื่นแสงในช่วงนี้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนภายในเลือดน้อยและค่อนข้างเป็นเส้นตรง นั่นคือความยาวคลื่นแสงช่วงนี้จะไม่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเลือดนั่นเอง

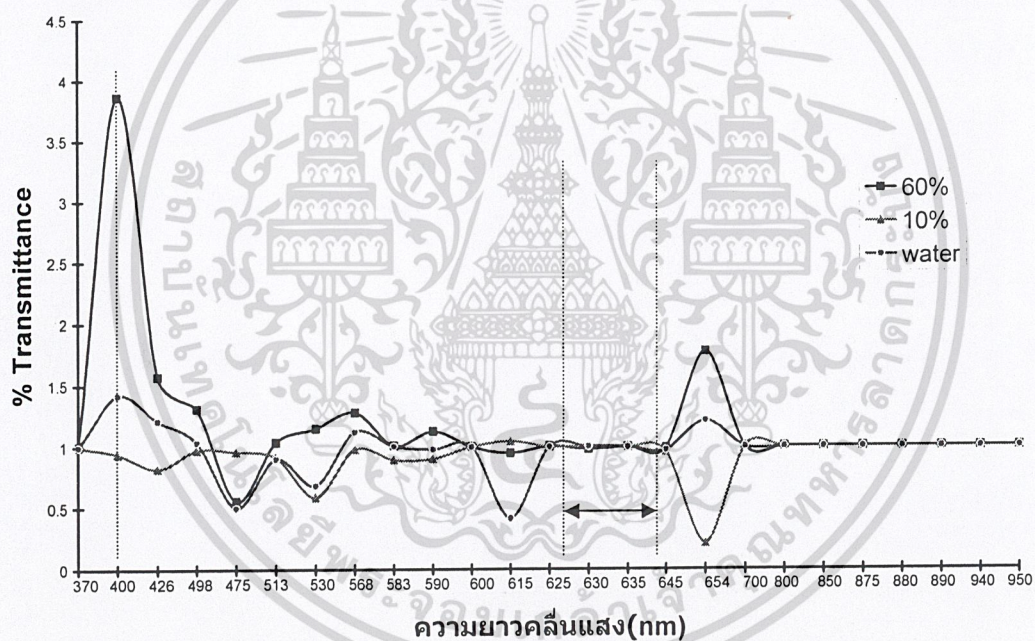


รูปที่ 2.2 การดูดกลืนของเม็ดเลือดแดงที่จับตัวกับออกซิเจน ( $\text{HbO}_2$ ) และที่ไม่จับตัวกับออกซิเจน ( $\text{Hb}$ )

### 2.2.3 การเลือกความยาวคลื่นแสงสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา

ในการวัดค่าความเข้มข้นน้ำยางพารานั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือน้ำยางพารามีส่วนประกอบอยู่หลายอย่างด้วยกัน แต่ที่จะพิจารณาต่อไปนี้มีอยู่สองรูปแบบที่สำคัญ คือส่วนที่เป็นน้ำ และส่วนที่เป็นเนื้อยาง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดคือน้ำยางพารา ดังนั้นในการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราสำหรับการทดลองในครั้งนี้ก็คือการหาส่วนที่เป็นเนื้อยาง เปรียบเทียบกับปริมาตรของน้ำยางพาราทั้งหมดโดยคิดส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่เนื้อยาง รวมกับส่วนที่เป็นเนื้อยางเนื่องจากมีปริมาณน้อย (ประมาณ 5%) เทียบกับทั้งองค์ประกอบทั้งหมด ปัญหาประการแรกที่สำคัญคือต้องหาความยาวคลื่นแสงที่มีค่า extinction coefficient เท่ากัน โดยไม่เกิดการดูดกลืนจากน้ำที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำยางพารา นอกจากนี้ความยาวคลื่นแสงที่ใช้สำหรับหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ต้องมีความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่งที่มีค่าการส่งผ่านเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของปริมาณความเข้มข้นส่วนที่เป็นเนื้อยาง และความยาวคลื่นแสงอีกช่วงหนึ่ง ต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นตามส่วนที่เป็นเนื้อยางในน้ำยางพารา หรือเปลี่ยนแปลงแต่น้อยมากเพื่อใช้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออัตราส่วนการดูดกลืน หรือการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงทั้งสองนี้ต้องมีค่าไม่เท่ากัน อีกประการหนึ่งคือการดูดกลืนหรือการส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นที่เลือกนั้น ควรจะมีลักษณะกราฟเกือบเป็นเส้นตรงเนื่องจากเป็นช่วงที่การดูดกลืนหรือการส่งผ่านค่อนข้างคงที่ เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดจากการที่ความยาวคลื่นแสง ที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดแสงมีค่าผิดไปจากค่า

ความยาวคลื่นแสงที่เลือก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วเช่นกรณีของการเปลี่ยน LED ตัวใหม่หรือการเปลี่ยน probe อันใหม่ดังในตัวอย่างเครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเลือด เช่นจากกราฟการดูดกลืนความอืดตัวออกซิเจนในรูปที่ 2.2 เป็นต้น จุดที่มีการตัดกันของเส้นกราฟความอืดตัวออกซิเจน 0 % และ 100 % เช่นที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 500 – 600 nm และอีกช่วงหนึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงย่านอินฟราเรดความยาวคลื่นประมาณ 800 nm ดังนั้นในส่วนของกราฟการดูดกลืนของความเข้มข้นน้ำยาราค่าต่างๆในรูปที่ 2.3 ความยาวคลื่นแสงที่มีค่าการดูดกลืนต่างกันมาก และน่าจะเป็นความเป็นไปได้ในการนำเป็นค่าความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้น ของปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาราค่าเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาราค่า อยู่ในช่วงประมาณ 400-425 nm และอีกช่วงหนึ่งที่ค่าการดูดกลืนค่อนข้างคงที่และมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าความยาวคลื่นในช่วงแรกหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาราค่า และน่าจะเป็นไปได้สำหรับเป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงอยู่ในช่วงประมาณ 630-645 nm



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนของความเข้มข้นน้ำยาราค่าต่างๆต่อความยาวคลื่นแสง

#### 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนหรือการส่งผ่านแสงของน้ำยาราค่า

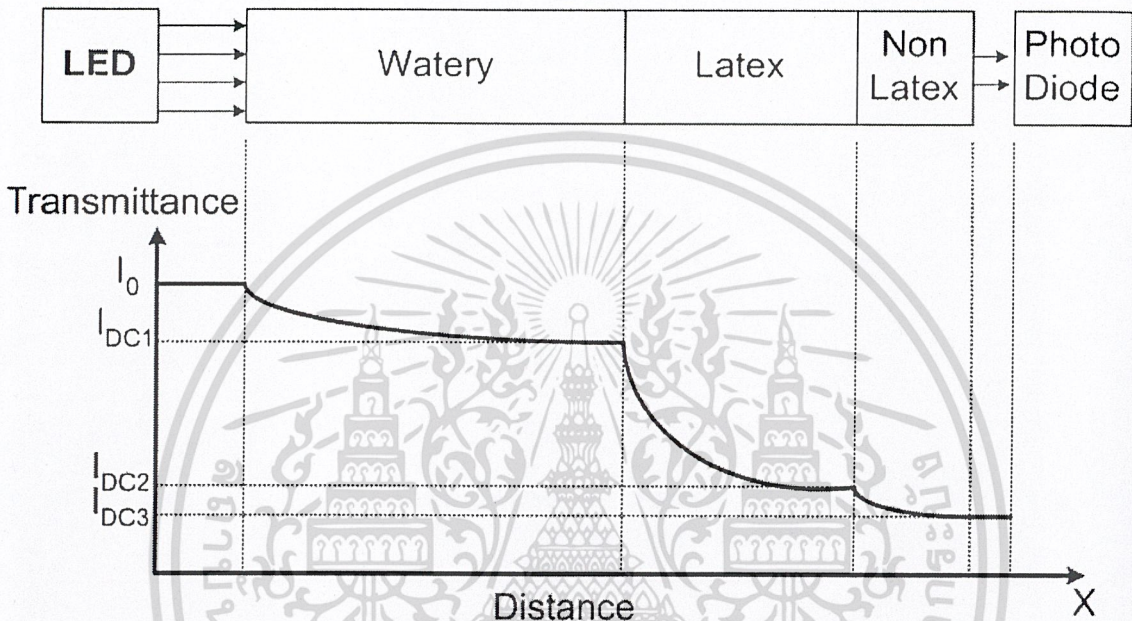
การดูดกลืนหรือการส่งผ่านแสงของน้ำยาราค่านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่เป็นน้ำที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำยาราค่า ส่วนที่สองคือส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อและส่วนที่สามคือส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนหรือค่าการ

ส่งผ่านจะเป็นค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้นๆ ที่ทำการวัด ในช่วงที่น้ำยางพารายังไม่จับตัวเป็นก้อน ดังนั้นจึงตัดผลกระทบนี้ทิ้งไป เนื่องจากช่วงเวลาไม่ถึง 30 วินาทีในการวัดแต่ละครั้ง โดยในการทดลองครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มของแสงที่ส่งผ่านน้ำยางพารา ที่บรรจุในถ้วยแก้วในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยให้ค่าการดูดกลืนหรือการส่งผ่านแสงเป็นค่าคงที่สามส่วนด้วยกัน และให้ความยาวคลื่นแสงที่พิจารณาเลือกทั้งสอง มีค่าการส่งผ่านเปลี่ยนแปลงจากความเข้มข้นของน้ำยางพาราส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพียงปัจจัยเดียว และในการทดลองครั้งนี้จะคำนวณหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา โดยใช้ค่าการส่งผ่านแสงที่ส่งผ่านออกมาจากถ้วยแก้วที่ใส่ตัวอย่างน้ำยางพาราเป็นหลัก

### 2.3 สมการในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง

การวัดหาค่าความเข้มข้นของปริมาณยางในน้ำยางพาราโดยใช้การส่งผ่านแสง โดยตัวอย่างน้ำยางพาราในการทดลองครั้งนี้จะบรรจุอยู่ในถ้วยแก้ว และเป็นการวัดค่าปริมาณการส่งผ่านของแสง โดยด้านหนึ่งเป็น LED ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงและอีกด้านหนึ่งของถ้วยแก้วเป็น Photo Diode ที่ใช้เป็นตัวรับแสง ความสูงของน้ำยางพาราในถ้วยแก้วสูง 1 mm และจะใช้แสงสองความยาวคลื่น ที่มีคุณสมบัติการส่งผ่านแสง ขึ้นกับปริมาณความหนาแน่นของความเข้มข้นน้ำยางพาราที่มีปริมาณเนื้อเยื่อต่างกัน ใช้เป็นค่าการส่งผ่านแสงสำหรับแทนลงไปในการสมการแบบเชิงเส้นที่จะได้กล่าวถึงต่อไป โดยให้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราหนึ่งค่า และความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราอีกหนึ่งค่า สำหรับในการทดลองครั้งนี้จะเป็นการคำนวณหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในน้ำยางพาราขณะที่ทำการวัดค่อนข้างคงที่ และใช้ระยะเวลาในการวัดแต่ละครั้งไม่มากนัก เพื่อให้สมการไม่มีความยุ่งยาก ในการคำนวณมากนัก จึงตัดผลกระทบด้านอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นไม่นำมาพิจารณาประกอบในสมการ ขั้นตอนแรกของการทดลอง จะเป็นการพิจารณาหาความยาวคลื่นแสงที่มีค่าการส่งผ่านแสงเปลี่ยนแปลง ตามค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพาราต่างกันสองค่าคือ ความยาวคลื่นแสงค่าแรกจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือมีค่าการส่งผ่านค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นน้ำยางพาราเปลี่ยนค่าไป โดยความยาวคลื่นแสงค่านี้จะเป็นเป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง และอีกความยาวคลื่นแสงหนึ่งค่าการส่งผ่านแสงจะเปลี่ยนแปลง ตามค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพาราที่เปลี่ยนค่าไปมากกว่าความยาวคลื่นแสงแรก เพื่อใช้เป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา จากนั้นจะได้นำทั้งสองความยาวคลื่นแสงที่เลือกมาสร้างสมการสำหรับทำนายหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราต่อไป เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของ

น้ำยางพาราส่วนที่มีผลต่อการส่งผ่านของแสง โดยเริ่มพิจารณาจากแหล่งกำเนิดแสงจนส่งผ่านไปยังตัวรับแสงที่อยู่ฝั่งตรงกันข้ามของน้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในถ้วยแก้ว ดังรูปที่ 2.4 การส่งผ่านจะประกอบด้วยสามส่วนใหญ่ๆที่ได้กล่าวไว้แล้ว คือส่วนที่เป็นน้ำ ส่วนที่เป็นปริมาณเนื้อยางและส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง ลักษณะการลดลงของค่าความเข้มแสง ( $I$ ) เป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) กับระยะทาง ( $X$ )



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของน้ำยางพาราที่มีผลต่อค่าการส่งผ่านแสง

เมื่อให้ความยาวคลื่นแสงที่เลือกมีการเปลี่ยนแปลง ตามค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อยางในน้ำยางพาราที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบอื่น เราก็จะสามารถหา รูปแบบของสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราได้ โดยมีรูปแบบหลักๆอยู่สองรูปแบบด้วยกัน แบบแรกเป็นการใช้ค่าการดูดกลืนจากน้ำยางพาราสองรูปแบบที่ต่างกันสองความยาวคลื่นแสง มาสร้างเป็นสมการ [11-14] โดยวิธีนี้มีข้อเสียคือต้องมีการแปลงค่าการส่งผ่านเป็นการดูดกลืนก่อน ดังนั้นที่การส่งผ่านมีค่าเป็นศูนย์การดูดกลืนจะมีค่าเป็นอนันต์ทำให้สมการไม่สามารถใช้ได้ นอกจากนี้ในขั้นตอนการแปลงค่าการส่งผ่านเป็นการดูดกลืน ยังมีการปิดเศษของจุดทศนิยมอันอาจทำให้สมการมีความผิดพลาดสูงขึ้นได้ อีกวิธีหนึ่งเป็นการหาสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยใช้ค่าการส่งผ่านแสงที่ผ่านออกมาจากอีกด้านหนึ่งของถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา โดยให้ความยาวคลื่น

73028

แสงที่เลือกทั้งสองความยาวคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราเพียงอย่างเดียว ในส่วนการเปลี่ยนแปลงจากองค์ประกอบอื่นให้เป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากันจากทั้งสองความยาวคลื่น โดยวิธีนี้จะมีข้อดีคือ ไม่ต้องมีการแปลงค่าการส่งผ่านเป็นค่าการดูดกลืนก่อน แต่จะทำการประมาณค่าทอม exponential ในสมการการส่งผ่านและลดรูป exponential ลงให้เป็นสมการแบบเชิงเส้นโดยใช้อนุกรมเทเลอร์ Taylor Series Expansion [14] ในขั้นตอนการหาสมการจากความยาวคลื่นแสงทั้งสอง จะได้แสดงให้เห็นการหาสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ด้วยวิธีทางแสงทั้งสองรูปแบบอย่างละเอียดต่อไป

### 2.3.1 สมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราจากค่าการดูดกลืน

ก่อนจะกล่าวถึงสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา จะได้นำถึงสมการสำหรับหาค่าการส่งผ่านของ Beer-Lambert's Law [13] โดยจะมีรูปแบบสมการดังนี้

$$I = I_0 e^{-T} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นความเข้มของแสงที่ตกกระทบบัวกลาง และ  $T$  เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) ของตัวกลางเมื่อตัวกลางนั้นคือน้ำยางพาราสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.10 ดังนี้

$$T = \{a * C_{Latex} + b * C_{Solid} + S_{Water} + S_{Latex} + S_{Solid}\} * d \quad (2.10)$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  เป็น extinction coefficient ของส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยางตามลำดับ  $S_{Water}$  เป็นค่าการกระจายของแสงจากส่วนที่เป็นน้ำ  $S_{Latex}$  เป็นค่าการกระจายของแสงจากส่วนที่เป็นเนื้อยาง  $S_{Solid}$  เป็นการกระจายของแสงจากส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง  $d$  เป็นระยะทางที่แสงส่งผ่าน เมื่อให้ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมดคือค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา จะสามารถประมาณค่าใหม่ได้ดังนี้

$$S_{Para} = S_c[Latex + Solid] = S * [C_{Para}] \quad (2.11)$$

และที่ความยาวคลื่นแสงที่มีการดูดกลืนของส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง มีค่า Extinction coefficient เท่ากัน (isobestic wavelength) ค่าของ  $a = b = a_i$  ดังนั้นสมการที่ 2.11 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.12

$$T_i = \{a_i * [C_{Para}] + S * [C_{Para}] + S_{Water} + S_{Latex} + S_{Solid} + \} * d \quad (2.12)$$

หรือสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.13

$$T_i = (a_i + S) * d * [C_{Para}] + (S_{Water} + S_{Latex} + S_{Solid}) * d \quad (2.13)$$

เมื่อรวมการกระจายทั้งหมดที่สมมติให้เป็นค่าคงที่เข้าด้วยกัน ให้เป็นค่าคงที่ S สมการที่ 2.13 สามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$T_i = K * C_{Para} + S \quad (2.14)$$

ในส่วนการกระจายของแสงจากองค์ประกอบในน้ำยางพารานั้นจากพลศาสตร์นั้น สามารถชดเชยได้จากสมการดังจะได้แสดงต่อไป เมื่อใช้ความยาวคลื่นแสงสองความยาวคลื่นตรงจุดที่มีการดูดกลืนของน้ำยางพาราที่ 10 % และ 60 % เท่ากันจากกราฟในรูปที่ 2.3 เช่นความยาวคลื่นแสงประมาณ 400 nm และ 635 nm เป็นต้น สามารถนำการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงทั้งสองมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{i1} = K_1 * C_{Para} + S_1 |_{\lambda,1 = 635nm} \quad (2.15)$$

$$T_{i2} = K_2 * C_{Para} + S_2 |_{\lambda,2 = 400nm} \quad (2.16)$$

โดยอัตราส่วนความแตกต่างจากการกระจายของความยาวคลื่นแสงทั้งสองจะมีค่าดังสมการที่ 2.17

$$R = \frac{S_1}{S_2} \quad (2.17)$$

ถ้าระยะทางของตัวรับแสงและแหล่งกำเนิดแสงมีค่าน้อยกว่า  $R$  ก็จะมีค่าใกล้เคียง 1 มากยิ่งขึ้นสมการที่ได้นี้ก็จะมีค่าถูกต้องมากขึ้นแต่ในความเป็นจริงค่า  $R$  อาจจะมีค่าไม่เท่ากับ 1 เนื่องจากด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา มีระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงมีค่ามากประมาณ 1 ซม. แต่ถ้าประมาณว่าค่า  $R$  มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแรกสามารถเขียนใหม่ได้จะมีค่าดังนี้

$$Ti_1 = K_1 * C_{para} + R * S_2 \quad (2.18)$$

และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงที่สองก็จะมีค่าเป็น

$$Ti_2 = K_2 * C_{para} + S_2 \quad (2.19)$$

ดังนั้นเมื่อจับสมการทั้งสองมารวมกันก็จะได้สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราตั้งสมการที่ 2.20

$$C_{para} = \frac{(Ti_1 - R * Ti_2)}{(K_1 - R * K_2)} \quad (2.20)$$

ถ้าประมาณว่าการกระจายของแสงจากส่วนที่เป็นน้ำ ของทั้งสองความยาวคลื่นมีค่าเท่ากันนั่นคือค่า  $R$  จะมีค่าเป็น 1 จากนั้นทำการรวมค่าคงที่  $K$  ทั้งหมดเป็นค่าคงที่  $K$  ตัวใหม่สมการที่ 2.20 จะเขียนใหม่ได้ตั้งสมการที่ 2.21 ดังนี้

$$C_{para} = \frac{Ti_1 - Ti_2}{K} \quad (2.21)$$

ในการทดลองครั้งนี้ในขั้นตอนการหาค่า  $K$  จะอาศัยการเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราจริงจากการนำตัวอย่างน้ำยางพารา ที่เติมน้ำให้มีค่าความเข้มข้นต่างๆ (นำน้ำยางพาราเข้มข้น 60% มาเติมน้ำให้มีความเข้มข้นต่างกัน) ก่อนนำมาทำการอบให้แห้ง โดยชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบก่อนทำการอบ และหลังอบแห้งเพื่อหาปริมาณส่วนที่เป็นเนื้อยาง และค่าการส่งผ่านแสงที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น ก่อนจะแปลงค่าการส่งผ่านนั้นเป็นค่าการดูดกลืนและทำการประมาณค่า  $K$  ออกมา

### 2.3.2 การหาสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยค่าการส่งผ่านแสง

จากสมการเริ่มต้นพื้นฐานของ Beer's Law แสงที่ตกกระทบและสามารถส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งก็จะมีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับกรณีของการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสงแต่ใช้ค่าการดูดกลืน เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการตั้งต้นได้คือ

แสงที่ส่งผ่าน = แสงตกกระทบ  $\exp$  (การดูดกลืน + การกระจาย)

หรือในรูปสมการ Exponential จะมีรูปแบบดังนี้

$$I = I_{0e}^{-\{a \cdot [C_{Latex}] + b \cdot [C_{Solid}] + S_{Water} + S_{Latex} + S_{Solid}\} \cdot d} \quad (2.22)$$

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าในการหาสมการสำหรับการทดลองในครั้งนี้ ค่าการส่งผ่านหรือการดูดกลืนจะไม่คิดผลกระทบด้านอื่นๆที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยคิดในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นเมื่อรวมการกระจายที่สมมุติให้มีค่าที่เข้าด้วยกันและเลือกความยาวแสงที่มีค่า extinction coefficient ของน้ำยางพาราในส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยางเท่ากัน จากทั้งสองความยาวคลื่นแสงจึงทำให้ สัมประสิทธิ์ตัวคูณ  $a$  และ  $b$  มีค่าเท่ากันและจากการที่ค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราก็คือส่วนที่แยกออกมาจากส่วนที่เป็นน้ำทั้งหมด ดังนั้นเมื่อแทนเงื่อนไขทั้งสองประการข้างต้นลงไป ในสมการที่ 2.22 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.25

เงื่อนไขที่ 1

$$a = b = a_i \quad (2.23)$$

และ เงื่อนไขที่ 2

$$C_{Latex} + C_{Solid} = C_{Para} \quad (2.24)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.22 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I = I_{0e}^{-\{a_i \cdot [C_{Para}] + S_{Water} + S_{Para}\} \cdot d} \quad (2.25)$$

สมการที่ 2.25 เมื่อจัดรูปใหม่สามารถเขียนได้เป็น

$$I = I_{0e}^{-\{(a_i + S)[Para] + S_{Water}\} \cdot d} \quad (2.26)$$

กระจายสมการที่ 2.26 ได้เป็นสมการที่ 2.27

$$I = I_0 e^{-(ai+s) \cdot d \cdot [C_{Para}] + d \cdot (S_{Water})} \quad (2.27)$$

ถ้าให้  $ai + s$  และ  $d$  เป็นค่าคงที่สมการที่ 2.27 สามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.28

$$I = I_0 e^{-(K \cdot C_{Para} + S)} \quad (2.28)$$

โดย  $K$  แทนค่าคงที่ทั้งหมดในสมการ และ  $S$  แทนแสงที่เกิดจากการกระจายทั้งหมด และจากรูปทั่วไปของอนุกรมเทเลอร์ Taylor Series Expansion

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!} f''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^k}{k!} f^k(x_0) \quad (2.29)$$

เมื่อใช้ประมาณค่าของ  $e^{-x}$  จะมีค่าดังสมการที่ 2.30

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} \dots \quad (2.30)$$

เมื่อแทนค่า  $x$  ที่มีรูปแบบดังสมการ 2.28 ด้วยเทอม exponential ที่มีการประมาณค่าแล้ว ด้วย Taylor Series Expansion ดังสมการที่ 2.30 จะได้เป็น

$$e^{-(K \cdot Hbt) + S} = 1 - (K \cdot Hbt + S) \quad (2.31)$$

ดังนั้นเมื่อแทนเทอมเอกซ์โปเนนเชียลที่ได้ทำการประมาณค่าแล้ว ด้วยอนุกรมเทเลอร์ดังในสมการที่ 2.31 กลับลงไปในสมการ 2.28 สมการการส่งผ่านที่มีการประมาณค่าแล้วจะได้ดังสมการที่ 2.32

$$I = I_0(1 - (K \cdot Hbt + S)) \quad (2.32)$$

ในส่วนของเทอมการกระจายของแสงสำหรับส่วนที่เป็นน้ำ จะสมมุติให้มีค่าคงที่และมีค่าเท่ากันจากทั้งสองความยาวคลื่นแสง แต่สำหรับการกระจายจากส่วนที่เป็นของแข็ง อาจจะมีค่าไม่คงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อเราใช้ความยาวคลื่นแสงสองความยาวคลื่นที่มีค่าการส่งผ่านที่แตกต่างกัน และประมาณว่ามีค่าการส่งผ่านที่มีปัจจัยการเปลี่ยนแปลงมาจากองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ของทั้งสองความยาวคลื่นแสงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ก็สามารถประมาณค่าสมการเพื่อชดเชยการกระจายในส่วนนี้ได้ สำหรับคุณสมบัติของความยาวคลื่นแสงทั้งสองที่ใช้หาค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราจากค่าการส่งผ่านนี้ ยังคงมีเงื่อนไขในการเลือกความยาวคลื่นแสงเช่นเดียวกับการหาค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราจากค่าการดูดกลืน คือต้องเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการดูดกลืนที่ความเข้มข้นจากรูปที่ 2.3 ที่ 10 % และ 60 % เท่ากันและความไวในการส่งผ่านแสงต่อความเข้มข้นน้ำยาพาราที่มีค่าเปลี่ยนไป ของทั้งสองความยาวคลื่นแสงต้องมีค่าต่างกัน นั่นคือยังคงเป็นความยาวคลื่นแสงประมาณ 400 nm และอีกช่วงหนึ่งยังอยู่ในช่วงประมาณ 600 – 645 nm สมการที่ได้จากความยาวคลื่นแสงที่เลือกทั้งสอง เช่นในกรณีเลือกความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm โดยให้ความยาวคลื่นแสง 630 nm เป็นค่าความยาวคลื่นแสงอ้างอิงสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราโดยใช้สองความยาวคลื่นแสงได้ดังนี้ เริ่มจากที่ความยาวคลื่นแสง 400 nm จะมีค่าการส่งผ่านดังนี้

$$I_1 = I_{0e}^{-\left(K_1 \cdot C_{para} + S_1\right)} \quad | \quad (400nm) \quad (2.33)$$

เมื่อทำการประมาณค่าด้วย Taylor Series expansion จะได้เป็น

$$I_1 = I_0(1 - (K_1 \cdot C_{para} + S_1)) \quad (2.34)$$

ที่ความยาวคลื่นแสง 635 nm จะได้ค่าการส่งผ่านดังนี้

$$I_2 = I_{0e}^{-\left(K_2 \cdot C_{para} + S_2\right)} \quad | \quad (630nm) \quad (2.35)$$

เมื่อทำการประมาณค่าด้วยอนุกรมเทเลอร์จะได้เป็น

$$I_2 = I_0(1 - (K_2 \cdot C_{para} + S_2)) \quad (2.36)$$

และจากการที่ค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมของทั้งสองสมการมีค่าเท่ากัน และสมมุติให้ค่าการกระจาย (S) จากทั้งสองสมการก็มีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อนำสมการทั้งสองมาเท่ากันเพื่อหาค่าความเข้มขั้วน้ำยารวม จะได้เป็น

$$I_1 - I_2 = I_0(1 - (K_1 * C_{Para} + S_1)) - I_0(1 - (K_2 * C_{Para} + S_2)) \quad (2.37)$$

จัดรูปสมการที่ 2.37 ใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.38

$$I_1 - I_2 = I_0((K_2 - K_1) * C_{Para}) \quad (2.38)$$

เมื่อทำการรวมค่าคงที่ K เข้าด้วยกันให้เป็นค่าคงที่ K ตัวใหม่สมการจะกลายเป็น

$$I_1 - I_2 = I_0 * K * C_{Para} \quad (2.39)$$

และเมื่อให้แสงที่ส่งผ่านออกมาจากตัวกลาง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ตกกระทบก่อนผ่านตัวกลาง โดยให้แสงที่ตกกระทบก่อนผ่านตัวกลางมีค่าเท่ากับ 100% เท่ากันจากทั้งสองความยาวคลื่นแสง ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการ ความเข้มขั้วน้ำยารวมจะมีค่าเท่ากับเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นแสงแรก ลบด้วยเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสงที่สองและนำค่าที่ได้มาหารด้วยค่าคงที่ K ก็จะได้ค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมที่ต้องการ โดยรูปแบบของสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมที่ใช้ค่าการส่งผ่านแสงผ่านโดยไม่มีสารเจือปนตัวอย่าง ดังสมการที่ 2.40

$$C_{Para} = \frac{I_1 - I_2}{K} \quad (2.40)$$

สำหรับในขั้นตอนการหาตัวแปรค่าคงที่ K ในสมการหาค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมโดยใช้ค่าการส่งผ่านแสง จะได้ทำการเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านจากเครื่องมือ สำหรับหาค่าการส่งผ่านที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมา ความยาวคลื่นแสงทั้งสองที่เลือกมาแทนค่าลงไปในสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มขั้วน้ำยารวม ในส่วนของการหาค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมสำหรับเป็นค่าอ้างอิง ยังคงใช้วิธีการหาค่าโดยการนำตัวอย่างน้ำยารวมมาทำการอบแห้ง โดยสมการที่ 2.40 จะใช้เป็นสมการสำหรับหาค่าความเข้มขั้วน้ำยารวมจากค่าการส่งผ่านแสง ในการทดลองต่อไป

### บทที่ 3

## ไดโอดเปล่งแสง โฟโตไดโอด วงจรขยายสัญญาณ และรูปแบบของหัวตรวจ

### 3.1 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)

ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงสำหรับการทดลองครั้งนี้ใช้ไดโอดเปล่งแสง (LED) การเลือก LED เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับวัดค่าการส่งผ่านหรือสำหรับการทำนาค่าปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพารานั้น ความเข้มของแสงสว่างหรือว่ากำลังงานที่กำเนิดจาก LED จะต้องสามารถให้ความเข้มแสงออกมาเพียงพอที่จะส่งผ่านน้ำยางพาราที่มีความสูงในถ้วยแก้วมากกว่า 1 mm ได้ นอกจากนี้ยังต้องมีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถวางในหัวตรวจ (probe) ที่มีพื้นที่จำกัดได้ ในส่วนนี้จะพูดถึงพื้นฐานการทำงานและคุณสมบัติของ LED หลักการในการกำเนิดแสงของ LED ความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมาและโครงสร้างพื้นฐานของ LED ก่อนที่จะพูดถึงลักษณะการทำงานของไดโอดเปล่งแสง จะขอกล่าวถึงข้อกำหนดหลักๆในการพิจารณาเลือก LED ประการแรกคือแสงที่กำเนิดจาก LED ต้องมีความเข้มแสง (light output) เพียงพอที่จะส่งผ่านน้ำยางพาราได้ ประการที่สองคือขนาดของ LED ต้องมีขนาดเล็กพอที่จะวางลงใน probe ที่มีพื้นที่จำกัดได้ พลังงานแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED จะวัดในหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ (milliwatts) โดย LED ที่เลือกใช้ควรเป็นชนิด high-bright หรือ super bright เท่านั้น เพื่อให้มีความเข้มแสงพอเพียงสำหรับการส่งผ่านน้ำยางพารา โดยมีกำลังงานแสงที่กำเนิดออกมาประมาณ 1 mW ที่กระแสไบอัสตรงประมาณ 20 mA แต่ LED ที่ให้ความเข้มแสงมากกว่านี้ก็สามารถนำมาใช้ได้ แต่โดยปกติมักมีค่าพลังงานความเข้มแสงไม่เกิน 10 mW ประการที่สามคือความยาวคลื่นที่ LED ให้กำลังงานสูงสุด ( $\lambda_{peak}$ ) ประการที่สี่คือช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ LED กำเนิดออกมา ( $\lambda_{range}$ ) ประการสุดท้ายคือมุมของแสงที่ LED กำเนิดออกมา (view angle) ในปัจจุบันโรงงานผลิต LED สามารถสร้าง LED ให้มีขนาดเล็กลงมากโดยมีขนาดพื้นที่ประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตร แต่ยังคงให้พลังงานแสงที่เพียงพอในการส่งผ่านน้ำยางพารา ในการทดลองครั้งนี้ใช้ LED ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปคือรูปร่างภายนอกมีลักษณะกลมแบบทรงกระบอกปลายมน และมีเส้นผ่าศูนย์กลางสองขนาดด้วยกันทั้งขนาด 3 mm และ 5 mm

#### 3.1.1 พื้นฐานการทำงานของไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)

ไดโอดเปล่งแสงมักเป็นตัวเลือกอันดับแรกๆ ในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อตรวจวัดสัญญาณหรือตรวจวัดค่าต่างๆในเครื่องมือที่ใช้วิธีการทางแสง ที่ไม่ต้องการพลังงานแสงมากนัก

เนื่องจากการใช้งานที่ง่ายไม่ยุ่งยาก เช่นตัวอย่างในบทที่ 2 เครื่องมือในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความอิมพัลของออกซิเจนภายในเลือด ผ่านบริเวณปลายนิ้วมือหรือว่าดิงหูที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจาก LED มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาไม่แพง ความเข้มแสงที่เปล่งออกมาพอเพียงในการนำมาใช้งานได้ มีช่วงความยาวคลื่นแสงให้เลือกมาก หลายความยาวคลื่นในช่วงตั้งแต่แสง UV (ultra violet) แสงสีน้ำเงินจนถึงแสงย่านอินฟราเรด นอกจากนี้การออกแบบวงจรขับ LED ให้เปล่งแสงออกมายังสามารถทำได้โดยง่าย ใช้พลังงานไม่มากเทคนิคการออกแบบไม่ยุ่งยากไม่ซับซ้อนจนเกินไป

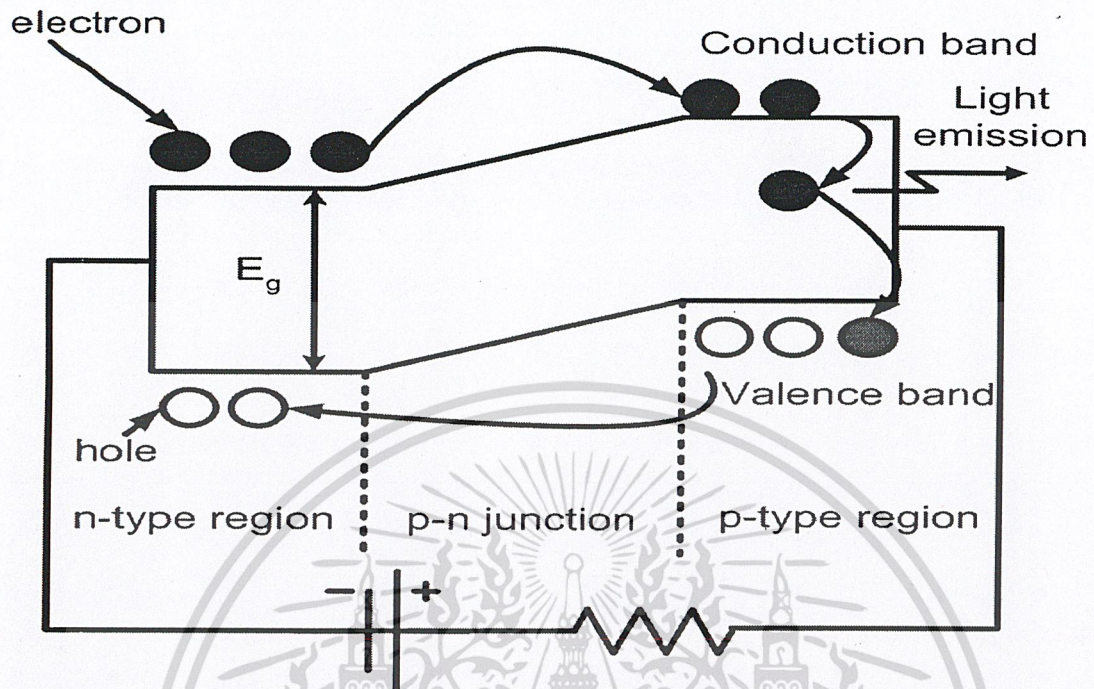
LED เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำทางแสง (Opto-electronics) ที่กำเนิดแสงจากการปลดปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอน แล้วให้ความยาวคลื่นแสง (photon) ออกมาจากการรวมตัวกันของพาหะส่วนน้อยบริเวณรอยต่อ p-n ในขณะที่ได้รับไบอัสตรง LED ส่วนใหญ่จะทำจากสารกึ่งตัวนำธาตุหมู่ III-V, II-VI และหมู่ IV โดยส่วนมากมักจะทำมาจาก Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP) Gallium Phosphide (GaP) และ Gallium Arsenide (GaAs) LED ที่ทำมาจาก GaAsP และ GaP จะให้แสงในย่านที่มองเห็นได้ (visible light) (ความยาวคลื่นแสงอยู่ในช่วงประมาณ 380 – 780 nm) ในขณะที่ LED ที่ทำมาจาก GaAs จะให้แสงย่านอินฟราเรด สารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่สามารถให้แสงได้ทั้งสองช่วงคือแสงที่มองเห็นได้และแสงอินฟราเรดแต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายคือ Gallium Aluminum Arsenide (GaAlAs)

รูปที่ 3.1 แสดงหลักการพื้นฐานในการกำเนิดแสงของ LED เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะข้ามบริเวณแถบต้องห้าม (forbidden energy gap,  $E_g$ ) ขึ้นไปอยู่บริเวณแถบตัวนำ (conduction band) หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่บริเวณแถบตัวนำมีพลังงานลดลงและตกกลับลงมาที่สถานะพลังงานที่ต่ำกว่า บริเวณแถบ valence band อิเล็กตรอนดังกล่าวจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของพลังงานโฟตอน (photon) โดยความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจากการตกกลับลงมาของอิเล็กตรอนหรือเป็นความยาวคลื่นแสงที่ LED กำเนิดออกมานั่นเอง สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $E_g$  เป็นความกว้างของบริเวณแถบพลังงานต้องห้ามในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์  $h$  เป็นค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J s) ในส่วน  $c$  เป็นความเร็วของแสงในสุญญากาศ ( $3 \times 10^8$  m/s) และ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นแสงที่ได้จากการคายพลังงานโฟตอนของอิเล็กตรอนออกมา ค่าของ  $E_g$  เป็นคุณสมบัติเฉพาะของธาตุ หรือว่าสารประกอบที่นำมาทำ LED ซึ่ง

เป็นค่าคงที่ โดยธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากันและเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจาก LED เมื่อมีการป้อนไบอัสตรง



รูปที่ 3.1 พื้นฐานการทำงานของ LED

### 3.1.2 ความกว้างของความยาวคลื่นแสงที่เกิดจาก LED (bandwidth consideration)

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งคือ ช่วงความกว้างของความยาวคลื่นแสง (bandwidth) ที่กำเนิดจาก LED เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อยางในน้ำยางพาราให้มีค่าน้อยสุด เพราะในการหาค่าปริมาณเนื้อยางในน้ำยางพาราจะอาศัยความยาวคลื่นแสงบริเวณจุดที่มีการตัดกันของเส้นกราฟที่ 10 % และ 60 % ดังนั้นถ้าหากความยาวคลื่นแสงที่ LED กำเนิดออกมามีค่าผิดไปจากจุดที่มีการตัดกันของเส้นกราฟ ผลของค่าความกว้างของช่วงความยาวคลื่นแสงที่เกิดจาก LED ก็จะเข้ามารบกวนได้มากโดยเฉพาะความยาวคลื่นแสงในช่วงประมาณ 400 nm เนื่องจากกราฟการดูดกลืนของน้ำยางพาราที่ความเข้มข้นต่างกันบริเวณนี้ มีลักษณะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้น LED ที่นำมาใช้สำหรับสร้างหัวตรวจ (Probe) ต้องมี bandwidth แคบ แต่ในช่วงความยาวคลื่นแสงย่านแสงสีแดง (600-645 nm) LED ที่นำมาใช้ในย่านความยาวคลื่นแสงช่วงนี้ไม่มีความจำเป็นที่ต้องมี bandwidth แคบมากนักเนื่องจากการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง ของความเข้มข้นน้ำยางพาราทั้งสองรูปแบบในช่วงนี้มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงทำให้สามารถเลือก LED ที่มี spectral bandwidth กว้างมากกว่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 400 nm ได้

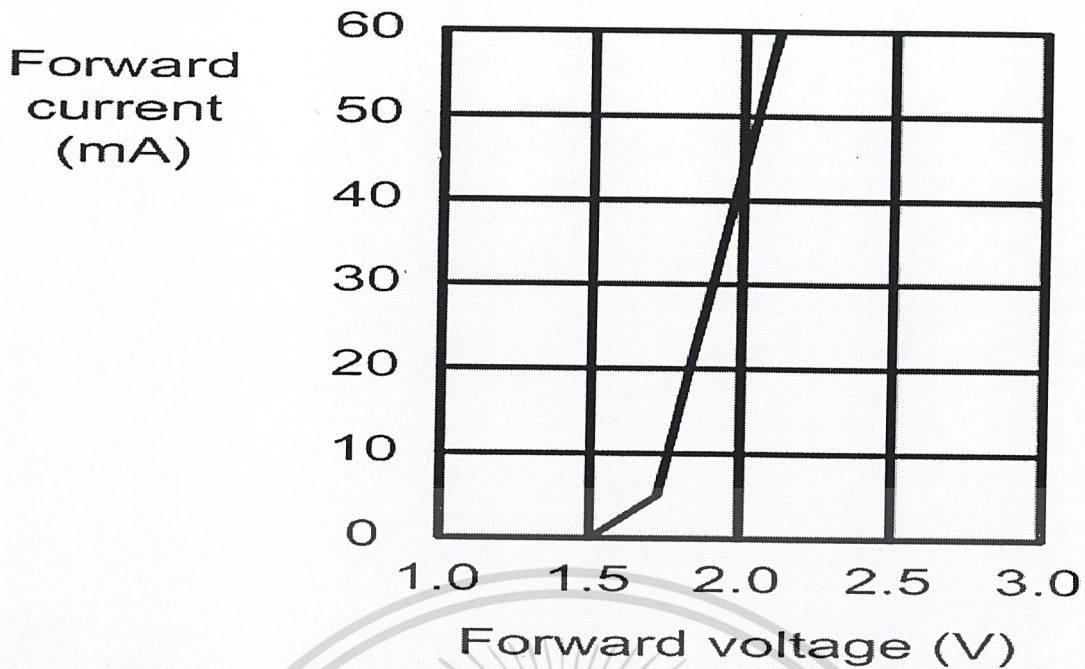
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 แรงดันไบอัสตรง (forward voltage)

แรงดันไบอัสตรงของไดโอดปกติจะกำหนดจากค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ p-n ของไดโอดชนิดนั้นโดยวัดจากขั้วแอโนด (anode) ไปยังขั้วคาโทด (cathode) ค่าของแรงดันไบอัสตรงนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุหรือสารประกอบที่นำมาสร้าง ไดโอดสำหรับใช้งานทั่วไปชนิดที่ทำมาจากซิลิกอน (silicon) จะมีแรงดันไบอัสตรงประมาณ 0.7 โวลต์ และมีค่าประมาณ 0.3 โวลต์สำหรับชนิดที่ทำมาจากเจอร์มาเนียม (germanium) แต่แรงดันไบอัสตรงของ LED จะมีช่วงกว้างมากกว่าคืออยู่ในช่วงประมาณ 0.9-2.5 โวลต์ จากสมการที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) จะแปรผกผันกันกับความยาวคลื่นแสง ( $\lambda$ ) ของพลังงานโฟตอน (photon) ที่กำเนิดจาก LED โดยเมื่อความกว้างของ  $E_g$  มีค่ามาก ความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมาก็จะมีค่าน้อย และแรงดันไบอัสตรงของ LED ก็แปรผันตรงกับความกว้างของบริเวณแถบพลังงานต้องห้ามของธาตุหรือสารประกอบที่นำมาสร้าง LED ดังนั้นจึงทำให้ LED ที่มีแรงดันไบอัสตรงน้อย ก็มาจากการที่ธาตุหรือสารประกอบที่นำมาสร้าง LED นั้นมีค่าความกว้างของบริเวณแถบพลังงานต้องห้ามน้อยด้วย ทำให้ความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมาเมื่อได้รับไบอัสตรงมีค่ามาก (เช่น เปล่งแสงออกมาในย่านอินฟราเรด) ในทางกลับกัน LED ที่มีค่าแรงดันไบอัสตรงมากก็จะมีค่าความกว้างของบริเวณแถบพลังงานต้องห้ามมากด้วย ทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED มีค่าน้อย หรือมีความถี่สูงนั่นเอง (เช่น กำเนิดออกมาในช่วงแสงสีน้ำเงินหรือว่าสีเขียวย)

### 3.1.4 กระแสไบอัสตรง

กระแสไบอัสตรงกำหนดจากค่ากระแสที่ไหลผ่าน LED จากขั้วแอโนด ไปยังขั้วแคโทดของ LED เมื่อ LED มีค่ากระแสไบอัสตรงไหลผ่านเพียงพอที่จะกำเนิดแสงออกมา โดยค่ากระแสไบอัสตรงนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของ LED เกี่ยวกับความเข้มของพลังงานแสงที่ LED สามารถกำเนิดออกมาได้ โดยค่าพลังงานแสงที่กำเนิดออกมาในช่วงแรกจะประมาณว่ามีความเป็นเชิงเส้นกับกระแสไบอัสตรงที่ไหลผ่าน LED ซึ่งจะเป็นช่วงที่มีการใช้งาน โดยปกติค่ากระแสไบอัสตรงของ LED จะมีช่วงกว้างมากจากประมาณ 2 – 50 mA รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไบอัสตรงและแรงดันของ LED ที่กำเนิดแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 660 nm



รูปที่ 3.2 กราฟกระแสและแรงดันในขณะได้รับไบอัสตรงของ LED

### 3.1.5 แรงดันไบอัสกลับ (Reverse breakdown voltage)

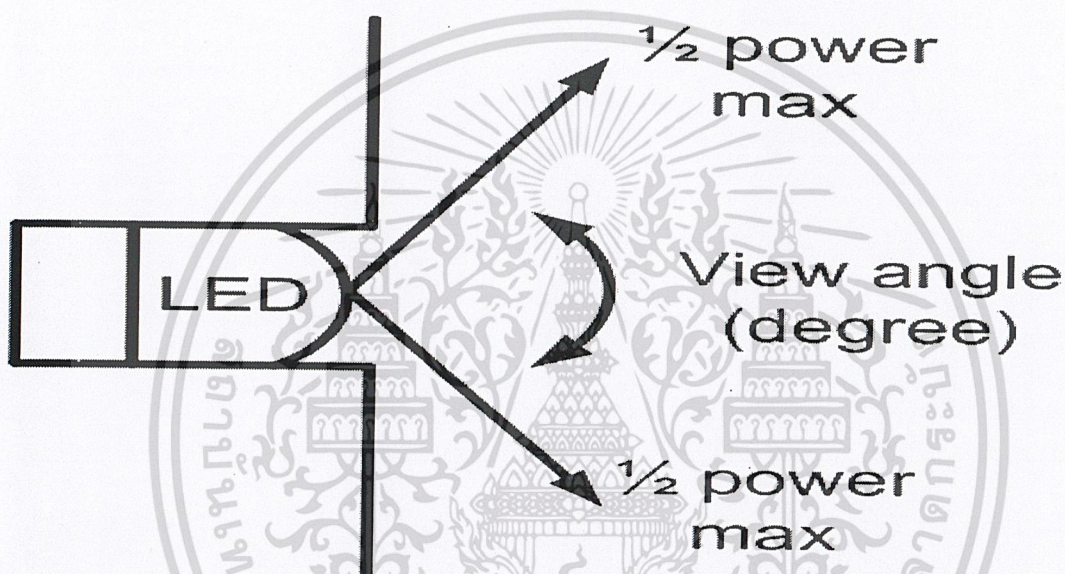
โดยทั่วไปเมื่อไดโอดได้รับการไบอัสกลับจะไม่มีกระแสไหลผ่านข้ามรอยต่อ p-n จนกว่าแรงดันไบอัสกลับนั้นจะมีค่ามากถึงระดับแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ของไดโอดตัวนั้น ที่ระดับแรงดันพังทลายนี้จะมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ p-n อันจะทำให้ไดโอดได้รับความเสียหาย นอกเสียจากว่าจะมีค่าความต้านทาน (resistor) สำหรับเป็นตัวจำกัดกระแสต่ออนุกรมอยู่ด้วย โดย LED ส่วนมากจะมีคุณสมบัติด้านแรงดันไบอัสกลับนี้ค่อนข้างต่ำกว่าไดโอดสำหรับใช้งานทั่วไปมากมักจะอยู่ในช่วงประมาณ 3 - 5 โวลต์ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญในการเลือกและออกแบบวงจรขับ LED ให้สามารถทำงานได้ดีโดยไม่เกิดความเสียหายขึ้น

### 3.1.6 กระแสไบอัสกลับ (Reverse current)

ในทางอุดมคติจะไม่มีกระแสไหลผ่านในขณะที่รอยต่อ p-n อยู่ในสภาวะได้รับแรงดันไบอัสกลับ แต่ในความเป็นจริงจะมีกระแสรั่วค่าน้อยๆไหลผ่าน LED โดยมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 0.01-10  $\mu\text{A}$  แต่กระแสที่ไหลผ่านค่านี้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไบอัสตรงที่มีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถตัดผลของค่ากระแสที่ไหลในช่วงไบอัสกลับนี้ทิ้งไปได้

### 3.1.7 มุมของแสงกำเนิดที่ออกมาจาก LED (Beam angle)

มุมของแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED กำหนดจากมุมที่การเปล่งแสงของ LED และมีพลังงานลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าพลังงานสูงสุดจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง (beam angle) หรือเรียกอีกอย่างว่า view angle ในการวัดหาจุดโฟกัสเพื่อหาจุดที่ LED กำเนิดแสงพลังงานสูงสุดปัจจุบันนี้ทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก และ LED ที่มีขายในท้องตลาดในปัจจุบันจะมีค่ามุมของแสงที่เปล่งออกมานี้ได้ตั้งแต่ไม่กี่องศาจนถึง 180 องศา ในการเลือก LED ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงผ่านน้ำยางพารา นั้นจะเลือกใช้ที่มีค่ามุมไม่มากนัก เพื่อให้ได้พลังงานแสงที่มีค่าสูงสุดส่งผ่านออกไปอีกด้านหนึ่งของน้ำยางพารา โดยแสงจะมีการกระจายเมื่อเดินทางผ่านเนื้อเยื่อและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้พลังงานแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED มีค่าลดลงก่อนเดินทางไปถึงตัวรับอีกด้านหนึ่งของน้ำยางพารา

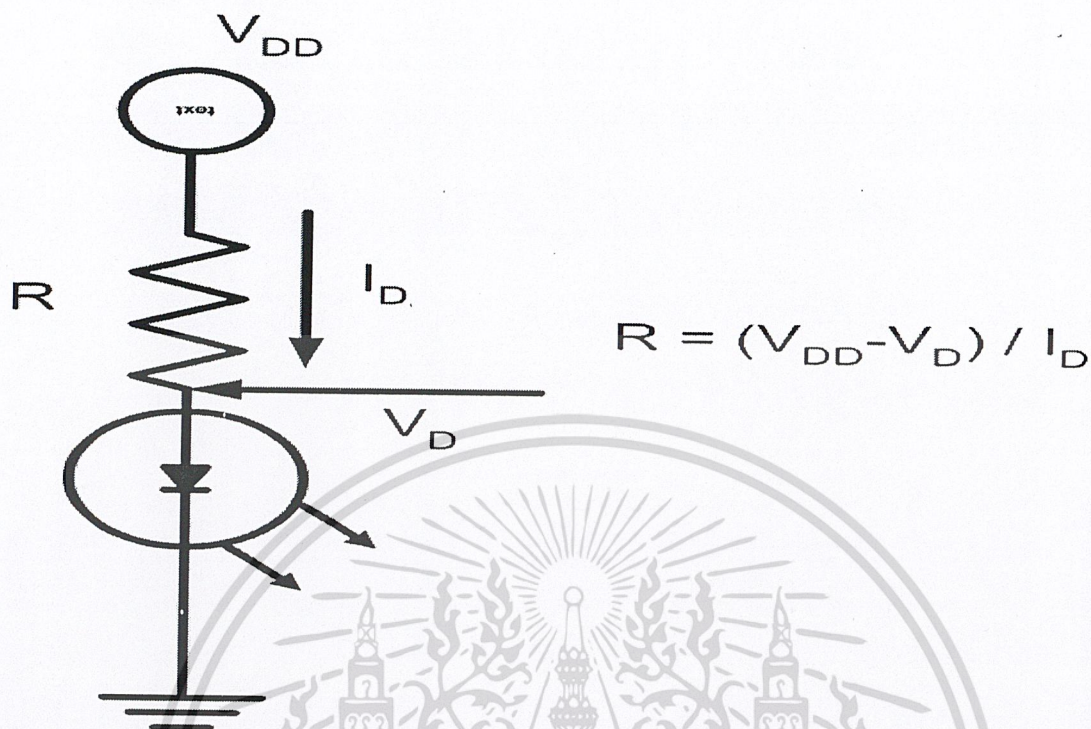


รูปที่ 3.3 มุมของแสงที่กำเนิดออกมาจาก LED

### 3.1.8 วงจรขับ LED

วงจรในรูปที่ 3.4 เป็นวงจรพื้นฐานในการใช้งานเพื่อขับ LED ให้เปล่งแสงออกมาโดยค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับ LED จะเป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่าน LED ไม่ให้เกิดความเสียหายและเป็นตัวจำกัดค่าความเข้มแสงที่กำเนิดออกมา สามารถคำนวณได้โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยงของวงจรลบด้วยค่าแรงดันไบอัสตรงของ LED หารด้วยค่ากระแสที่เราต้องการให้ไหลผ่าน LED ซึ่งต้องมีค่าเพียงพอที่จะทำให้ LED เปล่งแสงออกมาและต้องไม่ให้ค่ากระแสในขณะไบอัสตรงมีค่ามากเกินไปจนเกิดความเสียหาย โดยค่าของแรงดันไบอัสตรงและค่ากระแสที่ LED ขอมให้ไหลผ่านได้โดยไม่เกิดความเสียหายสามารถดูได้จาก specifications ของ LED แต่ละตัว นอกจากนี้ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับ LED ยังทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสไบอัสกลับไม่ให้มีค่ามากเกินไปจน

LED เกิดความเสียหาย หากแหล่งจ่ายไฟมีการเปลี่ยนขั้วเช่นกรณีที่น่า LED ไปใช้งานกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

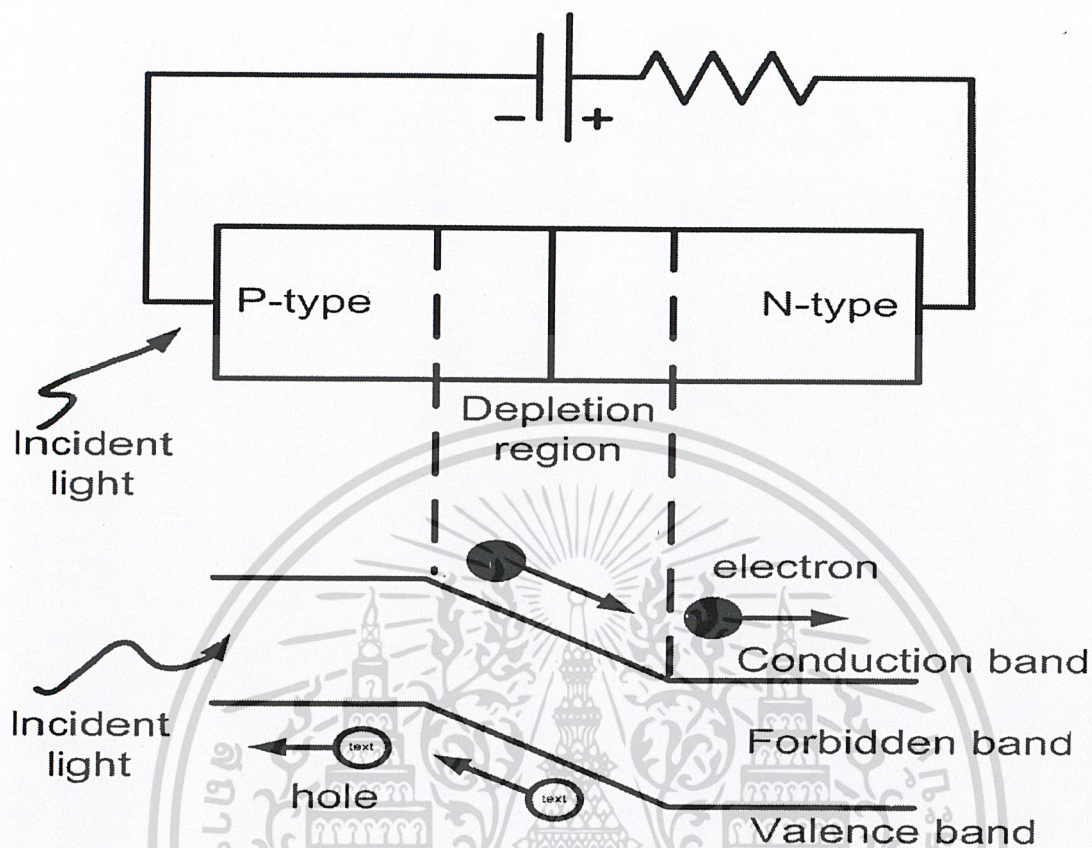


รูปที่ 3.4 การจัดวงจรขับ LED แบบพื้นฐาน

### 3.2 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

ในการทดลองครั้งนี้ ได้เลือกอุปกรณ์รับแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้โฟโตไดโอด เนื่องจากค่าของกระแสหรือว่าแรงดันที่ออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่มากกระทบการใช้งานไม่ยุ่งยากและมีความไว (response time) ในการตอบสนองต่อแสงที่มากกระทบเร็ว โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n และอีกด้านหนึ่งจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ดังรูปที่ 3.5 แสดงพื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n เมื่อบริเวณรอยต่อ p-n ได้รับโฟตอนจากแสงที่มีพลังงานเพียงพอตกกระทบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ใหม่เกิดขึ้น (electron-hole pair) ทำให้มีอิเล็กตรอนจากฝั่ง p เคลื่อนที่ข้ามบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ไปยังฝั่ง n ในขณะที่โฮล จากฝั่ง n ก็จะเคลื่อนที่ข้ามบริเวณปลอดพาหะไปยังฝั่ง p ผลก็คือเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น นอกจากนี้โฟโตไดโอดยังเป็นอุปกรณ์รับแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีราคาไม่สูงมากนัก และกระแสเข้าที่พู่ทที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่มากกระทบ ในรูปที่ 3.5 แสดงพื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n เมื่อบริเวณรอยต่อ p-n ของโฟโตไดโอดได้รับโฟตอน

จากแสงที่มีพลังงานเพียงพอจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน โฮล ใหม่ขึ้น เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น  
ภายในตัวโฟโตไดโอด

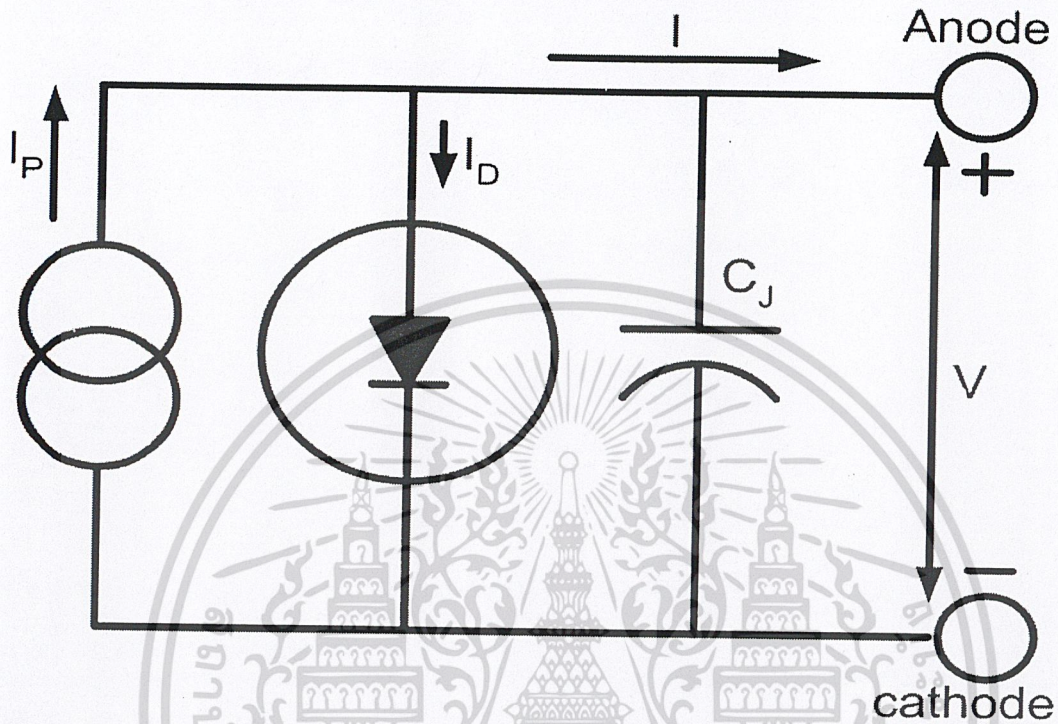


รูปที่ 3.5 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ P-N เมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด

พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ P-N แสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นรูปแบบจำลองพื้นฐานของโฟโตไดโอดจะประกอบไปด้วยการขนานกันของแหล่งจ่ายกระแส ไดโอดในอุดมคติ (ideal diode) และค่าคาปาซิแตนซ์ของรอยต่อ (junction capacitance)



รูปที่ 3.6 พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด

จากรูปเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากระแสสุทธิที่จ่ายออกมาจากโฟโตไดโอด ( $I$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_r - I_D \quad (3.2)$$

โดยค่ากระแส Photocurrent ( $I_p$ ) สามารถหาได้จาก

$$I_r = SE \quad (3.3)$$

เมื่อ S เป็นความไว (sensitivity) หรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นค่ากระแส photocurrent ที่กำเนิดออกมาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่มีแสงตกกระทบ E เป็นความสว่างของแสงที่มีตกกระทบบริเวณรอยต่อ p-n ในส่วนของค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอด  $I_0$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

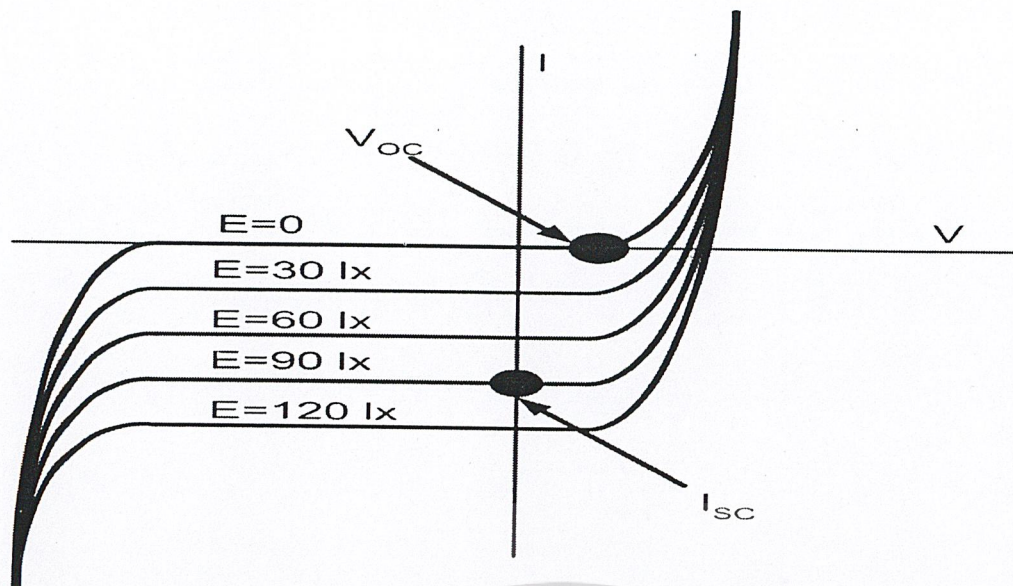
เมื่อ  $I_0$  เป็นค่ากระแสอิ่มตัวเมื่อไดโอดได้รับไบอัสกลับ V เป็นแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด K เป็นค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann constant) และ T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (Kelvin)

โฟโตไดโอดจะมีการทำงานอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ รูปแบบแรกเป็นการทำงานแบบ Photovoltaic โดยทำงานเหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ค่าแรงดันในขณะเปิดวงจร (open circuit) ที่กำเนิดจากโฟโตไดโอดนี้จะไม่เป็นเชิงเส้นกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ โดยคิดในขณะเปิดวงจรและไม่มีกระแสไหลออกจากตัวโฟโตไดโอด ( $I=0$ ) ค่าแรงดันเข้าที่พหุจะหาได้จากสมการ

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_p}{I_0} + 1 \right) \quad (3.5)$$

อีกรูปแบบหนึ่งเป็นการทำงานแบบ photoconductive นั่นคือแสงที่มาตกกระทบทำให้เกิดกระแสขึ้นในตัวโฟโตไดโอดไหลออกมาภายนอกเมื่อต่อวงจร โดยคิดขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวโฟโตไดโอดมีค่าเป็นศูนย์ในขณะลัดวงจร (short circuit) ( $V=0$ ) หรือมีค่าคงที่เป็นค่าเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง การทำงานรูปแบบนี้ค่ากระแสที่เกิดขึ้นจากตัวโฟโตไดโอดจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นโดยตรงกับแสงที่มาตกกระทบบริเวณรอยต่อ p - n รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นต่อค่าความเข้มแสงที่เข้ามาตกกระทบ โดยค่ากระแสเข้าที่พหุสามารถหาได้จากสมการที่ 3.6 ดังนี้

$$I_{sc} = SE \quad (3.6)$$

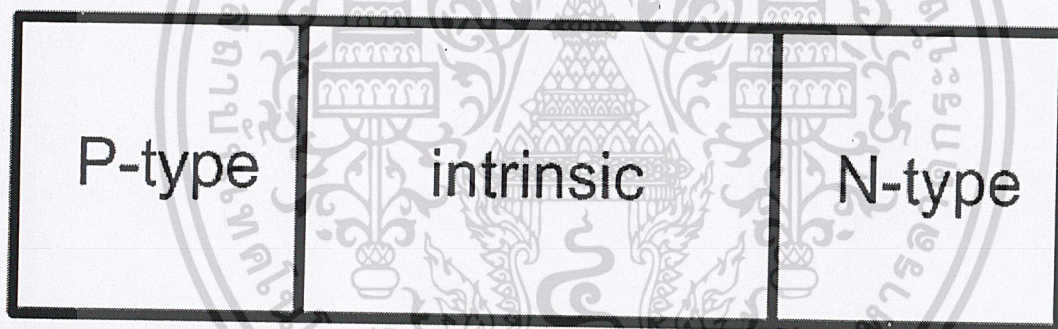


รูปที่ 3.7 กราฟกระแสเข้าที่พู่ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆของโฟโตไดโอด

จากรูปที่ 3.7 เมื่อโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n ใช้งานในรูปแบบ photoconductive จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบ โดยดูได้ระหว่างแกนของความเข้มแสงและค่ากระแสเข้าที่พู่จะให้ค่าความไวของโฟโตไดโอด โดยปกติจะมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.05 % ตลอดช่วงแต่สามารถเพิ่มได้ประมาณ 2-3 % ที่ค่าความเข้มแสงและค่ากระแสสูงๆ นอกจากนี้ความไวของโฟโตไดโอดยังขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบด้วย ค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงนี้ (spectral response) จะขึ้นกับชนิดของธาตุหรือสารประกอบที่ใช้สร้างรวมทั้งความถี่ของรอยต่อ p-n โดยส่วนมากมักจะมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ในช่วงแคบๆ อย่างเช่นโฟโตไดโอดบางเบอร์จะออกแบบให้ตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงย่านอินฟราเรดได้ดีแต่ตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงย่านที่มองเห็นได้ (Visible light) ไม่ดีเป็นต้น ในบางครั้งถ้าไม่สามารถหาได้ก็จำเป็นต้องใช้โฟโตไดโอดแบบอาร์เรย์ (Array) ที่สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงกว้างทั้งย่านแสงที่มองเห็นได้และแสงย่านอินฟราเรดได้ดี ในรูปที่ 3.9 เป็นตัวอย่างโฟโตไดโอดเบอร์ TSL250R ที่สามารถทำงานได้ดีในช่วงความยาวคลื่นแสงประมาณ 400-1000 nm โฟโตไดโอดเมื่อใช้งานในรูปแบบ photoconductive จะมีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างน้อย โดยทั่วไปจะมีค่าความไวต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยประมาณ  $+0.2\% / ^\circ\text{C}$  นอกจากนี้โฟโตไดโอดมีการตอบสนอง (response time) ต่อแสงที่มากกระทบค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับ photo cell โดยมีระยะเวลาประมาณ  $20\ \mu\text{s}$  นอกจากนี้โฟโตไดโอดยังมีราคาไม่แพงและการออกแบบวงจรประกอบการใช้งานไม่ยุ่งยาก

โฟโตไดโอดมีอยู่หลายแบบที่แตกต่างจากโฟโตไดโอดพื้นฐานแบบรอยต่อ p-n เช่น โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic) มาคั่นกลางระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด p และชนิด n เพื่อลดค่าของตัวเก็บประจุบริเวณรอยต่อ (junction capacitance) ให้มีค่าน้อยลง และเพิ่มพื้นที่รับแสง รวมทั้งการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่มีค่ามากได้ดีขึ้น โฟโตไดโอดแบบ shottky ที่มี response time สูงทำให้สามารถทำงานที่ความยาวคลื่นแสงน้อยๆได้ดี หรือโฟโตไดโอดแบบ metal-semiconductor-metal และโฟโตไดโอดแบบ avalanche โดยโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ก็มีการใช้งานในเครื่องวัดความเข้มตัวของออกซิเจนภายในเลือดจากภายนอกร่างกายและในการทดลองครั้งนี้ก็ได้ทดลองใช้โฟโตไดโอดชนิด p-i-n เป็นตัวรับความเข้มแสงที่ส่งผ่านน้ำอย่างพาราและแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะมีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic) คั่นอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของ สาร p และสาร n จากโครงสร้างที่ได้รับการปรับปรุงนี้ผลก็คือทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อแบบ p-n ที่มีพื้นที่รับแสงเท่ากันทำให้โฟโตไดโอดแบบ p-i-n มีการตอบสนองต่อแสงเร็วขึ้นนอกจากนี้ยังมี bandwidth ในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น และที่สำคัญเมื่อขนาดของตัวโฟโตไดโอดแบบ p-i-n มีขนาดเท่ากับ โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n ในราคาในท้องตลาดก็ไม่ต่างกัน



รูปที่ 3.8 ลักษณะของ P-I-N โฟโตไดโอด

### 3.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ (junction capacitance)

ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของโฟโตไดโอด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งโดยจะมีค่าเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพื้นที่รอยต่อของโฟโตไดโอด แต่จะมีค่าลดลงได้เมื่อมีการเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับ แต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากค่าแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดมีค่าจำกัด ความไวในการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ RC บริเวณรอยต่อ (RC time constant) และค่าความต้านทานที่นำมาต่อเป็นโหลดให้กับตัวโฟโตไดโอด อย่างไรก็ตามค่าความไวของโฟ

โตะไดโอดก็สามารถเพิ่มได้ โดยการเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับให้สูงแต่วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการนำโตะไดโอดมาใช้งาน

### 3.2.3 Dark current

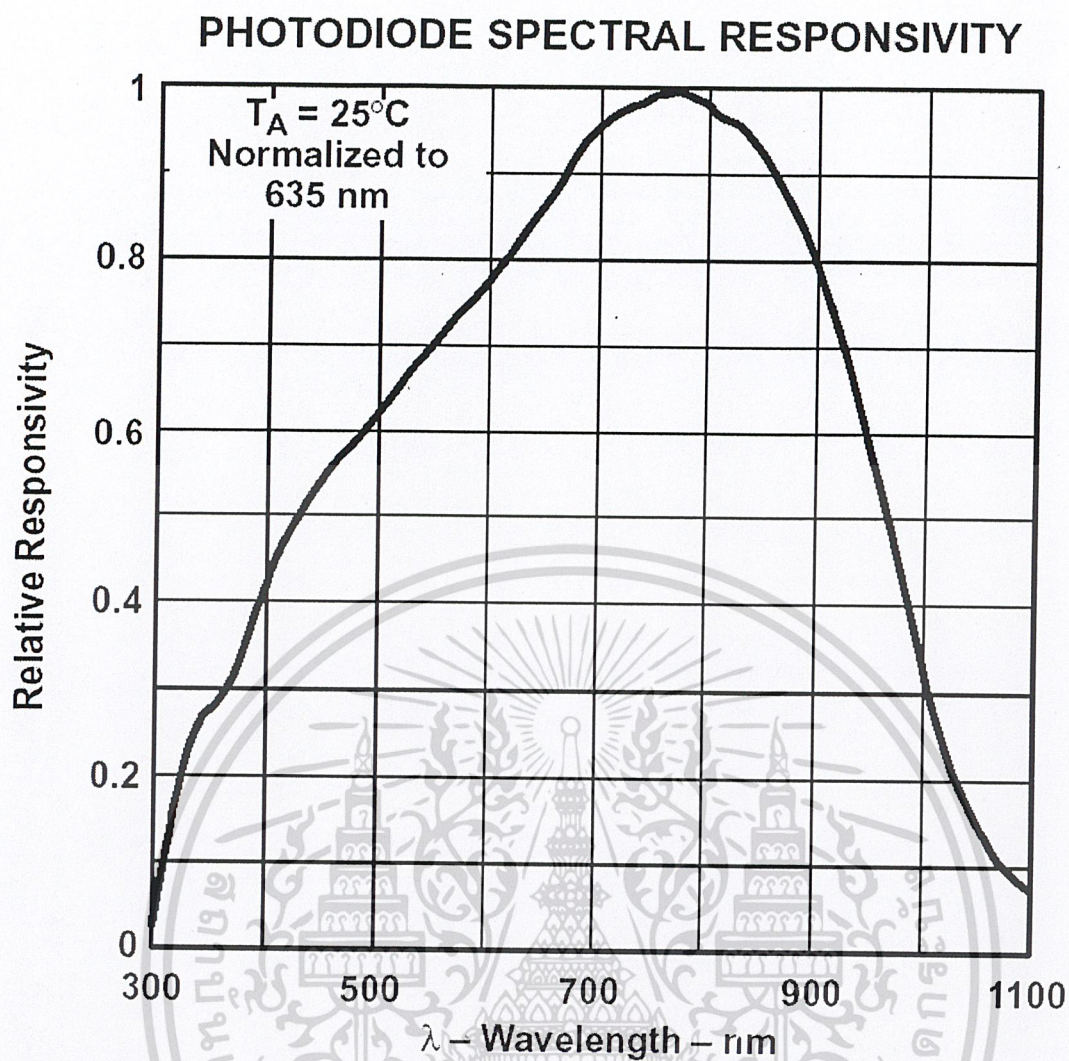
Dark current เป็นค่ากระแสรั่วย้อนกลับที่ไหลในตัวโตะไดโอดขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบ กระแสที่ไหลในขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบตัวโตะไดโอดนี้ จะมีค่าเฉพาะและขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่จ่ายให้กับตัวโตะไดโอด ในขณะที่แรงดันไบอัสโตะไดโอดเป็นมีค่าเป็นศูนย์นี้จะมีแรงดันตกคร่อมตัวโตะไดโอดค่าน้อยๆเหมือนกับแรงดัน offset ใน op amp โดยค่ากระแส dark current นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อนกลับหรืออุณหภูมิที่โตะไดโอดได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.2.4 ความไว (Sensitivity)

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ค่าของกระแสเข้าที่พุทของโตะไดโอดเมื่อใช้งานในรูปแบบ photoconductive จะมีความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นความไวก็คือค่ากระแสเข้าที่พุทกับความเข้มแสงที่มาตกกระทบในขณะที่มีอุณหภูมิคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง ในการหาคุณสมบัติข้อนี้ของโตะไดโอดมีการใช้แหล่งกำเนิดแสงหลายแบบด้วยกันแตกต่างกันในแต่ละโรงงาน บางกรณีใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยดูความยาวคลื่นค่ากลาง (center frequency) ที่กำเนิดออกมาใน specification ของ LED ในกรณีนี้ความเข้มของแสงจะมีหน่วยเป็น  $\text{mW/cm}^2$  แต่ถ้าเป็นการทดสอบตามมาตรฐานของ International Commission on Illumination (CIE) จะมีหน่วยของความสว่างเป็นลักซ์ (lux) และแหล่งกำเนิดแสงมักใช้หลอดทังสเตน (tungsten lamp)

### 3.2.5 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง (Spectral Response)

ในรูปที่ 3.9 แสดงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโตะไดโอดเบอร์ TSL250R โดยการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงนี้มีความสำคัญในการเลือกโตะไดโอดให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ต้องการได้ตลอดช่วง โดยปกติโรงงานผู้ผลิตที่บอกค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโตะไดโอดควรมีความไวสูงสุดที่ความยาวคลื่นใด (peak sensitivity) ผู้ออกแบบต้องพิจารณาเลือกโตะไดโอดที่มีความเหมาะสมเองโดยพิจารณาจากกราฟการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโตะไดโอดจาก specifications ที่ได้จากผู้ผลิต สำหรับในการวัดหาค่าปริมาณเนื้อยางในน้ำยางพาราจะใช้ความยาวคลื่นแสงสองช่วง คือในช่วงประมาณ 400 nm และ 635 nm โตะไดโอดที่เลือกใช้ควรจะสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงทั้งสองช่วงได้ดี



รูปที่ 3.9 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตไดโอด

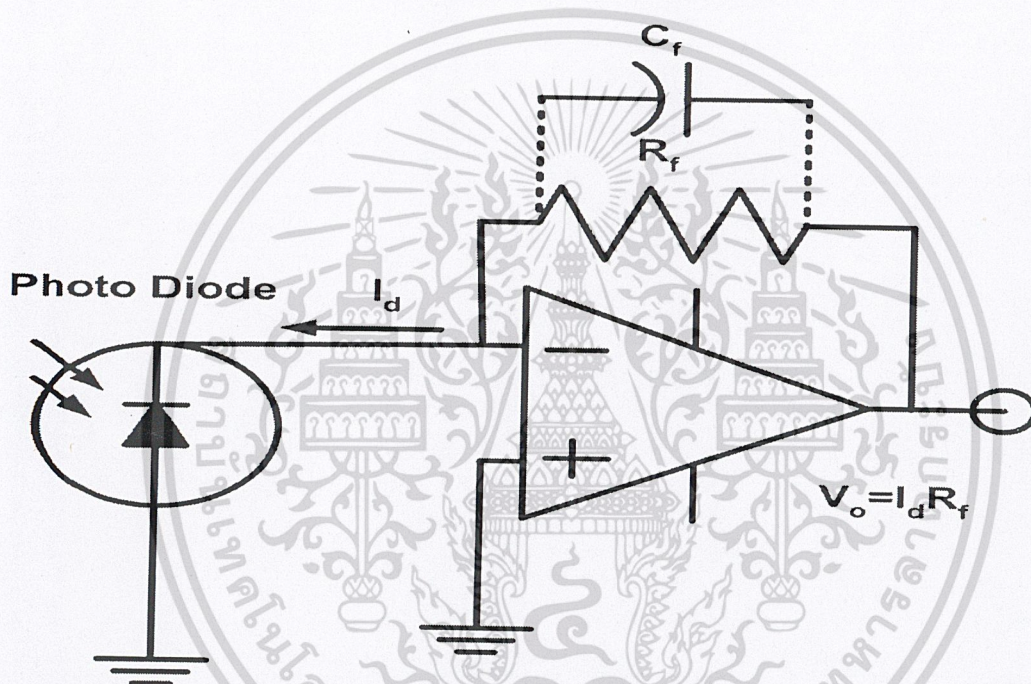
### 3.3 วงจรขยายสัญญาณ

เมื่อโฟโตไดโอดเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าแล้ว วงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการบันทึกสำหรับใช้เป็นข้อมูลเพื่อหาค่าปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพาราต่อไป ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้วงจรขยายแบบ Transimpedance เป็นวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดัน วงจรขยายแบบอื่นก็สามารถใช้สำหรับแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันได้ แต่วงจรขยายแบบ transimpedance เป็นที่นิยมใช้ในเครื่องมือที่ใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวรับแสงและแปลงค่ากระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันอย่างเช่น เครื่องวัดค่าความอิมิตัวของออกซิเจนภายในเลือดจากภายนอกร่างกายโดยไม่มีการเจาะเลือดเป็นต้น

### 3.3.1 วงจรขยายสัญญาณ Transimpedance แบบพื้นฐาน

รูปที่ 3.10 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรขยายแบบ transimpedance โดยวงจรจะทำหน้าที่แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโฟโตไดโอดให้เป็นแรงดันที่เข้าที่พุดได้ จากการที่กราวด์เสมือน (visual ground) ระหว่างอินพุทบวกและอินพุทลบของออปแอมป์จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโฟโตไดโอดมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ดังนั้นค่ากระแสที่เกิดจากโฟโตไดโอดจึงไหลผ่านความต้านทานที่ทำหน้าที่ป้อนกลับระหว่างเข้าที่พุดและอินพุทลบของออปแอมป์ กลายเป็นแรงดันที่เข้าที่พุดโดยจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่มาตกกระทบบตัวโฟโตไดโอดจะมีค่าดังสมการ

$$V_o = I_d R_f \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.10 วงจรขยาย transimpedance แบบพื้นฐาน

สมการที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าอัตราขยายสัญญาณของวงจร transimpedance จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานป้อนกลับ โดยปกติแสงที่ส่งผ่านออกมาจะมีค่าไม่เกิน 5 % จากการใช้ LED แบบ superbright ดังนั้นวงจรและโฟโตไดโอดจะทำงานที่ความเข้มแสงค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามวงจร transimpedance ที่แสดงอย่างง่ายนี้ก็มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานเพื่อหาค่าการส่งผ่าน โดยยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงสำหรับการออกแบบวงจรขยายแบบ transimpedance อีกหลายประการเช่น ความถี่ที่ใช้งาน อัตราขยายเป็นต้น โดยจะได้มีการปรับปรุง การคำนวณและออกแบบในหัวข้อต่อไป

### 3.4 การพิจารณาออกแบบวงจรขยายสัญญาณ

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ใช้โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์รับแสง ในรูปแบบ Photoconductive ที่ให้ค่าเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่มาตกกระทบจากนั้นจะใช้วงจร transimpedance แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่ามีความจำเป็นต้องพิจารณาหลายประการด้วยกัน เช่นลักษณะของตัวโฟโตไดโอด ความถี่ที่จะใช้งาน ค่าของความต้านทานป้อนกลับ ค่าของตัวเก็บประจุที่ต่อรวมในวงจรรวมทั้งออฟแอมป์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ โดยในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงต่อไป

#### 3.4.1 ตัวเก็บประจุของโฟโตไดโอด (Photodiode capacitance)

ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของโฟโตไดโอด (junction capacitance) ควรจะมีค่าต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยสามารถเลือกดูได้จาก specifications ของโฟโตไดโอดที่ได้จากผู้ผลิต ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของโฟโตไดโอดนี้ จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนและมีผลต่อช่วงการตอบสนองต่อความถี่ (bandwidth) ของวงจร

#### 3.4.2 ขนาดพื้นที่ของโฟโตไดโอด (Photodiode active area)

ขนาดพื้นที่ของโฟโตไดโอดควรจะมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้มีค่า signal to noise ratio มีค่าสูง นอกจากนี้ขนาดพื้นที่ของโฟโตไดโอดยังเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อค่าความจุบริเวณรอยต่อ

#### 3.4.3 ค่าความต้านทานป้อนกลับ (Feedback resistor)

ค่าความต้านทานป้อนกลับที่มีค่ามากจะเป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนที่สำคัญในวงจร โดยค่าของความต้านทานจะแปรผันกับค่า Thermal noise ดังสมการที่ 3.8

$$thermal\ noise = \sqrt{4kTBR} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโบลซ์แมน  $T$  เป็นอุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน (Kelvin)  $B$  เป็น noise bandwidth (Hz) และ  $R$  เป็นค่าความต้านทานป้อนกลับ ( $\Omega$ ) จากสมการค่าแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับ  $R$  ดังนั้น ค่า signal to noise ratio จะมีค่าดีขึ้นเพราะว่าสัญญาณรบกวนจะแปรผันในลักษณะ square root ของค่าความต้านทานป้อนกลับที่มีค่าสูงขึ้น

### 3.4.4 ออปแอมป์ (Op amp)

ออปแอมป์ที่ใช้ในวงจร transimpedance นี้ต้องการชนิดที่ต้องการค่ากระแสอินพุทมีค่าน้อย ในหรือมีค่า input impedance สูงนั่นเองเนื่องจากค่าความต้านทานของโฟโตไดโอดขณะได้รับไบอัสกลับมีค่าสูงและค่ากระแสที่กำเนิดออกมาจากโฟโตไดโอดมีค่าน้อย รวมทั้งวงจรยังทำงานที่ความเข้มแสงต่ำอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องการอัตราการขยายสัญญาณที่สูง ออปแอมป์ที่มีอินพุทเป็น FET จึงน่าจะเหมาะสมที่ใช้ในวงจรนี้มากกว่าออปแอมป์ที่มีอินพุทเป็นทรานซิสเตอร์

### 3.4.5 ค่าคาปาซิเตอร์ป้อนกลับ (Feedback capacitor)

คาปาซิเตอร์ที่ทำป้อนกลับในวงจรนี้จะทำหน้าที่ลดอัตราการขยายสัญญาณไม่ให้ loop gain มีค่าสูงมากนัก เพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพของวงจรและป้องกันการ oscillate ในการเลือกค่าคาปาซิเตอร์นี้ได้มีการวิเคราะห์ไว้โดย Graeme (1992) และได้แสดงไว้เป็นสูตรสำหรับหาค่าตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ป้อนกลับ ( $C_f$ ) ที่เหมาะสม เมื่อขนาดพื้นที่ของโฟโตไดโอดมีขนาดใหญ่ โดยค่าตัวเก็บประจุที่รอยต่อควรจะมีขนาดใหญ่กว่าค่าตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ป้อนกลับ

$$C_f = \sqrt{\frac{C_i}{2\pi R_f f_c}} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $f_c$  เป็นค่าความถี่ที่ unity gain ของออปแอมป์  $C_i$  เป็นค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดที่อินพุทของวงจร (ค่าตัวเก็บประจุที่อินพุท = ค่าตัวเก็บประจุที่รอยต่อของโฟโตไดโอด + ค่าตัวเก็บประจุที่อินพุทของออปแอมป์)  $R_f$  เป็นค่าความต้านทานป้อนกลับ โดยสามารถเขียนในรูปสูตรทั่วไปเมื่อค่าตัวเก็บประจุที่รอยต่อของโฟโตไดโอดมีขนาดเล็กได้ดังนี้

$$C_f = \frac{1}{4\pi R_f f_c} (1 + \sqrt{1 + 8\pi R_f C_i f_c}) \quad (3.10)$$

เมื่อค่าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่จะทำให้ Bandwidth ของวงจรมีค่าลดลงโดยค่า bandwidth ของวงจรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$BW = 1.4 f_p \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$f_p = \sqrt{\frac{f_c}{2\pi R_f (C_i + C_f)}} \quad (3.12)$$

### 3.4.6 การช้ลวงจรขยายสัญญาณ (Shielding)

วงจรที่ได้กล่าวถึงนี้เป็นวงจรที่มีความไวสูง และมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ที่สูงด้วย ดังนั้นวงจร transimpedance นี้จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาได้ง่าย ทั้งจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็ก และ สัญญาณความถี่วิทยุ

สัญญาณจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเข้ามาในรูปของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นในตัวโฟโตไดโอดและวงจร transimpedance ได้ ในการลดสัญญาณรบกวนรูปแบบนี้บางครั้งจำเป็นต้องมีการหุ้มตัวโฟโตไดโอดและวงจรด้วยโลหะ โดยจะเปิดเฉพาะบริเวณที่ทำหน้าที่รับแสงเท่านั้น แต่สิ่งหนึ่งที่จะเข้ามาเกี่ยวข้องเมื่อทำการหุ้มด้วยโลหะคือจะเกิดค่าตัวเก็บประจุระหว่างวงจรรขยายและกราวด์อันอาจมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบได้

...สัญญาณการรบกวนจากแม่เหล็กนี้มีความยากในการควบคุมมากกว่า การรบกวนจากสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถป้องกันได้โดยการช้ล แต่การรบกวนจากแม่เหล็กวิธีการช้ลจะไม่สามารถป้องกันได้ วิธีที่สามารถทำได้คือต้องทำให้พื้นที่ของวงจรมีค่าน้อยสุด ค่าความต้านทานสูงๆก็จะมีควมไวในการรับสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน นอกจากนี้ขั้วต่อและการเดินสายระหว่างอุปกรณ์ต่างๆควรจะมีระยะสั้นสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

.....การรบกวนจากคลื่นวิทยุ (radio frequency interference, RFI) การรบกวนนี้อาจมาจากเครื่องมือที่ใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสาร หรือจากอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการวินิจฉัยและรักษาผู้ป่วยในบริเวณใกล้เคียงการป้องกันการรบกวนจากคลื่นวิทยุที่ดีคือใช้การช้ลและใช้วงจรกรองความถี่ การใช้สายช้ลใน probe โดยเฉพาะสายตัวนำที่นำสัญญาณจากโฟโตไดโอดกลับมาขังวงจรรขยาย หรือการออกแบบวงจรให้โฟโตไดโอดทำงานในย่านความถี่ที่ไม่อยู่ในช่วงความถี่คลื่นวิทยุเป็นต้น

### 3.5 หัวตรวจ (Probes)

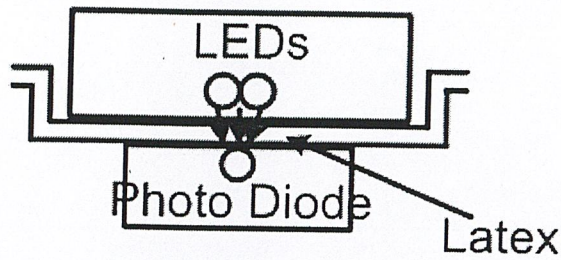
หัวตรวจจากที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 การสร้างสมการสำหรับหาค่าความเข้มข้นทำได้สองรูปแบบด้วยกันคือทำนายจากค่าการดูดกลืนและทำนายจากค่าการส่งผ่านแสง ดังนั้นหัวตรวจก็สามารถทำได้สองรูปแบบหลักๆ คือหัวตรวจแบบตรวจรับค่าการส่งผ่านและหัวตรวจแบบตรวจรับค่าการสะท้อนกลับ แต่ทั้งสองรูปแบบนี้ก็มึหลักการทำงานตรวจวัดหาค่าองค์ประกอบ ที่ต้องการทราบค่าโดยการตรวจวัดหาค่าการส่งผ่านหรือตรวจวัดหาค่าการสะท้อนกลับนั่นเอง ในหัวตรวจแบบรับค่าการส่งผ่าน แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสง จะอยู่ตรงกันข้ามคนละด้านของวัตถุที่ต้องการตรวจวัดหาค่าการส่งผ่าน ในขณะที่หัวตรวจแบบตรวจรับค่าการสะท้อนกลับแหล่งกำเนิดแสง และตัวรับแสงจะอยู่ด้านเดียวกันของวัตถุที่ต้องการหาค่าการสะท้อนกลับในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงพื้นฐานการทำงานของหัวตรวจทั้งสองแบบ ในการวัดหาค่าความเข้มข้นของปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพารา นั้นสามารถออกแบบและใช้หัวตรวจได้ทั้งสองแบบ โดยในการออกแบบหัวตรวจยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเช่น การรบกวนจากแสงภายนอกที่จะเล็ดลอดเข้าสู่ตัวโฟโตไดโอด

ภาครับ อุณหภูมิจากน้ำยางพาราที่อาจทำให้คุณสมบัติการทำงานของ LED และโฟโตไดโอดเปลี่ยนไป การทดลองเพื่อหาค่าปริมาณเนื้อยางในน้ำยางพาราในครั้งนี้ จะออกแบบโดยใช้หัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการส่งผ่านที่ใช้งานแบบต่างๆไป เนื่องจากมีความสะดวกมากกว่าหัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการสะท้อนกลับ ในการป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้ามารบกวนตัวโฟโตไดโอดภาครับ เนื่องจากหัวตรวจที่ออกแบบต้องมีการใช้ LED และโฟโตไดโอดหลายๆดวงประกอบอยู่ใน โดยจะออกแบบหัวตรวจในลักษณะที่ให้อยู่ใกล้กับน้ำยางพาราโดยให้ตัวรับแสงและแหล่งกำเนิดแสงอยู่คนละด้านตรงกันข้ามกันและมีระยะห่างระหว่างกันสั้นที่สุด

### 3.5.1 หัวตรวจแบบตรวจรับค่าการส่งผ่าน (Transmittance Probes)

ลักษณะหัวตรวจในรูปแบบนี้จะใช้แสงส่งผ่านน้ำยางพารา หรือวัตถุที่เราต้องการทราบองค์ประกอบภายใน โดยให้แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงอยู่ตรงกันข้ามคนละด้านของน้ำยางพาราดังรูปที่ 3.11 ได้แสดงการวางตัวของโฟโตไดโอดรับแสงและ LED ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปภายในหัวตรวจ จะประกอบด้วยโฟโตไดโอดและจำนวน LED ตามค่าความยาวคลื่นแสงที่เราต้องการทดสอบเช่นในครั้งแรกที่ทำการทดลองนี้จะมีจำนวน LED มากถึง 25 ดวงจากนั้นเมื่อทำการเลือกความยาวคลื่นแสงที่มีความเหมาะสมแล้วก็จะเหลือ LED เพียง 2 ดวงเท่านั้น ส่วนโฟโตไดโอดในการทดลองครั้งแรกจะใช้เบอร์เดียวกันกับการทดลองครั้งที่สองคือต้องตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มองเห็นได้ และตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงย่านอินฟราเรดได้ดี แสงที่กำเนิดจาก LED ต้องมีความเข้มมากพอที่จะส่งผ่านน้ำยางพาราไปยังอีกด้านหนึ่งได้ ในการทดลองนี้ได้เลือก LED ชนิดที่เป็นแบบ super bright หรือ high bright เพื่อให้มีความเข้มแสงที่มากพอและรับประกันได้ว่าแสงที่กำเนิดจาก LED สามารถส่งผ่านน้ำยางพาราได้อย่างแน่นอน

การวางตำแหน่งของ LED และโฟโตไดโอดควรอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันมากที่สุดเพื่อจะได้รับพลังงานแสงที่กำเนิดจาก LED สูงสุดอีกทั้งควรมีระยะใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และไม่ควรให้ตัวโฟโตไดโอดและ LED สัมผัสกับน้ำยางพาราโดยตรงเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากอุณหภูมิของน้ำยางพารา

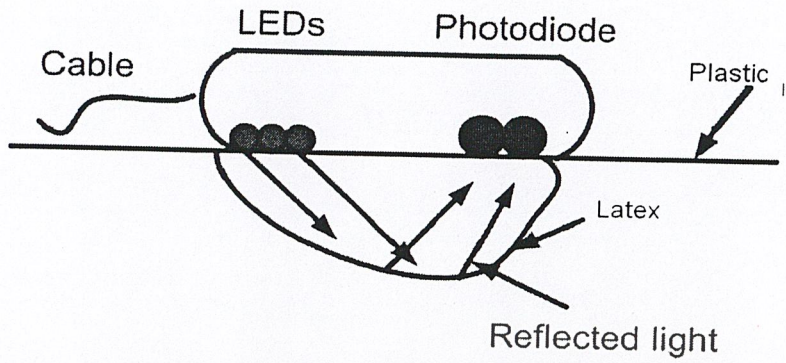


รูปที่ 3.11 หัวตรวจชนิดตรวจรับค่าการส่งผ่าน

### 3.5.2 หัวตรวจแบบตรวจจับค่าการสะท้อนกลับ (Reflectance Probes)

ในกรณีที่ดี้าสามารถออกแบบหัวตรวจไม่ให้แสงจากภายนอก เข้ามาตกกระทบตัวโฟโตไดโอดจนทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาผิดเพี้ยนได้ หรือค่าความยาวคลื่นแสงจากการทดสอบออกมาอยู่ในย่านแสงอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว หัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการสะท้อนกลับก็จะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าหัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการส่งผ่าน เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายกว่า และในการใช้งานจริงก็จะสะดวกมากกว่า เพียงแค่ นำหัวตรวจไปวางใกล้ๆ น้ำยาพาราในระยะโฟกัสที่พอดีระหว่าง LED และ โฟโตไดโอด โดยไม่ต้องค้ำน้ำยาตัวอย่างมาใส่ในถ้วยแก้ว สำหรับสมการในการคำนวณเพื่อหาค่าองค์ประกอบส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อภายในของน้ำยาพาราที่เราต้องการ ก็จะแตกต่างไปจากกรณีของหัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการส่งผ่าน ในหัวตรวจแบบนี้จะตรวจรับปริมาณความเข้มในการสะท้อนกลับของแสงที่กำเนิดและส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง (back scattered) จากน้ำยาพารา ข้อได้เปรียบในการวัดหาค่าองค์ประกอบภายในเนื้อเยื่อของหัวตรวจแบบนี้ คือสามารถวางที่ตำแหน่งใด โดยให้น้ำยาพาราอยู่ในระยะโฟกัสระหว่างตัวรับและตัวส่งเท่านั้น แต่มีข้อเสียเปรียบอยู่ที่ความยากในการคำนวณหาค่าที่ต้องการ การปรับเทียบ (calibration) และ ข้อจำกัดด้านความแม่นยำ (accuracy) ที่ด้อยกว่าหัวตรวจแบบตรวจรับค่าการส่งผ่าน โดยจะเป็นปัญหาหลักของหัวตรวจแบบตรวจวัดหาค่าการสะท้อนกลับจากน้ำยาพารา ความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับจากน้ำยาพาราไม่ได้ขึ้นกับค่าการดูดกลืน (absorption) จากองค์ประกอบน้ำยาพาราเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับการสร้างบริเวณผิวของน้ำยาพาราบริเวณนั้นด้วย เนื่องจากบริเวณผิวด้านบนของน้ำยาอาจมีความเข้มขึ้นกว่าบริเวณด้านล่าง หรือถ้าอยู่กลางแดดก็อาจมีอุณหภูมิ ที่สูงกว่าน้ำยาพาราที่อยู่ลึกลงไป ในส่วนการวางตัวของ LED และ โฟโตไดโอดในหัวตรวจแบบนี้จะอยู่ด้านเดียวกันบริเวณใดก็ได้ใกล้ๆ น้ำยาพารา ดังรูปที่ 3.12 โดยปกติสามารถออกแบบให้ โฟโตไดโอดตัวรับจะอยู่ด้านหน้า แต่ก็ไม่มีข้อบ่งบอกว่าเมื่อวางสลับตำแหน่งกันแล้ว จะทำให้มีข้อผิดพลาดหรือประสิทธิภาพลดลงแต่อย่างใด นอกจากนี้ในหัวตรวจแบบนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเหมือนกับหัวตรวจแบบตรวจวัดหาค่าการส่งผ่านคือ การรบกวนของแสงจากภายนอก

อุณหภูมิจากผิวของน้ำยางพารา ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและโฟโตไดโอดที่ใช้รับแสง



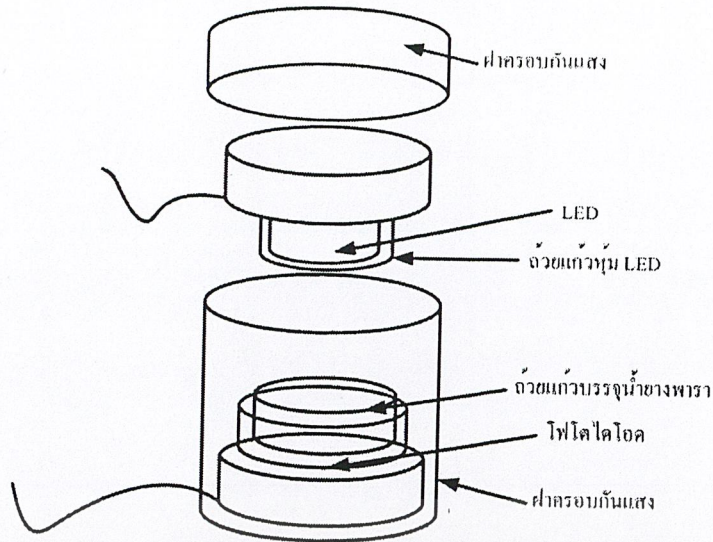
รูปที่ 3.12 หัวตรวจแบบตรวจรับค่าการสะท้อนกลับ



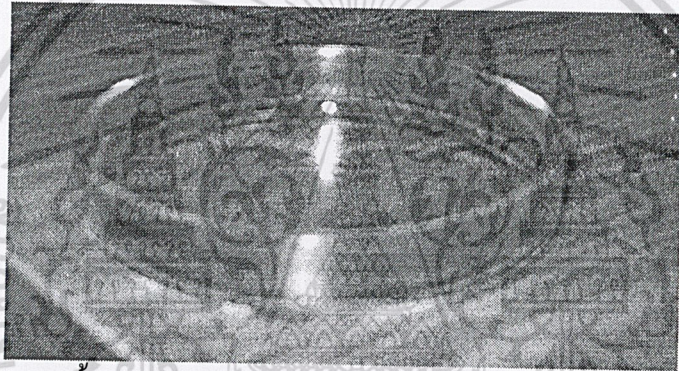
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือและหัวตรวจ (Probe) สำหรับวัดค่าการส่งผ่าน

แสงที่กำเนิดจากไดโอดเปล่งแสง (LED) เมื่อเดินทางเข้าสู่ด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพาราจะแยกออกเป็นหลายส่วนด้วยกันเช่น มีการสะท้อนกลับ บางส่วนส่งผ่านไป บางส่วนถูกดูดกลืน รวมทั้งมีการกระจาย จากด้วยแก้วและจากน้ำยางพาราก่อนที่จะถึงตัวรับแสง ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาค่าการส่งผ่านของแสงที่ผ่านด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา การออกแบบวงจรและการสร้างหัวตรวจแบบตรวจวัดค่าการส่งผ่าน โดยใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงและใช้โฟโตไดโอดทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับแสงโดยจะวางอยู่ฝั่งตรงกันข้ามคนละด้านของด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นรูปโครงสร้างของเครื่องมือและหัวตรวจที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อหาค่าการส่งผ่าน และในรูปที่ 4.2 เป็นวิธีการใช้งาน โดยวางหัวตรวจเข้ากับด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพาราไว้แล้ว และจะได้กล่าวถึงการออกแบบและการทำงานของเครื่องอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นการสร้างหัวตรวจจาก LED ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมดจำนวน 25 ดวงที่มีความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆกันตั้งแต่ 370 - 950 nm และใช้โฟโตไดโอดสำหรับทำหน้าที่รับแสงหนึ่งตัวด้วยกันคือสามารถตอบสนองได้ทั้งช่วงแสงที่มองเห็นได้และในย่านแสงอินฟราเรด เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการวาดกราฟการส่งผ่านเพื่อดูการตอบสนองของส่วนที่เป็นเนื้อยางในน้ำยางพารากับความยาวคลื่นแสงทั้ง 25 ค่าแล้ว หลังจากพิจารณาเลือกค่าความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้สำหรับนำมาสร้างสมการทำนายค่าส่วนที่เป็นเนื้อยางจากด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา ก็จะเหลือเพียง LED ที่กำเนิดความยาวคลื่นแสงค่าอื่นๆออกมาสร้างหัวตรวจใหม่โดยจำนวน LED ที่ใช้ในหัวตรวจตัวใหม่นี้จะลดลงเหลือเพียงความยาวคลื่นแสง ที่วิเคราะห์และพิจารณาเลือกแล้วที่มีความเป็นไปได้สำหรับการทำนายค่าส่วนที่เป็นเนื้อยางด้วยวิธีทางแสง ผ่านด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารามากที่สุด โดยเลือกออกมาจากความยาวคลื่นแสงทั้ง 25 ค่าที่ทำการทดลองในครั้งแรก สำหรับความยาวคลื่นแสงที่พิจารณาเลือกแล้ว จะได้นำไปใช้ในการทดลองหาสมการและตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าในสมการทำนายค่าส่วนที่เป็นเนื้อยางในครั้งต่อไป



รูปที่ 4.1 โครงสร้างหัวตรวจสำหรับวัดค่าการส่งผ่านแสงจากถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยารักษา

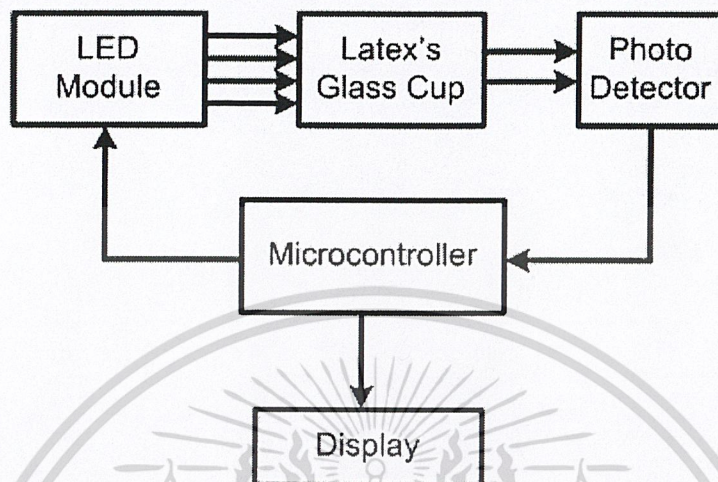


รูปที่ 4.2 ถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยารักษา

#### 4.1 Block diagram และการทำงานของเครื่อง

รูปที่ 4.3 แสดง block diagram การทำงานของเครื่องมือในการหาค่าการส่งผ่านจากถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยารักษา เริ่มจากการเลือก LED ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ละดวง จากความยาวคลื่นแสงมากที่สุด 950 nm เรียงลำดับเรื่อยไปจนถึงค่าความยาวคลื่นแสงน้อยสุด 370 nm ในครั้งแรกได้ใช้ LED จำนวน 25 ดวงประกอบอยู่ในหัวตรวจ โดยใช้วงจรกำเนิดพัลส์สี่เหลี่ยมความถี่ประมาณ 5 kHz duty cycle ประมาณ 25 % ในการขับ LED ให้เปล่งแสงออกมาเพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของ LED และลดสัญญาณรบกวนจากควมถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วน Photo Diode ภาครับทำหน้าที่รับแสงในย่านแสงที่มองเห็นได้ และแสงในช่วงแสงอินฟราเรดโดยวางอยู่ด้านตรงกันข้ามกับ LED ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง สำหรับรับแสงและแปลงความเข้มแสงที่ส่งผ่านออกมาเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าเข้ามายังวงจรขยายสัญญาณ จากการที่ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของ Photo Diode ในแต่ละช่วงมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้วงจรที่มี

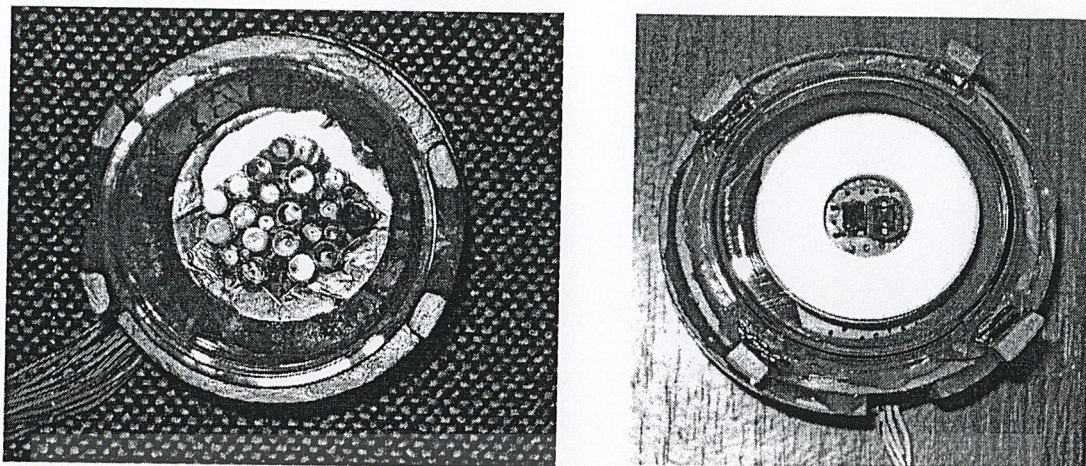
อัตราขยายสัญญาณแรงดันที่ต่างกันในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ก่อนที่จะส่งผ่านมายัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแปลงสัญญาณความเข้มแสงที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกสู่ ภาคนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูลก่อนที่จะนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ โดยวาดกราฟอัตราส่วนการ ส่งผ่าน (transmittance) โดยจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของ block diagram แต่ละส่วนต่อไป



รูปที่ 4.3 Block diagram การทำงานของเครื่องมือสำหรับวัดค่าการส่งผ่าน

#### 4.2 หัวตรวจ (Probe)

ในการวางตำแหน่งของ LED และโฟโตไดโอดภายในหัวตรวจ จะเลือก LED ที่มีมุม view angle มากกว่าไว้ด้านนอก และที่มีค่ามุม view angle น้อยกว่าไว้ตรงกลาง LED ทุกดวง เป็นแบบ super bright หรือ high bright เส้นรอบวงภายนอกเมื่อวาง LED ทั้ง 25 ดวงลงไปแล้วมีขนาด 3 cm นั่นคือ ถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยารต้องมียุ่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 3 cm ขึ้นไปจึงจะสามารถ ใช้หัวตรวจนี้เก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านได้เนื่องจากหัวตรวจที่มี LED อยู่ภายในถึง 25 ดวง ถ้ามีขนาดเล็กอาจจะทำให้แสงจาก LED ถูกส่งผ่านไปยังโฟโตไดโอดตัวรับได้โดยตรงไม่ผ่านน้ำยารที่บรรจุอยู่ในถ้วยแก้ว ระยะห่างระหว่าง LED และโฟโตไดโอดเท่ากับ 10 mm เพื่อให้ถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยารไม่มีการสัมผัสโดยตรงกับตัว LED และโฟโตไดโอด น้ำยารที่บรรจุในถ้วยแก้ว มีความสูง 0.5 mm ขณะทำการวัดค่าการส่งผ่าน เนื่องจากถ้ามีความสูงมากจะทำให้แสงจาก LED ไม่มีความเข้มเพียงพอที่จะส่งผ่านไปได้ และวัสดุที่บุภายในตัวหัวตรวจต้องสามารถกำจัดแสงจากภายนอกที่จะเข้ามาบดบังโฟโตไดโอดที่ทำหน้าที่รับแสงภายในหัวตรวจได้ดี



รูปที่ 4.4 ลักษณะของหัวตรวจที่บรรจุ LED และ โฟโตไดโอด

#### 4.2.1 Specifications ของไดโอดเปล่งแสง (LED)

LED ที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถหาซื้อได้ในราคาไม่สูงนัก ในส่วนการทำงานและพิจารณาลักษณะสำหรับเลือก LED มาใช้งานได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างความยาวคลื่นแสงของ LED จำนวน 5 ดวง จากที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 25 ดวง โดย LED มาจากผู้ผลิตหลายบริษัท เริ่มจากความยาวคลื่นแสงน้อยสุดคือ 370 nm เป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงความยาวคลื่นแสงมากที่สุดที่ใช้ในการทดลองคือ 950 nm เป็นความยาวคลื่นแสงย่านอินฟราเรดในการเลือก LED สำหรับใช้งานในครั้งนี้มีทั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm และ 5 mm โดยทำการวาง LED ภายในหัวตรวจ ให้ได้จำนวนหลายๆดวงโดยมีพื้นที่เส้นรอบวงน้อยสุด และพยายามให้แสงจาก LED ในช่วงที่ให้พลังงานแสงสูงสุดส่วนใหญ่ตกลงบนถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาพารา ก่อนส่งผ่านไปสู่อุปกรณ์โฟโตไดโอด โดยไม่เกิดการลอดออกทางด้านข้างของถ้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาพารา อันอาจทำให้ค่าการส่งผ่านที่ได้จากการเก็บข้อมูลมีความผิดพลาดได้

ส่วนที่ต้องพิจารณาเป็นหลักคือความยาวคลื่นแสงค่ากลางที่ LED กำเนิดออกมา มีค่าพลังงานสูงสุด ( $\lambda_{\text{peak}}$ ) และสำหรับค่ามุม view angle จะใช้สำหรับพิจารณาเลือกวางตำแหน่งของ LED ภายในหัวตรวจ ในส่วนช่วงความกว้างของความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมา ( $\lambda_{\text{range}}$ ) หรือเรียกอีกอย่างว่า ( $\lambda/2$ ) คือค่าความยาวคลื่นแสงที่ LED กำเนิดออกมาแล้วพลังงานแสงลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่าความยาวคลื่นแสงที่ LED มีค่าพลังงานสูงสุดไม่กว้างมากนักโดยคุณสมบัติข้อนี้จะมีผลในสมการสำหรับการทำนายค่าส่วนที่เป็นเนื้อยาง อันอาจทำให้สมการที่ค่าความผิดพลาดได้ ในส่วนรายละเอียด (specifications) ของ LED ที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ก ได้แสดงไว้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้สำหรับทำนายค่าส่วนที่เป็นเนื้อยาง จำนวนสามค่าด้วยกัน ไม่ได้แสดงไว้ทั้ง 25 ค่าที่ใช้ในการทดลองครั้งแรก โดยเลือกแสดงรายละเอียดของ LED จากที่

พิจารณาเลือกออกมาจากการทดลองครั้งแรกคือ 400 nm, 630 nm และ 645 nm ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านสำหรับการทดลองครั้งที่สอง

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างรายละเอียดของ LED ที่ใช้ในการทดลอง

Company	$\lambda_p$ (nm)	Emitting color	Lens color	View angle
Agilent Tech.	426	blue	clear	25° c
L.E.D. Tech.	635	Red	Red	74° c
L.E.D. Tech.	660	Red	clear	50° c
Infineon Tech.	935	IR	clear	15° c
TEMIC Semi.	950	IR	blue	16° c

#### 4.2.2 Specifications ของ Photo Diode

โฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลองนี้ต้องมีคุณสมบัติในการตอบสนองความยาวคลื่นแสงได้ดีตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงที่เลือกใช้จาก LED ทั้งหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้โฟโตไดโอดแบบอาร์เรย์ที่สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงได้ตลอดย่าน คือสามารถจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในย่านอินฟราเรด (infrared) และสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (visible light) เพื่อจะได้ใช้โฟโตไดโอดเพียงตัวเดียวในการแปลงความเข้มแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อจะได้ส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลต่อไป โฟโตไดโอดที่ทำหน้าที่รับแสงมีค่า  $\lambda_{peak}$  อยู่ที่ 760 nm และจากกราฟคุณลักษณะการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงได้ในช่วงตั้งแต่ประมาณ 370 – 1000 nm โดยในครั้งแรกนี้จะใช้โฟโตไดโอดอาร์เรย์เบอร์ TSL230R ผลิตจากบริษัท Texas Advance Optoelectronics Solutions โดยเป็นโฟโตไดโอดที่มีวงจรมอนิเตอร์และวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มแสงให้เป็นสัญญาณความถี่ประกอบอยู่ภายในด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์ทำให้สามารถต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรงจึงมีความสะดวกในการใช้งาน และความยาวคลื่นแสงที่วิเคราะห์และพิจารณาเลือกมาจากการทดลองครั้งแรกเพื่อทำการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่สองก็มีความยาวคลื่นแสงอยู่ในช่วงนี้ทั้งสามค่าคือ 400 nm, 630 nm และ 645 nm ดังนั้นในการทดลองครั้งที่สองภายในหัวตรวจอันใหม่จึงเหลือ LED เพียงสามดวงตามความยาวคลื่นแสงที่ได้พิจารณาเลือกแล้ว และโฟโตไดโอดสำหรับรับแสงก็สามารถเปลี่ยนไปใช้เบอร์ที่ตอบสนองความยาวคลื่นแสงในย่านที่มองเห็นได้ โดยไม่ต้องใช้เบอร์ที่ทำการทดลองในครั้งแรกก็ได้ในกรณีที่มียุทธศาสตร์ที่ดีกว่าและสามารถใช้งานได้สะดวกกว่า

ตารางที่ 4.2 รายละเอียด Photo Diode ที่ใช้ในการทดลอง

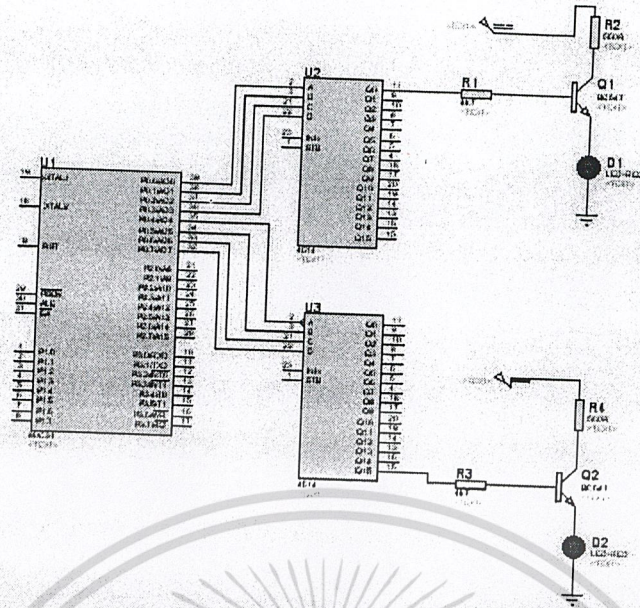
Company	Model	$\lambda_p$ (nm)	$\lambda$ Range (nm)
TAOS	TSL230R	780	370-1000
EG&G VACTEC	VTB8440B	580	330-720

### 4.3 วงจรภาคอินพุท

วงจรในภาคอินพุทนี้มีหลักๆอยู่สองส่วนด้วยกัน คือส่วนแรกเป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับขับ LED โดยจะใช้ขับ LED ให้กำเนิดแสงออกมาทีละดวง อีกส่วนหนึ่งเป็นวงจรรับสัญญาณอินพุทการกดปุ่มจาก switch เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เลือก LED ให้กำเนิดแสงทีละดวงโดยอาศัยหลักการนับสัญญาณพัลส์จากการกด switch ทีละลูกและแปลงเป็นสัญญาณเลขฐานสองจำนวนสี่บิตด้วยกันเพื่อเป็นอินพุทให้กับไอซี (IC) latch decoder 4 to 16 บิต เบอร์ CD4514 ที่สามารถถอดรหัสเลขฐานสองได้ถึง 16 ค่าจำนวนสองตัวทำให้สามารถเลือก LED ได้สูงสุดถึง 32 ดวงโดยใช้ขาพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 8 บิต โดยไอซี CD4514 จะให้เอาท์พุทเป็นค่าสูงและคงค่าไว้จนกว่าจะมีการกด switch ครั้งต่อไปเรียงลำดับทีละบิตจนครบทั้ง 16 บิตเพื่อเป็นสัญญาณสำหรับเลือก LED ทีละดวงก่อนที่จะจ่ายไปเป็นสัญญาณอินพุทให้กับทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขับ LED ให้กำเนิดแสงออกมาต่อไป

#### 4.3.1 วงจรขับ LED

วงจรสำหรับขับ LED ประกอบด้วยสองส่วนด้วยกัน คือส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับขับ LED และวงจรอีกส่วนหนึ่งที่จะทำหน้าที่เลือก LED เรียงลำดับในการเปล่งแสงทีละดวงจากความยาวคลื่นแสงมากที่สุดจนถึงความยาวคลื่นแสงน้อยสุดจนครบทั้ง 25 ดวง และวนกลับมาที่ดวงแรกอีกครั้ง โดยในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ประมาณ 5 KHz และสามารถปรับค่า duty cycle ได้ตั้งแต่ 10% จนถึง 90% โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ปรับค่า duty cycle ไว้ที่ประมาณ 25 % และมีแรงดันขณะเป็นสัญญาณพัลส์ช่วงสูงเท่ากับ 5 โวลต์



รูปที่ 4.5 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์และส่วนที่ทำหน้าที่เลือก LED ทีละดวง

### 4.3.2 วงจรรับสัญญาณการกด Switch เลือก LED

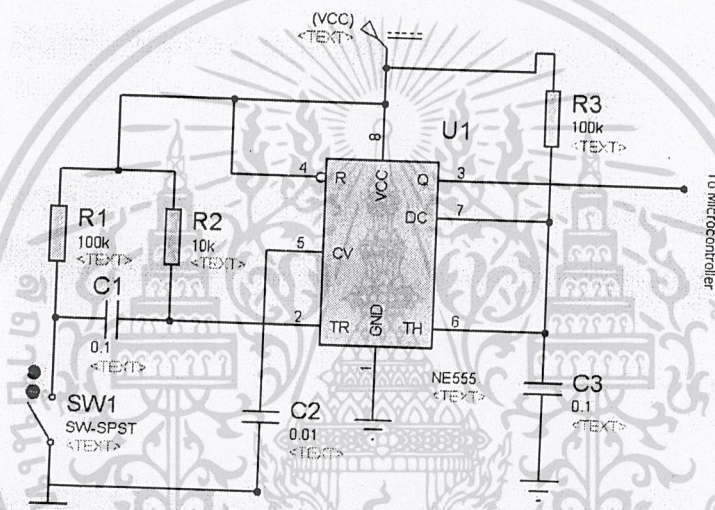
วงจรรับสัญญาณอินพุตจากการกด switch นี้ประกอบด้วยสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนแรกเป็นวงจรโมโนสเตเบิล (mono stable) ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกเมื่อมีการกด switch หนึ่งครั้งโดยใช้ IC Timer 555 รับอินพุตจากการกด switch แต่จะมีการเพิ่มเติมวงจรในส่วนอินพุตการรับสัญญาณ โดยต่อความต้านทาน 10K และ 100K กับตัวเก็บประจุ 0.1µF หนึ่งตัวร่วมกับ switch แบบกดติดปล่อยดับที่อินพุตขา 2 ของ IC555 โดยปกติวงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ IC555 จะทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์ที่เข้ามากระตุ้น หลักการทำงานของวงจรที่เพิ่มเติมเข้าไปนี้ คือในสภาวะเริ่มต้นสัญญาณอินพุตที่ขา 2 ของ IC555 จะมีแรงดันเท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงเมื่อมีการกด switch กระแสจะไหลผ่านค่าความต้านทาน 10K ที่ต่อระหว่างขา 2 และไฟเลี้ยงผ่านตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันลงกราวด์ทำให้สัญญาณอินพุตที่ขา 2 มีค่าลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ขอบขาลงไปกระตุ้นวงจรโมโนสเตเบิลให้ทำงาน จากนั้นแรงดันที่ขา 2 จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงดังเดิมความเร็วในการ charge ตัวเก็บประจุจนแรงดันสูงขึ้นจนเท่ากับไฟเลี้ยงนี้ขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกัน ในที่นี้ค่าความต้านทานคือ 10K และค่าตัวเก็บประจุคือ 0.1µF และในขณะที่มีการกด switch เมื่อตัวเก็บประจุมีการ charge ประจุเต็มแล้ว ถ้าหากว่าหน้าสัมผัสของ switch ยังไม่แยกออกจากกัน (การกด switch ค้างไว้) กระแสที่ไหลผ่าน switch จะเปลี่ยนเป็นไหลผ่านมาจากค่าความต้านทาน 100K ที่ต่ออนุกรมอยู่กับ switch แทนโดยตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ตัดวงจรด้านค่าความต้านทาน 10K ที่ต่ออนุกรมกับ switch ออกไป เพื่อให้แรงดันที่ขา 2 ของ IC555 ยังคงมีค่าสูงคือเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟเลี้ยงต่อไป การต่อวงจรในลักษณะนี้ที่อินพุทของ IC555 ก็เพื่อตัดสัญญาณรบกวนจากการกด switch แล้วมีการกระเพื่อมของหน้าสัมผัส switch ก่อนที่จะติดกันอย่างสนิท (bounce) ให้มีเพียงสัญญาณอินพุทสั้นๆ เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ที่เข้ามากระตุ้นให้วงจรโมโนสเตเบิลทำงาน ขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากเอาต์พุทของ IC555 ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรโมโนสเตเบิลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$t_{high} = 1.1R_A C \quad (4.1)$$

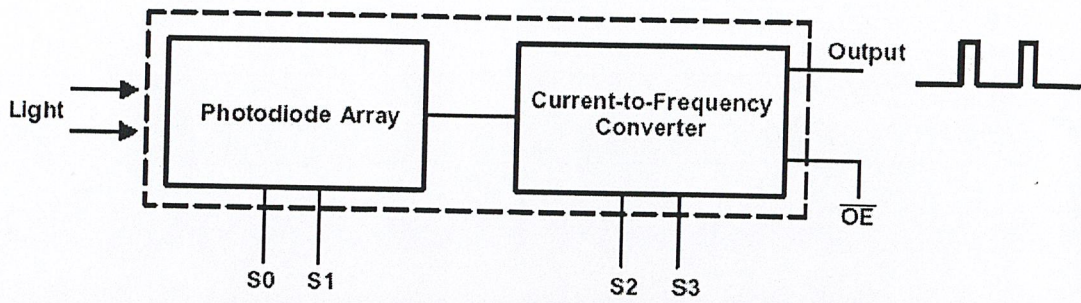
ก่อนที่จะส่งสัญญาณพัลส์นี้ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้เป็นสัญญาณในการเลือก LED ให้เปล่งแสงทีละดวง



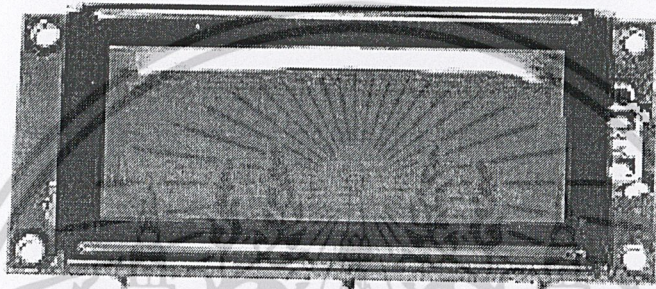
รูปที่ 4.6 วงจรรับสัญญาณอินพุทจากการกด Switch เลือก LED ให้เปล่งแสง

#### 4.4 วงจรขยายภาคเอาต์พุทและการทำงาน

เนื่องจากไอซีโฟโตไดโอดที่รับแสงและแปลงสัญญาณความเข้มแสงที่ตกกระทบให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนั้น ให้สัญญาณเอาต์พุทออกมาเป็นความถี่ที่แปรตามความเข้มแสงที่มากกระทบบังรูปที่ 4.7 จึงเป็นการง่ายในการใช้งานโดยสามารถต่อสัญญาณความถี่ที่มีขนาดแรงดัน 5 โวลต์นี้เข้ากับขาอินพุทของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง หลังจากนั้น โปรแกรมที่บรรจุอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็จะทำการคำนวณก่อนจะส่งออกมาแสดงผลผ่านจอแสดงผลแบบ LCD ต่อไป



รูปที่ 4.7 วงจรแสดงผลโดยใช้ไอซี TSL230R ที่ให้เข้าที่พุดออกมาเป็นความถี่



รูปที่ 4.8 จอแสดงผลแบบ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ความยาวคลื่นแสงและการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการหาความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้ สำหรับนำมาทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราด้วยวิธีทางแสง เมื่อได้ความยาวคลื่นแสงที่พิจารณาเลือกแล้วว่ามี ความเป็นไปได้สำหรับการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา จากนั้นจะนำความยาวคลื่นแสงที่ได้ นี้มาเก็บข้อมูลอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาสมการและตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าในสมการ โดยนำเอาความยาว คลื่นแสงที่เลือกมาสร้างหัวตรวจและเครื่องมือสำหรับวัดค่าการส่งผ่านใหม่ เพื่อทำการวัดค่า การส่งผ่านแสงบริเวณด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาฟาราอีกครั้งหนึ่ง โดยการทดลองจะมีอยู่สองช่วง ด้วยกัน คือครั้งแรกจะเป็นการหาความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด สำหรับการทำนาย ค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา ในการทดลองในครั้งนี้ต้องการหาความยาวคลื่นแสงช่วงด้วยกันคือ ความยาวคลื่นแสงช่วงแรกต้องมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราที่เปลี่ยนแปลงไป และความยาวคลื่นแสงอีกช่วงหนึ่ง เป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความ เข้มข้นน้ำยาฟาราที่เปลี่ยนแปลงไป และการทดลองในครั้งที่สองจะเป็นการนำเอาความยาวคลื่น แสงที่พิจารณาแล้วว่ามีความเป็นไปได้ สำหรับการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราด้วยวิธีทางแสง มากที่สุดจากการทดลองครั้งแรก มาทำการเก็บข้อมูลเพื่อหาสมการและตัวแปรที่ยัง ไม่ทราบค่าใน สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราต่อไป

### 5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าเครื่องมือที่สำคัญ สำหรับการทดลองเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านแสง บริเวณด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาฟารามีสองอย่างด้วยกันคือ อุปกรณ์การทำยาแกว่งและเครื่องมือที่ สร้างขึ้นมาสำหรับหาค่าการส่งผ่านดังรายละเอียดในบทที่ 4 จำนวนครั้งในการทดลองสามารถแบ่ง ออกเป็นสองช่วงตามการทดลองคือ ในการทดลองครั้งแรกจำนวนครั้งสำหรับการเก็บข้อมูลค่าการ ส่งผ่านยังไม่ต้องการมากนัก เพราะเป็นเพียงการหาความยาวคลื่นแสงที่มีแนวโน้มความเป็นไปได้ ในการนำมาตรวจวัดค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราด้วยวิธีทางแสงว่ามีความยาวคลื่นใดบ้าง จากนั้น หลังจากทำการวาดกราฟการส่งผ่าน และพิจารณาเลือกความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้มาก ที่สุดแล้ว จึงทำการสร้างหัวตรวจสำหรับวัดค่าการส่งผ่านแสงบริเวณด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาฟารา ของครั้งใหม่ (light transmittance probe) โดยภายในหัวตรวจใหม่จะประกอบด้วย LED เฉพาะ ความยาวคลื่นแสงที่เลือกออกมาจากการทดลองครั้งแรก จำนวนครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลค่าการ ส่งผ่านในการทดลองครั้งที่สองนี้ เพิ่มจำนวนมากขึ้นมากกว่าในการทดลองครั้งแรก เนื่องจากใน การทดลองครั้งที่สอง เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า แทนลงไปในการคำนวณค่า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง ดังนั้นจึงต้องการจำนวนข้อมูลที่มากขึ้นเพื่อลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตัวแปรในสมการให้มีค่าน้อยลง ในขั้นตอนการหาค่าตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าในสมการสำหรับหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ในส่วนของการวาดกราฟได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมือสำหรับวาดกราฟการส่งผ่าน ในส่วนของการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ใช้เป็นค่าอ้างอิง จะใช้วิธีการนำตัวอย่างน้ำยางพาราที่วัดค่าการส่งผ่านแสงแล้ว ไปทำการอบแห้ง โดยจะใช้วิธีการนี้วัดค่าปริมาณเนื้อยางสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงในการทดลองทั้งสองช่วง

### 5.1.1 การทดลองที่ 1

(ความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้ในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา)

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในการทดลองครั้งแรก เป็นการหาความยาวคลื่นแสงที่มีแนวโน้มความเป็นไปได้สำหรับนำมาทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองครั้งแรกนี้ที่สำคัญมีสองอย่างด้วยกันคือ อย่างแรกเป็นตู้อบ กระจกชัลฟริกและน้ำสะอาด ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยวิธีการนำมาทำเป็นยางแห้ง ดังรายละเอียดวิธีการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากการทำให้เป็นยางแห้งนี้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวาดกราฟ และอย่างที่สองคือเครื่องมือรวมทั้งหัวตรวจที่สร้างขึ้นมา ดังรายละเอียดการออกแบบและการใช้งานที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านแสงที่ส่งผ่านน้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในถ้วยแก้ว โดยความเข้มแสงค่านี้ให้เป็นความเข้มของแสงตกกระทบ ( $I_0$ ) และหลังจากใส่น้ำยางพาราเข้าไปภายในหัวตรวจ ให้เป็นความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาได้ ( $I$ ) หลังจากได้ข้อมูลแล้วจะทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการวาดกราฟวิเคราะห์อัตราส่วนการส่งผ่านระหว่างแสงตกกระทบก่อนผ่านน้ำยางพารา ( $I_0$ ) และแสงที่ส่งผ่านน้ำยางพาราออกมาแล้ว ( $I$ ) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel คำนวณเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากการนำน้ำยางพาราไปทำให้เป็นยางแห้ง จำนวนตัวอย่างน้ำยางพาราที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะมี 4 ตัวอย่างด้วยกัน คือที่ความเข้มข้น 60% , 40% และ 20% ในการทดลองครั้งแรกนี้ต้องการเพียงดูว่าความยาวคลื่นแสงใดบ้าง ที่มีแนวโน้มความเป็นไปได้สำหรับนำมาสร้างสมการวัดหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง ดังนั้นจึงยังไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนมาก

ตารางที่ 5.1 ค่าความเข้มข้นน้ำยาที่ทำกรเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 1

ความเข้มข้น %	จำนวน LED (ดวง)	จำนวนครั้ง
60%	25	5
40%	25	5
20%	25	5

### 5.1.2 การทดลองที่ 2

(การหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพารา)

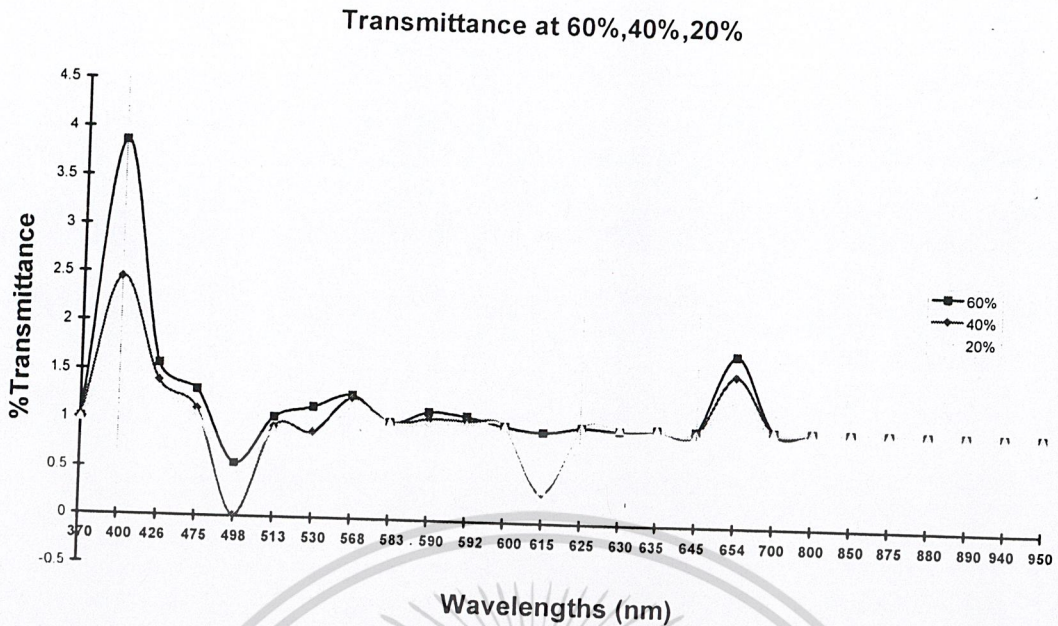
ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในการทดลองครั้งที่สองนี้ จำนวนครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านจะมีมากขึ้นเนื่องจากในการทดลองครั้งที่สอง เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าเพื่อแทนลงในสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราด้วยวิธีทางแสง เครื่องมือที่สำคัญในการทดลองครั้งที่สองนี้ยังคงใช้วิธีการนำตัวอย่างน้ำยาพาราไปทำให้แห้ง ในการหาค่าความเข้มข้นน้ำยาพารา เพื่อใช้เป็นค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราอ้างอิงสำหรับการวาดกราฟ อย่างที่สองเป็นเครื่องมือและหัวตรวจที่สร้างขึ้นใหม่โดยที่ภายในประกอบด้วย LED ตามความยาวคลื่นแสงที่พิจารณาเลือกจากการทดลองครั้งแรก 2 ดวงด้วยกัน ลักษณะยังเป็นหัวตรวจแบบใส่น้ำยาพาราลงในบริเวณถ้วยแก้วโดยแหล่งกำเนิดแสงจาก LED ยังคงอยู่ด้านบนและโฟโตไดโอดที่ไว้รับแสงอยู่ด้านล่างเหมือนกับการทดลองครั้งแรก จากความยาวคลื่นแสงทั้งสามค่าที่เลือกคือ 400 nm, 630 และ 645 nm ตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดและค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราที่ทำกรเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 2

ตารางที่ 5.2 จำนวนครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 2

ความเข้มข้น %	จำนวน LED (ดวง)	จำนวนครั้ง
60%	3	5
50%	3	5
40%	3	5
30%	3	5
20%	3	5
10%	3	5

## 5.2 การส่งผ่านความยาวคลื่นแสงในช่วง 370 nm จนถึง 950 nm

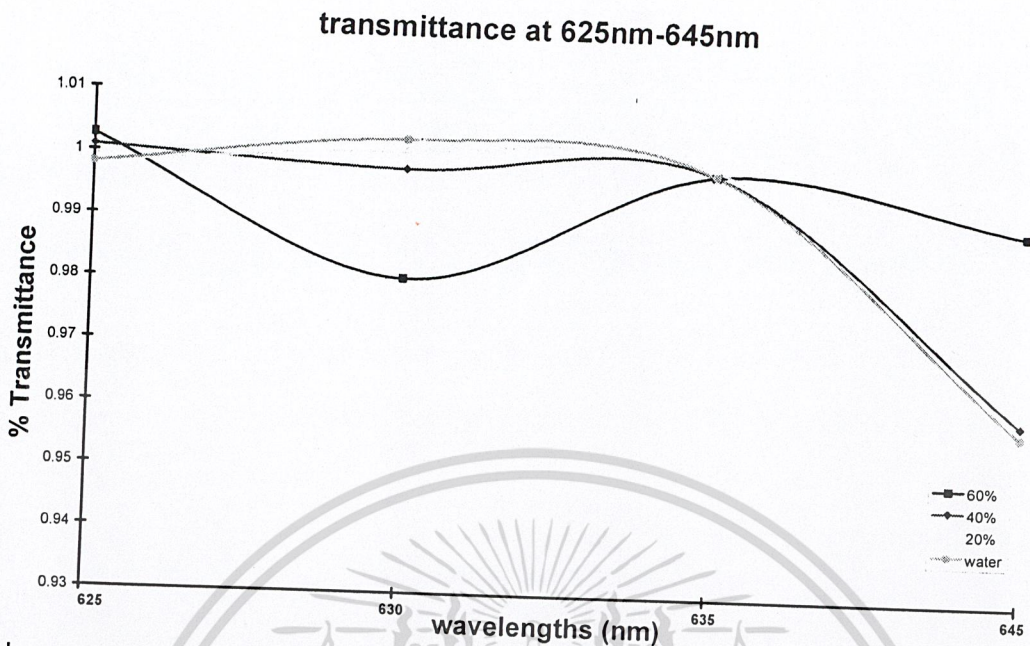
การเลือกความยาวคลื่นแสงเพื่อทำการทดลองในครั้งนี้ เป็นการเลือกความยาวคลื่นแสงในช่วงที่สามารถหา LED ที่มีขายตามท้องตลาดสำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยจะถือเอาความยาวคลื่นแสงช่วงที่ LED สามารถกำเนิดและมีกำลังงานสูงสุด ( $\lambda_{peak}$ ) เป็นสำคัญ โดยตัว LED จะต้องหาได้ตามท้องตลาดในราคาที่ไม่สูงมากนัก กราฟอัตราส่วนการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงแสงบริเวณด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาร่าง จากช่วงความยาวคลื่นแสงที่เลือกมาทำการทดลองคือ 370 – 950 nm ได้ทำการวาดกราฟโดยให้แกนนอนเป็นความยาวคลื่นแสง และแกนตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่าน กราฟแต่ละเส้นจะแทนความเข้มข้นน้ำยาร่างหนึ่งค่าที่ได้จากวิธีการนำไปทำเป็นยางแห้ง โดยในการวาดกราฟต้องการแสดงให้เห็นการตอบสนองบริเวณตรงจุดที่เลือกค่าความยาวคลื่นแสงมาทำการเก็บข้อมูลเป็นสำคัญ ลักษณะกราฟการส่งผ่านที่ได้จากเครื่องมือสำหรับหาค่าการส่งผ่านที่ประดิษฐ์ขึ้นแสดงในรูปที่ 5.1 เป็นกราฟของความเข้มข้นน้ำยาร่างต่างกัน 3 ค่า คือ 60 % , 40 % และ 20 % ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการทดลองนี้เป็นการหาความยาวคลื่นแสงที่มีความเป็นไปได้ สำหรับนำมาสร้างสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาร่างด้วยวิธีทางแสงจากช่วงความยาวคลื่นแสงที่เลือกมาทำการทดลองคือ 370-950 nm สำหรับในการทดลองครั้งแรกนี้ต้องการหาความยาวคลื่นแสงสองช่วงด้วยกันคือ ช่วงแรกเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาร่าง และช่วงที่สองเป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาร่าง จากกราฟผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าความยาวคลื่นแสงทั้งสองช่วงที่ต้องการหา นี้ ความยาวคลื่นแสงช่วงแรกที่มีความเป็นไปได้อยู่ในช่วงประมาณ 370-426 nm เป็นความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงความยาวคลื่นแสงช่วงสีน้ำเงิน โดยเป็นความยาวคลื่นแสงนี้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาร่าง และอีกช่วงหนึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงช่วงแสงสีแดงความยาวคลื่นแสงประมาณ 625 – 645 nm เป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาร่าง หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแสงช่วงแรก ในส่วนของความยาวคลื่นแสงอื่นนอกเหนือจากช่วงที่กล่าวถึงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน และเปลี่ยนแปลงขึ้นกับองค์ประกอบอื่นมากกว่าขึ้นกับค่าความเข้มข้นน้ำยาร่าง สำหรับความยาวคลื่นสองช่วงที่มีความเป็นไปได้สำหรับนำมาทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาร่างด้วยวิธีทางแสงทั้งสองช่วงจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไป



รูปที่ 5.1 ลักษณะกราฟการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงในช่วง 370 – 950 nm

### 5.2.1 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงในช่วงไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าในการทดลองครั้งแรกนี้ ต้องการหาความยาวคลื่นแสงสองช่วงด้วยกันคือความยาวแสงช่วงแรก เป็นช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา และความยาวคลื่นแสงอีกช่วงหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา จากการทดลองความยาวคลื่นแสง ที่มีความเป็นไปได้ว่าเป็นความยาวคลื่นแสงช่วงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงระหว่าง 625-645 nm โดยความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา นี้ จะใช้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง จากการเก็บข้อมูลค่าการส่งผ่านที่ได้จากจำนวน 5 ครั้ง และจากกราฟในรูปที่ 5.2 เป็นการวาดกราฟจากข้อมูลเดียวกันกับข้อมูลในกราฟรูปที่ 5.1 แต่ทำการขยายสเกลใหม่เพื่อให้เห็นค่าการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง ในช่วงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แกนตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่าน และแกนนอนเป็นความยาวคลื่นแสงสำหรับกราฟแต่ละเส้นแทนความเข้มข้นน้ำยารักษาที่มีค่าต่างกัน จากข้อมูลในครั้งแรกที่ทำการบันทึกไว้จำนวน 5 ครั้ง จะมีค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาต่ำสุดคือ 20 % และสูงสุดคือ 60 % จะเห็นว่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 625 nm 630 nm 635 nm และ 645 nm มีค่าการส่งผ่านใกล้เคียงกันและเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยารักษา น้อย อยู่ในช่วงไม่เกิน 10% นับได้ว่าเป็นความยาวคลื่นแสงช่วงที่น่าสนใจ และมีความเป็นไปได้สำหรับใช้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง โดยเฉพาะความยาวคลื่นแสงในช่วง 625 nm และ 635 nm เมื่อพิจารณาจากกราฟที่มีค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาต่างกัน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.2 จะมีค่าการส่งผ่านเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 1.0 ที่ 625 nm และ 630 nm ตามลำดับ



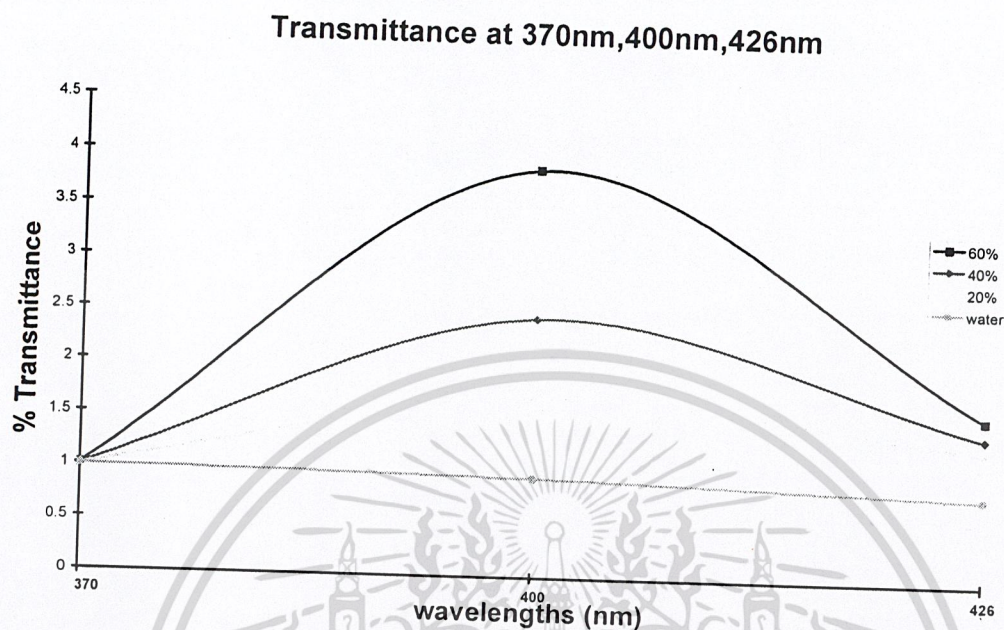
รูปที่ 5.2 การส่งผ่านความยาวคลื่นแสง 625, 630, 635 และ 645 nm

### 5.2.2 การส่งผ่านของยาวคลื่นแสงในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา

ความยาวคลื่นแสงอีกช่วงหนึ่งที่ต้องการหาในการทดลองครั้งนี้ คือความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราที่เปลี่ยนแปลงไป จากการพิจารณากราฟการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงในช่วง 426 – 950 nm จะเห็นว่าความยาวคลื่นแสงในช่วงประมาณ 370 – 426 nm มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราแบบแปรผกผันคือเมื่อความเข้มข้นน้ำยาฟารามีค่าสูงขึ้นค่าการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงในช่วงนี้จะมีค่าลดลง ดังในรูปที่ 5.3 เป็นกราฟที่มีความเข้มข้นน้ำยาฟาราต่างกัน 3 ค่าเหมือนกับกราฟในรูปที่ 5.1 แต่มีการขยายสเกลให้เห็นค่าการส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นแสง 370 – 426 nm ชัดเจนยิ่งขึ้น ความยาวคลื่นแสงในช่วงที่กล่าวถึงนี้ เป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้สำหรับใช้เป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา จากกราฟในรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มข้นน้ำยาฟาราลดลง ค่าการส่งผ่านที่ได้จะลดลงด้วย เช่นที่ความเข้มข้นน้ำยาฟารา 60 % ค่าการส่งผ่านจะมากที่สุดคือประมาณ 4 % ที่ 400 nm 2 % ที่ 426 nm และ 1% ที่ 370 nm ในขณะที่กราฟของความเข้มข้นน้ำยาฟารา 20 % ค่าการส่งผ่านจะน้อยกว่าคือ 1.5 % ที่ 400 nm 1% ที่ 370 nm และ 426 nm และจากกราฟจะเห็นว่าค่าการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงที่ 400 nm มีค่าการส่งผ่านที่ต่างกันมากที่สุด จนลักษณะกราฟในช่วงนี้เกือบเป็นเส้นตรงนั่นคือถ้าหากว่าเลือกความยาวคลื่นแสงในช่วงนี้สำหรับวัดหาค่าความเข้มข้นน้ำยาฟารา ค่าความผิดพลาดจากการที่ LED กำเนิดแสงออกมาไม่ตรงกับความยาวคลื่นแสงค่ากลางที่ LED ให้พลังงานออกมาสูงสุด ( $\lambda_{peak}$ ) ดังที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ใน specifications ก็จะมีผลกระทบต่อสมการและทำให้เกิดค่าความผิดพลาดจากกรณีนี้เกิดขึ้นน้อยลง



รูปที่ 5.3 การส่งผ่านความยาวคลื่นแสงในช่วง 370 nm ถึง 426 nm

### 5.3 การเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อหาสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาฆ่าเชื้อ

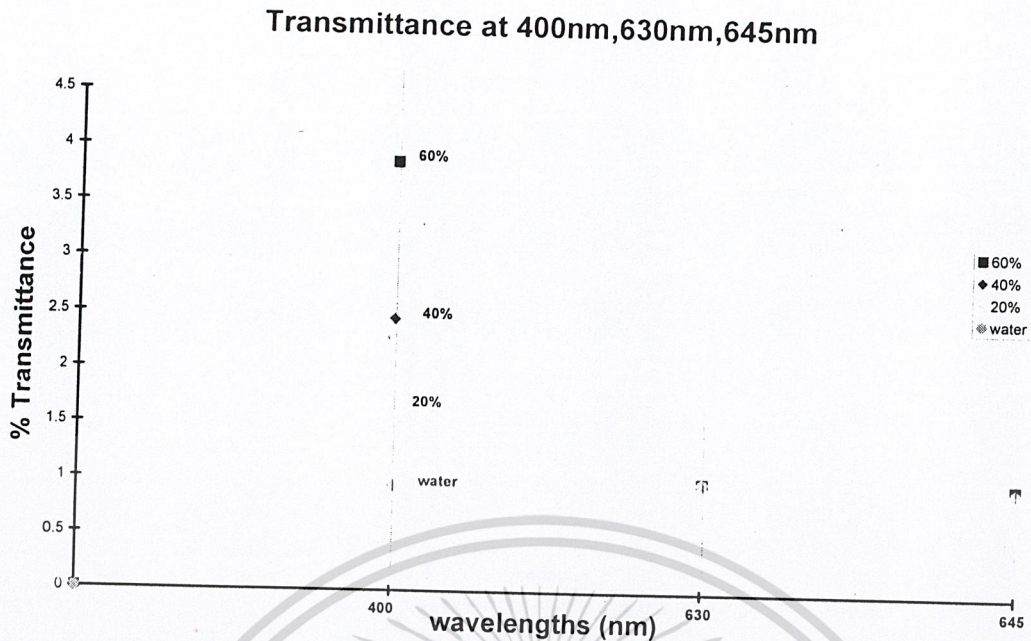
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ความยาวคลื่นแสงที่ใช้สำหรับสร้างหัวตรวจเพื่อหาการส่งผ่านแสงบริเวณด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยาฆ่าเชื้ออันใหม่ในการทดลองครั้งที่สองนี้มีสามค่าด้วยกันคือ 400 nm, 630 nm และ 645 nm โดยเลือกจากความยาวคลื่นแสง ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฆ่าเชื้อหนึ่งความยาวคลื่นคือ 400 nm เนื่องจากความยาวคลื่นแสง 400 nm จากกราฟจะเห็นว่ามีการส่งผ่านเกือบเป็นเส้นตรงจึงเลือกความยาวคลื่นแสง 400 nm มาเพียงความยาวคลื่นเดียว ในส่วนของความยาวคลื่นแสง 426 nm จากกราฟในรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าเป็นช่วงที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ถ้าหากค่าความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดจาก LED มีค่าผิดพลาดจากความยาวคลื่นแสงค่ากลาง ( $\lambda_{peak}$ ) มาก อาจทำให้สมการที่ได้มีค่าความผิดพลาดสูงจึงไม่เลือกความยาวคลื่นแสงค่านี้ สำหรับอีกสองความยาวคลื่นแสงเป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยาฆ่าเชื้อ คือ 635 nm และ 645 nm ความยาวคลื่นแสงสองค่านี้เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 5.2 เมื่อความเข้มข้นน้ำยาฆ่าเชื้อมีค่าต่างกันจะเห็นว่ามีค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าความยาวคลื่นแสงช่วงอื่น โดยเส้นกราฟมีค่าเกือบซ้อนทับกัน ในส่วนของหลักการเบื้องต้นในการเลือกความยาวคลื่นแสงสำหรับใช้ในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพาราด้วยวิธีทางแสงได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.3 นั่นคือความยาวแสงที่มีความเป็นไปได้สำหรับนำมาทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ควรมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราหนึ่งความยาวคลื่นแสง และอีกความยาวคลื่นแสงหนึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา เพื่อใช้เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง นอกจากนี้ความยาวคลื่นแสงทั้งสองช่วงยังต้องมีค่า extinction coefficient ที่ค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ 60% และ 20% เท่ากัน โดยดูได้จากกราฟการดูดกลืนของค่าความอิมิตัวออกซิเจนดังแสดงในบทที่ 2 รูป 2.2 เพื่อจะได้ลดการรบกวนจากค่าความอิมิตัวออกซิเจนภายในเลือดให้มีค่าน้อยสุด อันจะทำให้สมการที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

#### 5.4 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400 nm, 630 nm และ 645 nm

กราฟการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงทั้งสามค่า ที่เลือกมาจากการทดลองครั้งแรกแสดงในรูปที่ 5.4 เป็นข้อมูลค่าการส่งผ่านที่ค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราต่างกันสามค่าคือ 60 %, 40 % และ 20 % จากกราฟแกนตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านและแกนนอนเป็นความยาวคลื่นแสงสี่ค่าด้วยกัน ในการวาดกราฟครั้งนี้ทำการวาดกราฟโดยสนใจตรงจุดของความยาวคลื่นแสงสี่ค่าเท่านั้นคือ 400 nm, 630 nm และ 645 nm โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นแสงในช่วงอื่นดังนั้นกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.4 แกนนอนที่แสดงความยาวคลื่นแสง สิ่งที่ต้องการแสดงให้เห็นในกราฟนี้คือค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นแสง 400 nm จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่เปลี่ยนแปลงไป และที่ความยาวคลื่นแสง 630 nm และ 645 nm ค่าการส่งผ่านจะมีค่าใกล้เคียงกันไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา หรือเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราน้อยมากตรงกับ การทดลองในครั้งแรกเท่านั้น โดยสังเกตจากเส้นกราฟในรูปที่ 5.4 ความยาวคลื่นแสง 400 nm เส้นกราฟจะมีค่าต่างกันประมาณ 3 % ในขณะที่ความยาวคลื่นแสง 630 nm และ 645 nm เส้นกราฟจะมีค่าต่างกันประมาณ 0.1 % เท่านั้น



รูปที่ 5.4 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400, 630 และ 645 nm

### 5.5 การหาตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าสำหรับสมการทำนายความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยใช้ค่าการส่งผ่าน

ในการหาตัวแปรค่าคงที่  $K$  สำหรับใช้ในสมการการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง จะเริ่มต้นจากสมการที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 สมการที่ 2.40 เป็นสมการการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีการทางแสงสองความยาวคลื่นโดยใช้ค่าการส่งผ่านแสงผ่านน้ำยางพารา โดยนำสมการที่ 2.40 มาเขียนใหม่เพื่อหาตัวแปรค่าคงที่  $K$  ดังสมการที่ 5.1 ดังนี้

$$C_{para} = \frac{I_1 - I_2}{K} \quad (5.1)$$

$I_1$  เป็นค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นแสงแรก ในที่นี้ให้เป็นการส่งผ่านแสงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ในครั้งแรกจะให้ความยาวคลื่นแสง 630 nm เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงดังแสดงในหัวข้อ 5.5.1 ในส่วนของการใช้ความยาวคลื่นแสง 645 nm เป็นค่าความยาวคลื่นแสงอ้างอิงได้แสดงไว้ในหัวข้อ 5.5.2 ส่วน  $I_2$  เป็นค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นแสงที่สอง ในที่นี้ได้ทดสอบความแม่นยำและนำมาทดลองใช้ทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราทั้งสองความยาวคลื่นแสง ตามที่ได้เก็บข้อมูลไว้ในการทดลองครั้งที่สองคือ 400 nm และ  $C_{para}$  คือค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ในที่นี้เป็นค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากวิธีการนำตัวอย่างน้ำยางพาราไปอบแห้ง

และ  $K$  เป็นตัวแปรค่าคงที่ที่ต้องการหา ดังนั้นสมการที่ 5.1 จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 5.2 และสมการที่ 5.3 ดังนี้

$$C_{para} = \frac{I_{630nm} - I_{400nm}}{K} \quad (5.2)$$

$$C_{para} = \frac{I_{645nm} - I_{400nm}}{K} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ 5.2 และ 5.3 มีตัวแปร  $K$  เท่านั้นที่ยังไม่ทราบค่า นอกนั้นได้จากการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่สองจึงทำการย้ายข้างเพื่อหาค่า  $K$  สมการ 5.2 และสมการ 5.3 จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 5.4 และ 5.5

$$K_{630/400} = \frac{I_{630nm} - I_{400nm}}{C_{para}} \quad (5.4)$$

$$K_{645/400} = \frac{I_{645nm} - I_{400nm}}{C_{para}} \quad (5.5)$$

เมื่อทำการประมาณค่าโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่สองทั้งหมดจำนวน 5 ค่า ตัวแปรค่าคงที่  $K$  ที่ต้องการหา เมื่อทำการประมาณค่าจากกราฟในรูปที่ 5.5 และ 5.6 แล้วจะเห็นว่าลักษณะของกราฟที่ความยาวคลื่นแสงทั้งสอง เกือบจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้สมการเส้นตรง (Linear Equation) ในการทำนายค่าความเข้มข้นของน้ำยางพารา เมื่อใช้สมการเส้นตรงในการทำนายค่า การประมาณค่าโดยใช้สมการเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่  $K$  ของทั้งสองสมการจึงสามารถแทนค่าเท่ากับ 1 ลงไปได้โดยตรง

$$K_{630nm/400nm} = 1.0$$

$$K_{645nm/400nm} = 1.0$$

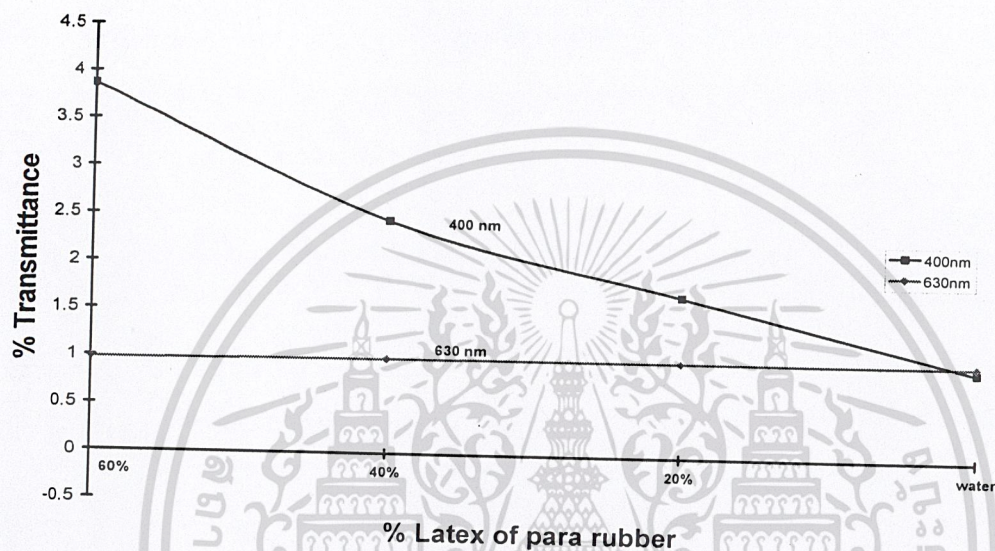
จากนั้นจะทำการแทนค่า  $K$  ที่ได้ลงไปในสมการที่ 5.2 และสมการที่ 5.3 ก็จะได้สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสงผ่านน้ำยางพารา เป็นการใช้ค่าการส่งผ่านแสงมาทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราดังสมการที่ 5.6 และ 5.7 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{para} = \frac{I_{875nm} - I_{525nm}}{1.0} \quad (5.6)$$

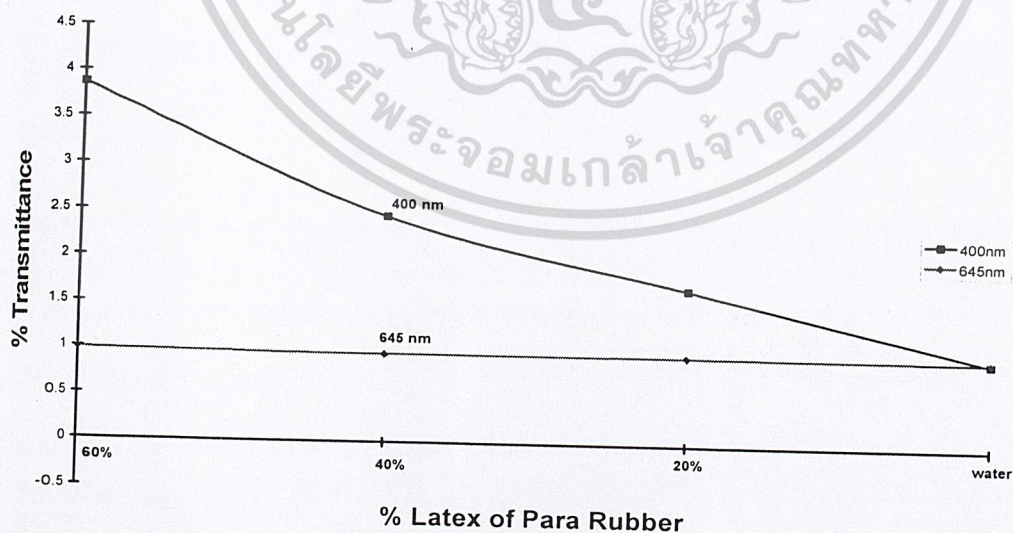
$$C_{para} = \frac{I_{875nm} - I_{525nm}}{1.0} \quad (5.7)$$

Transmittance at 400nm,630nm



รูปที่ 5.5 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400 และ 630 nm

Transmittance at 400nm,645nm



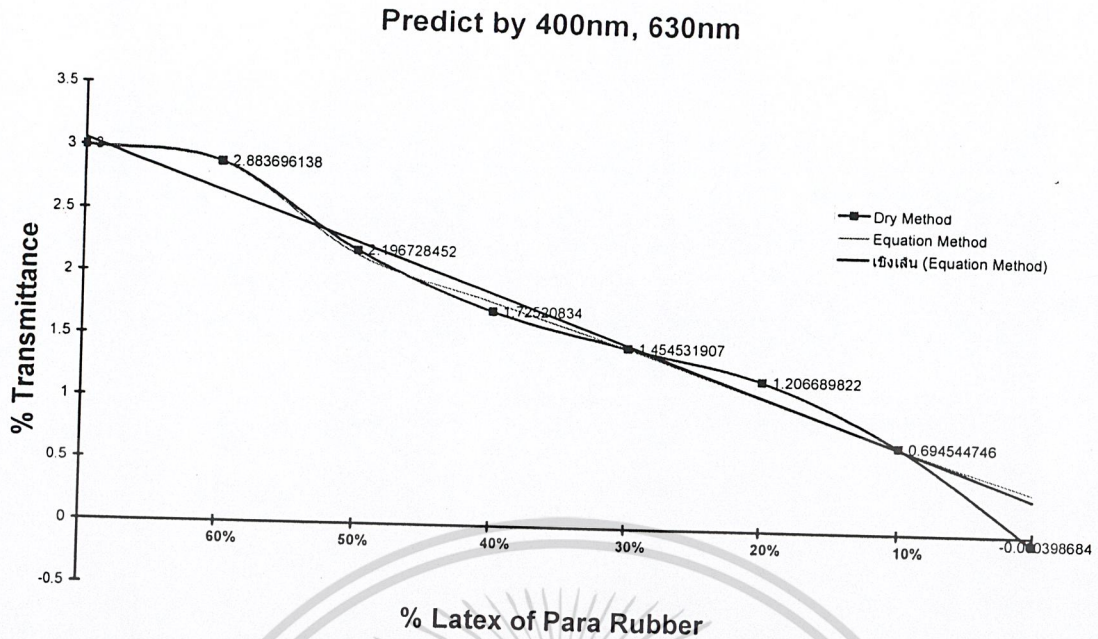
รูปที่ 5.6 การส่งผ่านของความยาวคลื่นแสง 400 และ 645 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.1 ความแม่นยำของสมการเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสง 630 nm เป็นค่าอ้างอิง การใช้สมการที่ 5.6 และ 5.7 มาทำนายค่าความเข้มข้นของน้ำยางพารา นั้นจากกราฟจะเห็นว่ามีความจำเป็นต้องสร้างตาราง เพื่อเก็บความแตกต่างของค่าการส่งผ่านแสงระหว่างความยาวคลื่นที่ 1 และ 2 ก่อน เพื่อใช้เป็นตารางฐานข้อมูลอ้างอิงเก็บไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประมวลผล ข้อมูลที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านของความยาวคลื่นแสงเมื่อใช้ความยาวคลื่น 630 nm เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงแสดงดังในตารางที่ 5.3 เมื่อนำมาทดลองทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา โดยใช้ข้อมูลค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากการนำตัวอย่างน้ำยางพาราไปทำให้แห้งจำนวน 5 ค่า สมการที่ได้นี้สามารถทำนายได้ โดยมีความแม่นยำสามารถทำนายได้ถูกต้องเมื่อคิดที่เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด ในช่วงที่ยอมให้ทำนายผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 % ตลอดช่วงของความเข้มข้นน้ำยางในช่วง 60% ถึง 10% (ขั้นตอนในการทำให้ได้น้ำยางพาราที่ความเข้มข้นค่าต่างๆทำโดยวิธีการนำน้ำยางเข้มข้น 60% มาเติมน้ำลงไปให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ)

ตารางที่ 5.3 ค่าตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm

ลำดับที่	ความเข้มข้นน้ำยาง	$I_{400nm} - I_{630nm}$
1	60%	2.88
2	50%	2.16
3	40%	1.45
4	30%	1.07
5	20%	0.69
6	10%	0.34



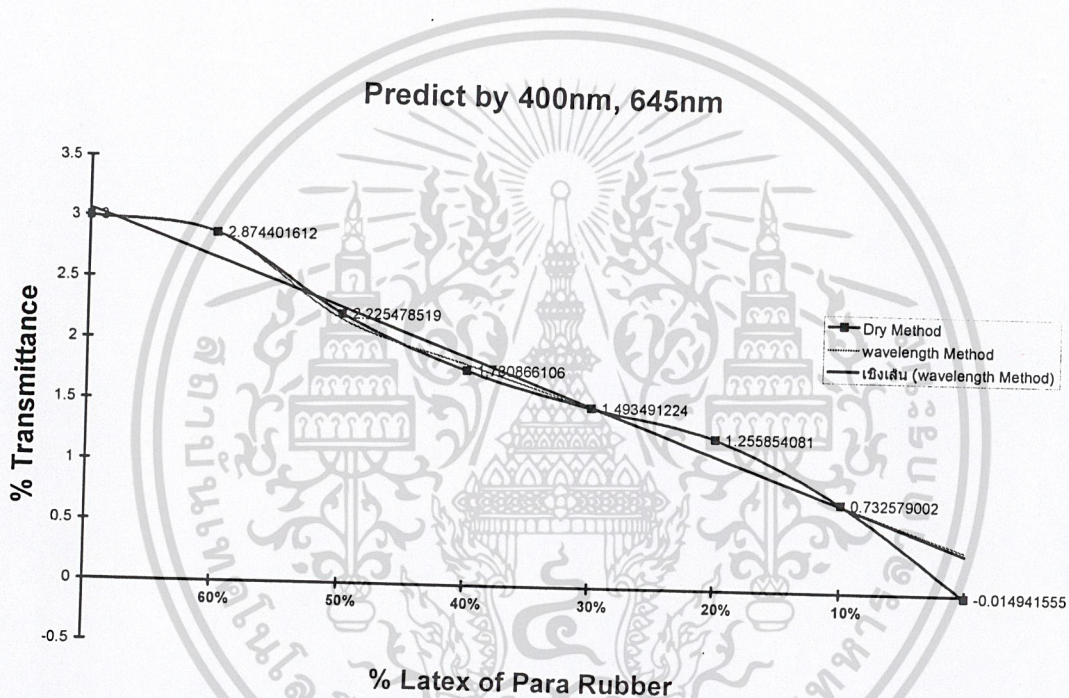
รูปที่ 5.7 การทำนายเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm

### 5.5.2 ความแม่นยำของสมการเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นแสง 645 nm เป็นค่าอ้างอิง

สมการที่ใช้ในการทำนายหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพารา ยังคงมีรูปแบบเหมือนกับสมการที่ 5.6 และสมการที่ 5.7 แต่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแสงอ้างอิงเป็น 645 nm เมื่อเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแสงและตัวแปรค่าคงที่  $K$  ยังคงเป็นค่าเดิมทำให้รูปแบบของสมการไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีการเปลี่ยนค่าที่ใช้เป็นฐานข้อมูล สำหรับการทำนายค่าความเข้มข้นของน้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตารางที่ 5.4 แสดงค่าตัวแปรเมื่อใช้ความยาวคลื่นแสง 645 nm เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิง ในการทำนายโดยใช้ความยาวคลื่นแสง 645 nm เป็นค่าความยาวคลื่นแสงอ้างอิงนี้ สามารถทำนายค่าความเข้มข้นของน้ำยางพาราเมื่อนำตัวอย่างน้ำยางพาราไปเข้ากระบวนการทำให้เป็นยางแห้งได้โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% เหมือนกับการใช้ความยาวคลื่นแสง 630 nm เป็นความยาวคลื่นแสงอ้างอิงด้วยเช่นกัน รูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราโดยวิธีการทำให้เป็นยางแห้ง และวิธีการทำนายโดยสมการทางแสงที่ใช้ความยาวคลื่นแสงสองค่าที่สร้างขึ้นมา

ตารางที่ 5.4 ค่าตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 645 nm

ลำดับที่	ความเข้มข้นน้ำยาง	$I_{400nm} - I_{645nm}$
1	60%	2.87
2	50%	2.18
3	40%	1.49
4	30%	1.11
5	20%	0.73
6	10%	0.36



รูปที่ 5.8 การทำนายเมื่อใช้ค่าการส่งผ่านจากความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 645 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# การวิเคราะห์ผลการทดลองและค่าความผิดพลาด

ในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ค่าความผิดพลาดในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราในช่วงที่ยอมรับได้ และความยาวคลื่นแสงที่มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพารามากที่สุดจากความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ทำการทดลอง

### 6.1 ความแม่นยำของสมการ

#### 6.1.1 สถิติของความแม่นยำ ค่าเบี่ยงเบน ความเที่ยงตรง และระดับความเชื่อมั่น

ความแม่นยำ (accuracy) จะเป็นการตรวจวัดหาค่าความผิดพลาด (error) หรือว่าค่าความแปรปรวนของระบบ ถ้าความผิดพลาดมีค่ามากความแม่นยำก็จะต่ำ ค่าความแม่นยำของการวัดจะเป็นการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่วัดได้ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร โดยค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด (mean error) จะเป็นตัวบ่งบอกความแม่นยำของการวัดนั้น ในการทดลองครั้งนี้ค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราที่ใช้สำหรับอ้างอิงจะได้จากวิธีการอบเป็นยางแห้ง ดังนั้นค่าเบี่ยงเบน (bias) ก็คือค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นน้ำยาพารา ที่ได้จากวิธีการอบเป็นยางแห้ง และที่ทำนายด้วยวิธีทางแสง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{x} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $x_i$  สามารถคำนวณได้จากการนำค่าที่วัดได้จากวิธีการทำยางแห้งครั้งที่  $i$  ลบด้วยค่าที่อ่านได้จากการทำนายด้วยวิธีทางแสงตามลำดับ โดยจะมีหน่วยในการวัดเป็นเปอร์เซ็นต์  $N$  เป็นจำนวนครั้งของการวัดทั้งหมด

ค่าความเที่ยงตรง (Precision) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (random error) การกระจายของจุดรอบๆค่ากลาง (mean) จะเป็นตัวกำหนดค่าความเที่ยงตรงของการวัด ค่าความเที่ยงตรงในทางสถิติจะเรียกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) ค่าความแตกต่างระหว่างการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราโดยใช้สมการทางแสง และค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราที่อ่านได้จากวิธีการทำยางแห้งสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (6.2) ดังนี้

$$precision = SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (6.2)$$

ในงานวิจัยส่วนใหญ่ มักจะใช้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (95 % confidence limit) โดยจากการกระจายแบบปกติ (normal distribution) จะมีค่าเท่ากับ 1.96 เท่าของค่า SD

$$95 \% \text{ confidence limit} = 1.96 \times SD \approx 2 \times SD \quad (6.3)$$

จากสมการสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาด้วยวิธีทางแสงที่กล่าวถึงในบทที่ 5 คือสมการที่ (5.6) และสมการที่ (5.7) นำมาเขียนใหม่เป็นสมการที่ (6.4) และ สมการที่ (6.5) ดังนี้

$$C_{para} = \frac{I_{875nm} - I_{525nm}}{1.0} \quad (6.4)$$

$$C_{para} = \frac{I_{875nm} - I_{525nm}}{1.0} \quad (6.5)$$

โดยจะทำการทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของแต่ละสมการ เปรียบเทียบกันเพื่อพิจารณาหาคู่ของความยาวคลื่นแสงที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เพียงสองความยาวคลื่นแสงสำหรับใช้ในสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาด้วยวิธีทางแสงต่อไป

### 6.1.2 ความแม่นยำในการทำนายของสมการเมื่อจำนวนข้อมูลมี 20 ค่า

ในการเปรียบเทียบความแม่นยำและความเที่ยงตรงในการทดลองครั้งนี้ ได้พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (95 % confidence limit) และข้อมูลทางสถิติในส่วนของความแม่นยำและความเที่ยงตรงของสมการทั้งสองได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบสมการทั้งสองจะได้กล่าวถึงความหมายของตัวเลขทางสถิติภายในตารางก่อนดังนี้ ตัวอย่างเช่นเมื่อพิจารณาที่คู่ของความยาวคลื่นแสง 400 / 630 nm จะได้ว่าคู่ความยาวคลื่นแสงนี้มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.243 % หมายความว่า การทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาโดยใช้สมการทางแสง จะประมาณค่าออกมา มากกว่าค่าจริง (overestimate) คือจากวิธีการรอบเป็นยางแห้งในทางบวก (positive bias) และที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 5.1 % หมายความว่า การทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยารักษาด้วยวิธีทางแสงจะให้ค่าออกมาอยู่ในช่วงระหว่าง 0.243 - 5.1 % และ 0.243 + 5.1 % หรืออยู่ในช่วง

ระหว่าง -4.857 % และ 5.343 % จากค่าจริง (ค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราที่ได้จากวิธีการอบเป็นยางแห้ง) โดยมีความน่าจะเป็น (probability) คือ 0.95

การใช้ค่าความเบี่ยงเบน และค่าความเที่ยงตรงจะช่วยให้เห็นถึงความสามารถของแต่ละสมการได้ดีและง่ายขึ้น รวมทั้งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการอื่นจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจน โดยภาพรวมของสมการทั้งสองจะเห็นว่าความเบี่ยงเบนจะมีค่าน้อยนั่นคือความแม่นยำสูง แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าที่ทำนายออกมาได้มีช่วงค่อนข้างกว้างนั่นคือมีความเที่ยงตรงค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของสมการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราด้วย วิธีทางแสงเมื่อจำนวนข้อมูลมี 20 ค่า

ข้อมูลทางสถิติ	400 / 630 nm	400 / 645 nm
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (%)	0.243	0.279
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)	4.82%	4.84%
ระดับความเชื่อมั่น 95 %	5.1	5.2
ช่วงค่าที่จะทำนายออกมา (%)	-5.26 – 6.37	-4.921 – 5.479

### 6.1.3 การเปรียบเทียบสมการโดยใช้สถิติ T-TEST

การใช้สถิติ T-TEST (student T distribution) เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกระจายของข้อมูลสองกลุ่ม คือข้อมูลที่ได้จากสมการการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยาพาราด้วยวิธีทางแสง ว่ามีโอกาสในการกระจายของข้อมูลเหมือนกับค่าความเข้มข้นน้ำยาพารา ที่ได้จากการอบเป็นยางแห้งอย่างไร โดย  $t$  จะมีค่าดังสมการที่ (6.8)

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s\sqrt{n}} \quad (6.8)$$

เมื่อ  $t$  คือเปอร์เซ็นต์โอกาสในการกระจายของข้อมูลที่จะเหมือนกันกับข้อมูลมาตรฐาน  $n$  เป็นจำนวนตัวอย่างของข้อมูล  $s$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยของประชากรมาตรฐาน ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้สูตร TTEST ที่มีอยู่ในโปรแกรม Microsoft Excel คำนวณหาค่า  $t$  โดยค่าที่ได้เมื่อจำนวนข้อมูลมี 20 ครั้งแสดงดังตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบค่า  $t$  จากคู่ความยาวคลื่นแสงทั้งสอง

ข้อมูลทางสถิติ	400 / 630	400 / 645
ค่า $t$ (%)	0.63	0.58

จากตัวเลขค่า  $t$  ในตารางที่ 6.2 มีความหมายว่า การทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราจากคู่ความยาวคลื่นแสง 400 / 630 nm มีโอกาสที่การกระจายของข้อมูลจะเหมือนกับค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่ได้จากการอบเป็นยางแห้ง ประมาณ 63 % คู่ความยาวคลื่นแสง 400 / 645 nm มีโอกาส 58 % ตามลำดับ

## 6.2 ความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราจากช่วงที่ทำการทดลอง

จากตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 เมื่อเปรียบเทียบหาความยาวคลื่นแสงที่มีความเหมาะสมมากที่สุด จากวิธีการทางสถิติจะพบว่าความยาวคลื่นแสงสองความยาวคลื่นในการทดลองครั้งนี้ที่เลือกมาทำการทดลองจำนวนสามค่าด้วยกันคือ 400 nm, 630nm และ 645 nm คู่ความยาวคลื่นแสงสำหรับนำมาใช้ในสมการหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง โดยใช้ค่าการส่งผ่านแสงผ่านน้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในถ้วยแก้วก็คือคู่ของความยาวคลื่นแสง 400 nm และ 630 nm นั่นเอง

## 6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองครั้งนี้ จะเน้นไปที่ความสามารถในการทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราของสมการได้อย่างถูกต้อง โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะดูที่ค่าความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณทางสถิติ ในส่วนค่าความผิดพลาดในช่วงที่ยอมให้เกิดขึ้นได้จากการพิจารณาด้วยวิธีสังเกตค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราของคนปกติในวัยต่างๆ และถ้าใช้ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ คืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5 % โดยที่ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ 5 % สมการสามารถทำนายได้ถูกต้องประมาณ 18 ครั้งจากข้อมูล 20 ครั้ง (90 % จากข้อมูล 20 ครั้ง) หรือสามารถดูจากข้อมูลทางสถิติ (ตารางที่ 6.1 และ 6.2) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (2 SD) สมการจะทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราออกมาอยู่ในช่วงประมาณ -5 – +5 % โดยมีความน่าจะเป็นคือ 0.95 ในส่วนของค่าความแม่นยำเมื่อดูจากความผิดพลาดเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบน (bias) ที่มีค่าประมาณ 0.2 % แสดงว่าสมการมีความแม่นยำค่อนข้างมาก และมีความเที่ยงตรงค่อนข้างสูงเมื่อดูจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่มีค่าประมาณ 5 % โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น อาจมาจากการที่สมการละเอียดบางอย่างไปดังที่ได้กล่าวไว้แล้วเช่น การละทิ้งส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำยางพาราที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช่ยาง ที่ในการทดลองนี้ไม่ได้นำมาพิจารณาร่วมด้วย โดยใช้วิธีการวัดหาค่าการส่งผ่านความเข้มแสงในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้อาจมีค่าความยาวคลื่นแสงที่กำเนิดออกมาคลาดเคลื่อน ไม่ตรงตามที่ระบุไว้ใน specifications เนื่องจากเป็นไดโอดสำหรับใช้งานทั่วไป (general purpose) ไม่ใช่ระดับคุณภาพสูง (medical grade หรือ military grade) เนื่องจากมีราคาแพงและหาได้ยาก มีการประมาณว่าการตอบสนองต่อค่าการส่งผ่านจากองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำยางพารา จากความยาวคลื่นแสงทั้งสองมีค่าเท่ากันและให้เป็นค่าคงที่ กรณีของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงก็อาจทำให้การทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพารามีความผิดพลาดสูงขึ้น และในการหาค่าการส่งผ่านที่หัวตรวจมี LED ประกอบอยู่ภายในจำนวนมากอาจมีแสงเล็ดลอดไปถึงตัวรับแสงได้โดยไม่ผ่านบริเวณที่เป็นน้ำยางพารารวมทั้งระยะห่างระหว่าง LED และ โฟโตไดโอดที่มีค่ามากประมาณ 1 cm อันอาจทำให้ค่าคงที่ K มีค่าไม่เท่ากับ 1 ดังที่ได้มีการประมาณค่าไว้ก็อาจทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการทำนายได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองหาค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราด้วยวิธีทางแสง ผ่านด้วยแก้วที่บรรจุน้ำยางพารา (transmittance) ด้วยสมการแบบเชิงเส้นจากแสงสองความยาวคลื่น และทั้งสองความยาวคลื่นแสงมีค่าการดูดกลืน (extinction coefficient) ของความเข้มข้นน้ำยางที่ 60 % และ 20 % เท่ากัน ได้เลือกความยาวคลื่นแสงสามค่า (400, 630 และ 645 nm) จากช่วงความยาวคลื่นแสงที่ทำการทดลองคือ 370 – 950 nm เป็นความยาวคลื่นแสงที่มีการตอบสนองต่อค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราต่างกันจากสองช่วงความยาวคลื่นแสง คือความยาวคลื่นแสงช่วงแรกมีการส่งผ่านเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่เปลี่ยนค่าไปมาก (370 – 426 nm) ความยาวคลื่นแสงช่วงที่สองการส่งผ่านไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราที่เปลี่ยนค่าไป หรือเปลี่ยนแปลงแต่น้อย (625 – 645 nm) สมการจากคู่ความยาวคลื่นแสงทั้งสาม (400 / 630 nm, 400 / 645 nm) สามารถทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราได้โดยไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ทั้งทางด้านความแม่นยำและความเที่ยงตรง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 0.2 % และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (2 SD) ประมาณ 5 % สมการทั้งสองสามารถทำนายค่าความเข้มข้นน้ำยางพาราได้ถูกต้องอยู่ในช่วงประมาณ -5 - +5 % ได้ 18 ครั้งจากข้อมูล 20 ครั้ง (90 % จาก 20 ครั้ง) ในการทดลองครั้งนี้ ความยาวคลื่นแสงที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่าความเที่ยงตรงที่มีค่ามากที่สุดจากตารางที่ 6.1 และ 6.2 คือคู่ความยาวคลื่นแสง 400 / 630 nm

ในส่วนของข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป จะพิจารณาจากตัวแปรที่สมการแบบเชิงเส้น (linear equation) ได้ละทิ้งไปเช่น คัดค่าการส่งผ่านเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยไม่คิดส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำยางพาราแต่ไม่ใช่ยาง การประมาณว่าค่าการส่งผ่านจากองค์ประกอบของแก้วที่บรรจุน้ำยางพาราเช่น การสะท้อน ของทั้งสองความยาวคลื่นแสงมีค่าการส่งผ่านเป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากัน ความยาวคลื่นแสงจาก LED ยังไม่สามารถหาที่กำเนิดความยาวคลื่นแสงตรงจุดที่มีค่า extinction coefficient ของความเข้มข้นน้ำยางพาราเท่ากันและมีขายโดยทั่วไปได้ ใช้ความยาวคลื่นแสงเพียงสองความยาวคลื่น หัวตรวจสำหรับตรวจวัดค่าการส่งผ่านที่มี LED ประกอบอยู่ภายในถึง 25 ดวงในการทดลองครั้งแรกซึ่งมีขนาดโตกว่าขนาดของตัวรับแสงมากอาจทำให้ขั้นตอนการเลือกความยาวคลื่นแสง สำหรับใช้ในสมการมีความคลาดเคลื่อนได้ซึ่งจะได้พิจารณาใช้สายไฟเบอร์ ออปติก (Fiber Optic) ที่มีขนาดเล็กกว่า LED มาก เป็นอุปกรณ์นำแสงในหัวตรวจต่อไป ซึ่งจะทำให้ระยะห่างและมุมในการส่งแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่อุปกรณ์รับแสงมีขนาดน้อยลงทำให้แสงส่วนใหญ่ผ่านน้ำยางและไปสู่ตัวโฟโตไดโอดได้ตรงบริเวณที่รับแสงมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่, “พืชเศรษฐกิจ”, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ, 2542, หน้า 416 - 445.
- [2] ศักดิ์ชัย เหลืองสถิตกุล, “อุตสาหกรรมยางพาราของไทย”, วารสารส่งเสริมการลงทุน 14, 4 (เม.ย. 46) หน้า 47 – 54.
- [3] วีรพล วงษ์ประเสริฐ, “อุตสาหกรรมยาง”, วารสารส่งเสริมการลงทุน 6, 2 (ก.พ. 38) หน้า 46-48.
- [4] กนกวรรณ สุถิ่นานถ, “หนึ่งศตวรรษยางพาราไทย”, วารสารส่งเสริมการลงทุน 10, 10 (ต.ค. 42) หน้า 28-33.
- [5] วรากรณ์ ขจรไชยกุล, “น้ำยางธรรมชาติ”, สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2530.
- [6] Yitzhak Mendelson “Pulse oximeter and method of operation” US. Patent No.2002/0042558, Apr.11, 2002.
- [7] Eric Kinast “Pulse Oximeter” US. Patent No.5995858, Nov.30, 1999.
- [8] Teiji Ukawa, Kazumasa Ito, Tadashi Nakayama “Pulse Oximeter” US. Patent No. 5355882, Oct.18, 1994.
- [9] Wylie I. Lee, Jason E. Alderete, William V. Fower “Optical Measurement of blood Hematocrit incorporating a self calibration Algorithm” US. Patent No. 6064474 May. 16, 2000.
- [10] David L. Maynard “Apparatus for Monitoring Hematocrit Levels of blood” US. Patent No. 5385539, Jan.31 1995.
- [11] Luis Oppenheimer “Spectrophotometric Blood Analysis” US. Patent No.5331958, Jul.26, 1994.
- [12] Kouhei Kabuki, Yoshisada Ebata, Tadashi Suzuki, Atsushi Hiyama “Spectrophotometer” US.Patent No. 2002/ 0050560, May. 2, 2002.
- [13] Brian A. Keller “Shedding Light on the Subject” Mathematics Teacher 91, Department of mathematics Iowa state University, December, 1998, pp: 756-771.
- [14] Patrick O’ Neil, Esther Vital, Noemi Betancourt- Loria, Dinah Montes “Performance Evaluation of the Complete Blood Count and White Blood cell Differential Parameters on the Act 5diff Hematology Analyzer” Beckman Coulter Inc. Laboratory, Carden Jennings Publishing Co.Ltd. 2001, pp: 116-124.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

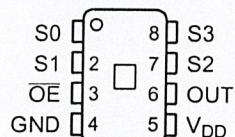


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- High-Resolution Conversion of Light Intensity to Frequency With No External Components
- Programmable Sensitivity and Full-Scale Output Frequency
- Communicates Directly With a Microcontroller
- Single-Supply Operation Down to 2.7 V, With Power-Down Feature
- Absolute Output Frequency Tolerance of  $\pm 5\%$  (TSL230BR)
- Nonlinearity Error Typically 0.2% at 100 kHz
- Stable 150 ppm/°C Temperature Coefficient
- Replacements for TSL230, TSL230A, and TSL230B

PACKAGE P  
8-LEAD PDIP  
(TOP VIEW)

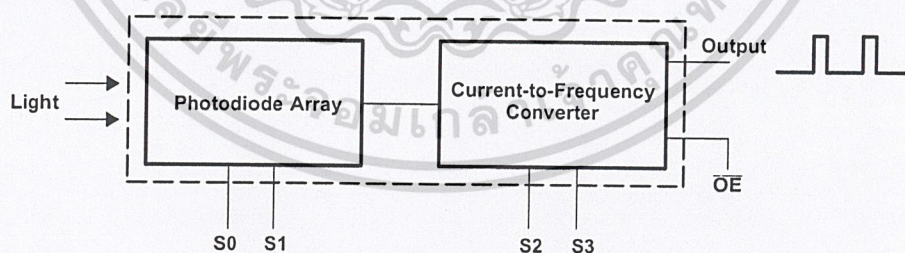


## Description

The TSL230R, TSL230AR, and TSL230BR programmable light-to-frequency converters combine a configurable silicon photodiode and a current-to-frequency converter on single monolithic CMOS integrated circuits. The output can be either a pulse train or a square wave (50% duty cycle) with frequency directly proportional to light intensity. Device sensitivity is selectable in three ranges, providing two decades of adjustment. The full-scale output frequency can be scaled by one of four preset values. All inputs and the output are TTL compatible, allowing direct two-way communication with a microcontroller for programming and output interface. An output enable (OE) is provided that places the output in the high-impedance state for multiple-unit sharing of a microcontroller input line.

The devices are available with absolute-output-frequency tolerances of  $\pm 5\%$  (TSL230BR),  $\pm 10\%$  (TSL230AR), or  $\pm 20\%$  (TSL230R). They have been temperature compensated for the ultraviolet-to-visible light range of 320 nm to 700 nm and respond over the light range of 320 nm to 1050 nm. The devices are characterized over the temperature range of  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ .

## Functional Block Diagram



# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 - OCTOBER 2002

## Terminal Functions

TERMINAL NAME	NO.	TYPE	DESCRIPTION
GND	4		Ground
$\overline{OE}$	3	I	Enable for $f_O$ (active low)
OUT	6	O	Scaled-frequency ( $f_O$ ) output
S0, S1	1, 2	I	Sensitivity-select inputs
S2, S3	7, 8	I	$f_O$ scaling-select inputs
$V_{DD}$	5		Supply voltage

## Selectable Options

S1	S0	SENSITIVITY
L	L	Power down
L	H	1X
H	L	10X
H	H	100X

S3	S2	$f_O$ SCALING (divide-by)
L	L	1
L	H	2
H	L	10
H	H	100

## Available Options

DEVICE	$T_A$	PACKAGE - LEADS	PACKAGE DESIGNATOR	ORDERING NUMBER
TSL230R	-25°C to 85°	PDIP-8	P	TSL230RP
TSL230AR	-25°C to 85°	PDIP-8	P	TSL230ARP
TSL230BR	-25°C to 85°	PDIP-8	P	TSL230BRP

## Absolute Maximum Ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage, $V_{DD}$ (see Note 1)	6 V
Input voltage range, all inputs, $V_I$	-0.3 V to $V_{DD} + 0.3$ V
Operating free-air temperature range, $T_A$	-25°C to 70°C
Storage temperature range	-25°C to 85°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTE 1: All voltage values are with respect to GND.

## Recommended Operating Conditions

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage, $V_{DD}$	2.7	5	5.5	V
High-level input voltage, $V_{IH}$	$V_{DD} = 4.5$ V to 5.5 V			V
Low-level input voltage, $V_{IL}$	$V_{DD} = 4.5$ V to 5.5 V			V
Operating free-air temperature range, $T_A$	-25		70	°C

Copyright © 2002, TAOS Inc.



**TAOS**

www.taosinc.com

TEXAS  
ADVANCED  
OPTOELECTRONIC  
SOLUTIONS™

The LUMENOLOGY® Company

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 – OCTOBER 2002

## Electrical Characteristics at $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_{DD} = 5\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{OH}$	High-level output voltage	$I_{OH} = -4\text{ mA}$	4	4.5		V
$V_{OL}$	Low-level output voltage	$I_{OL} = 4\text{ mA}$		0.25	0.4	V
$I_{IH}$	High-level input current				5	$\mu\text{A}$
$I_{IL}$	Low-level input current				5	$\mu\text{A}$
$I_{DD}$	Supply current	Power-on mode		2	3	mA
		Power-down mode		5	12	$\mu\text{A}$
F.S.	Full-scale frequency†		1.1			MHz
	Temperature coefficient of output frequency	$\lambda \leq 700\text{ nm}$		$\pm 150$		ppm/ $^\circ\text{C}$
$k_{SVS}$	Supply voltage sensitivity	$V_{DD} = 5\text{ V} \pm 10\%$		$\pm 0.5$		%/V

† Full-scale frequency is the maximum operating frequency of the device without saturation.

## Operating Characteristics at $V_{DD} = 5\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $E_e = 130\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda_p = 640\text{ nm}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TSL230R			TSL230AR			TSL230BR			UNIT	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
$f_O$	Output frequency	$S0 = S1 = H,$ $S2 = S3 = L$	80	100	120	90	100	110	95	100	105	kHz
		$S1 = H,$ $S0 = S2 = S3 = L$	8	10	12	9	10	11	9.5	10	10.5	kHz
		$S0 = H,$ $S1 = S2 = S3 = L$	0.8	1	1.2	0.9	1	1.1	0.95	1	1.05	kHz
		$S0 = S1 = S2 = H,$ $S3 = L$	40	50	60	45	50	55	47.5	50	52.5	kHz
		$S0 = S1 = S3 = H,$ $S2 = L$	8	10	12	9	10	11	9.5	10	10.5	kHz
		$S0 = S1 = S2 = S3 = H$	0.8	1	1.2	0.9	1	1.1	0.95	1	1.05	kHz
		$E_e = 0,$ $S0 = S1 = H,$ $S2 = S3 = L$		0.4	10		0.4	10		0.4	10	
$R_e$	Responsivity	$S0 = S1 = H,$ $S2 = S3 = L$		0.77			0.77		0.77		kHz/ ( $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ )	
$t_w$	Output pulse duration	$S2 = S3 = L$	125		600	125		600	125		600	ns
		$S2$ or $S3 = H$		$1/2f_O$			$1/2f_O$			$1/2f_O$		s
Nonlinearity‡#		$f_O = 0\text{ MHz to }10\text{ kHz}$	$\pm 0.1\%$			$\pm 0.1\%$			$\pm 0.1\%$			%F.S.
		$f_O = 0\text{ MHz to }100\text{ kHz}$	$\pm 0.2\%$			$\pm 0.2\%$			$\pm 0.2\%$			%F.S.
		$f_O = 0\text{ MHz to }1\text{ MHz}$	$\pm 0.5\%$			$\pm 0.5\%$			$\pm 0.5\%$			%F.S.
Recovery from power down				100			100			100	$\mu\text{s}$	
Step response to full-scale step input		1 pulse of new frequency plus $1\text{ }\mu\text{s}$										
Response time to programming change		2 periods of new principal frequency plus $1\text{ }\mu\text{s}^{\S}$										
Response time to output enable ( $\overline{OE}$ )			50	150		50	150		50	150	ns	

‡ Nonlinearity is defined as the deviation of  $f_O$  from a straight line between zero and full scale, expressed as a percent of full scale.

# Nonlinearity test condition:  $S0 = S1 = H, S2 = S3 = L$ .

§ Principal frequency is the internal oscillator frequency, equivalent to divide-by-1 output selection.

The LUMENOLOGY® Company



**TAOS**

TEXAS  
ADVANCED  
OPTOELECTRONIC  
SOLUTIONS™

www.taosinc.com

Copyright © 2002, TAOS Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 - OCTOBER 2002

## TYPICAL CHARACTERISTICS

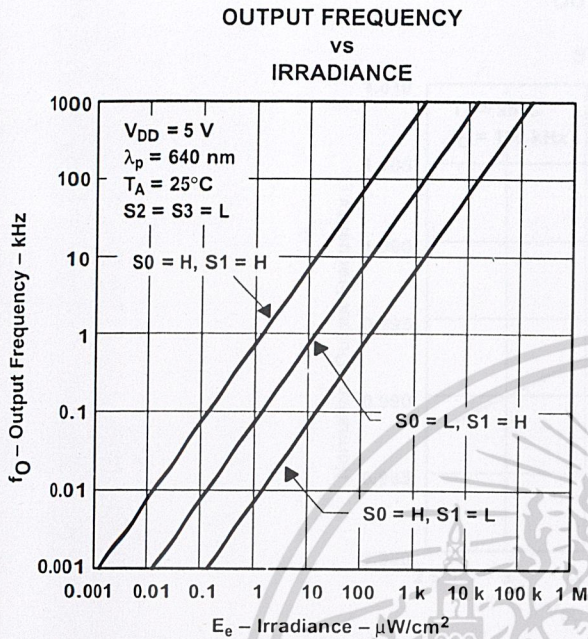


Figure 1

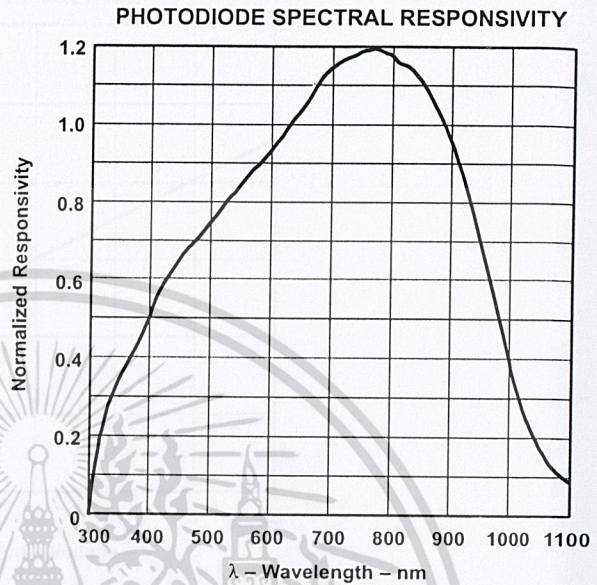


Figure 2

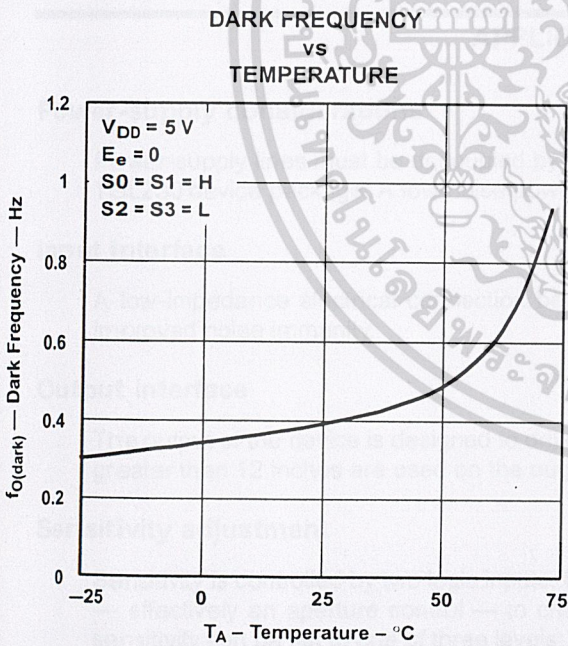


Figure 3

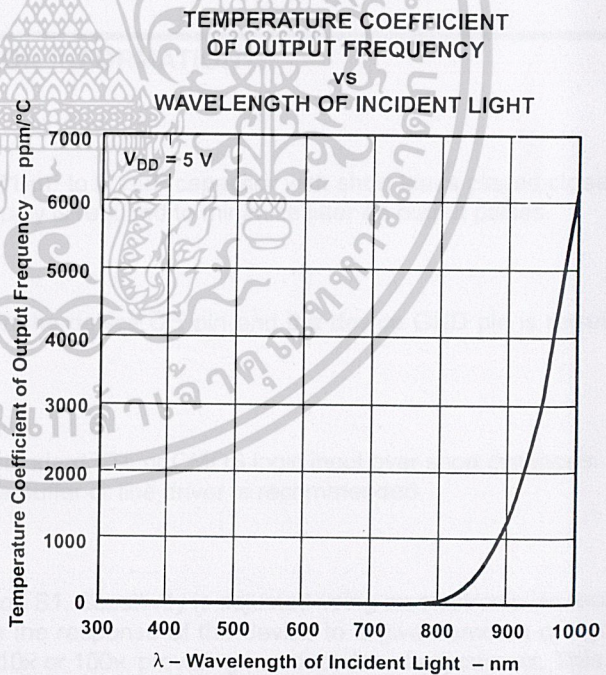


Figure 4



# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 – OCTOBER 2002

## TYPICAL CHARACTERISTICS

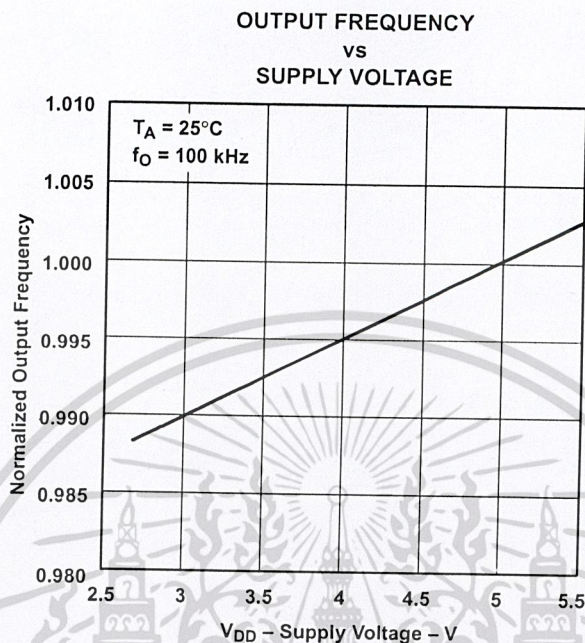


Figure 5

## APPLICATION INFORMATION

### Power-supply considerations

Power-supply lines must be decoupled by a 0.01- $\mu\text{F}$  to 0.1- $\mu\text{F}$  capacitor with short leads placed close to the TSL230 device package. A low-noise power supply is required to minimize jitter on output pulses.

### Input interface

A low-impedance electrical connection between the device  $\overline{\text{OE}}$  pin and the device GND pin is required for improved noise immunity.

### Output interface

The output of the device is designed to drive a standard TTL or CMOS logic input over short distances. If lines greater than 12 inches are used on the output, a buffer or line driver is recommended.

### Sensitivity adjustment

Sensitivity is controlled by two logic inputs, S0 and S1. Sensitivity is adjusted using an electronic iris technique — effectively an aperture control — to change the response of the device to a given amount of light. The sensitivity can be set to one of three levels: 1 $\times$ , 10 $\times$  or 100 $\times$ , providing two decades of adjustment. This allows the responsivity of the device to be optimized to a given light level while preserving the full-scale output-frequency range. Changing of sensitivity also changes the effective photodiode area by the same factor.

The LUMENOLOGY® Company



**TAOS**

TEXAS  
ADVANCED  
OPTOELECTRONIC  
SOLUTIONS™

Copyright © 2002, TAOS Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ [www.taosinc.com](http://www.taosinc.com) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 5

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 - OCTOBER 2002

## APPLICATION INFORMATION

### Output-frequency scaling

Output-frequency scaling is controlled by two logic inputs, S2 and S3. Scaling is accomplished on chip by internally connecting the pulse-train output of the converter to a series of frequency dividers. Divided outputs available are divide-by 2, 10, 100, and 1 (no division). Divided outputs are 50 percent-duty-cycle square waves while the direct output (divide-by 1) is a fixed-pulse-width pulse train. Because division of the output frequency is accomplished by counting pulses of the principal (divide-by 1) frequency, the final-output period represents an average of  $n$  (where  $n$  is 2, 10, or 100) periods of the principal frequency. The output-scaling-counter registers are cleared upon the next pulse of the principal frequency after any transition of the S0, S1, S2, S3, or OE lines. The output goes high upon the next subsequent pulse of the principal frequency, beginning a new valid period. This minimizes the time delay between a change on the input lines and the resulting new output period in the divided output modes. In contrast with the sensitivity adjust, use of the divided outputs lowers both the full-scale frequency and the dark frequency by the selected scale factor.

The frequency-scaling function allows the output range to be optimized for a variety of measurement techniques. The divide-by-1 or straight-through output can be used with a frequency counter, pulse accumulator, or high-speed timer (period measurement). The divided-down outputs may be used where only a slower frequency counter is available, such as a low-cost microcontroller, or where period measurement techniques are used. The divide-by-10 and divide-by-100 outputs provide lower frequency ranges for high resolution-period measurement.

### Measuring the frequency

The choice of interface and measurement technique depends on the desired resolution and data acquisition rate. For maximum data-acquisition rate, period-measurement techniques are used.

Using the divide-by-2 output, data can be collected at a rate of twice the output frequency or one data point every microsecond for full-scale output. Period measurement requires the use of a fast reference clock with available resolution directly related to reference-clock rate. Output scaling can be used to increase the resolution for a given clock rate or to maximize resolution as the light input changes. Period measurement is used to measure rapidly varying light levels or to make a very fast measurement of a constant light source.

Maximum resolution and accuracy may be obtained using frequency-measurement, pulse-accumulation, or integration techniques. Frequency measurements provide the added benefit of averaging out random or high-frequency variations (jitter) resulting from noise in the light signal or from noise in the power supply. Resolution is limited mainly by available counter registers and allowable measurement time. Frequency measurement is well suited for slowly varying or constant light levels and for reading average light levels over short periods of time. Integration (the accumulation of pulses over a very long period of time) can be used to measure exposure, the amount of light present in an area over a given time period.



# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

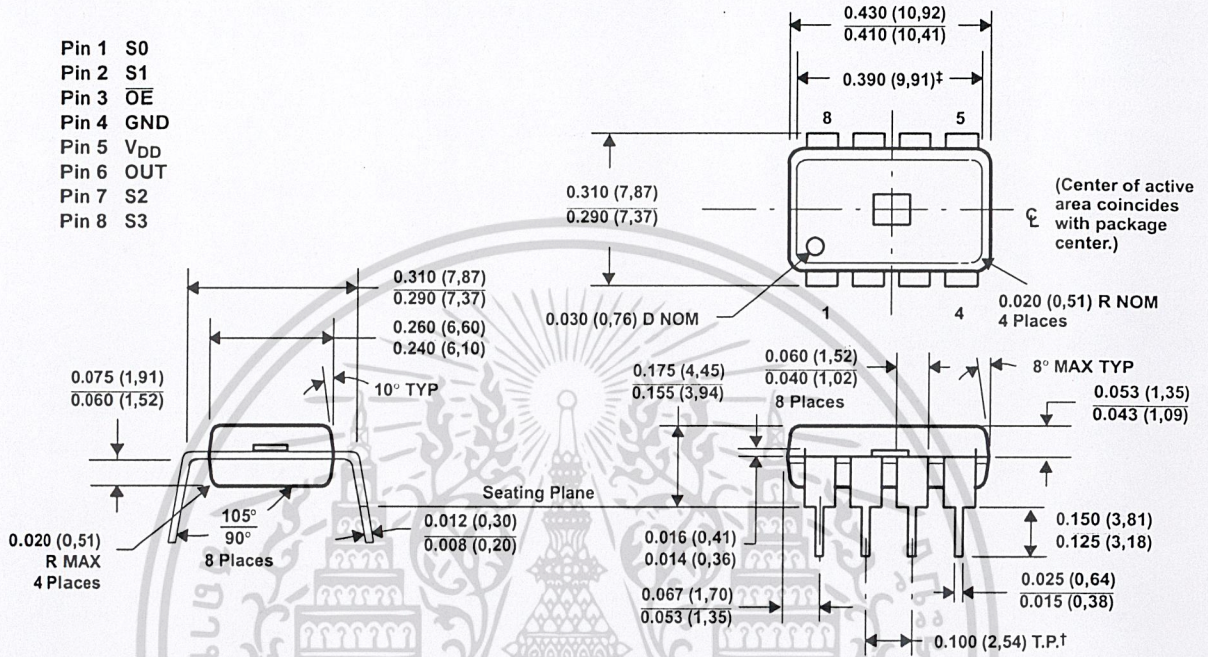
TAOS048 – OCTOBER 2002

## MECHANICAL INFORMATION

### PACKAGE P

### PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE

This dual-in-line package consists of an integrated circuit mounted on a lead frame and encapsulated with an electrically nonconductive clear plastic compound. The photodiode area is typically 0.92 mm<sup>2</sup> (0.0014 in<sup>2</sup>) (S0 = S1 = H).



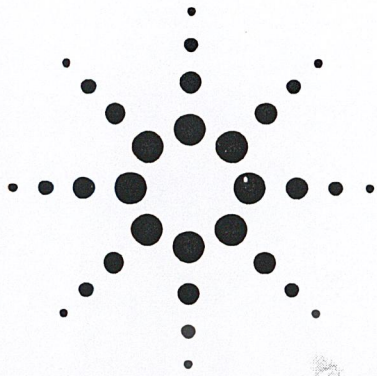
- Pin 1 S0
- Pin 2 S1
- Pin 3  $\overline{OE}$
- Pin 4 GND
- Pin 5 V<sub>DD</sub>
- Pin 6 OUT
- Pin 7 S2
- Pin 8 S3

† True position when unit is installed  
‡ Minimum flat-optical-surface length

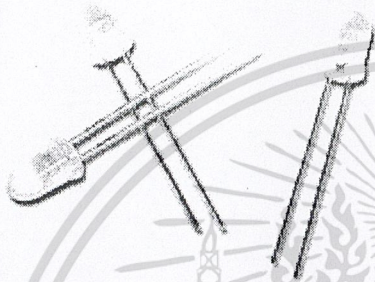
- NOTES: A. All linear dimensions are in inches and parenthetically in millimeters.  
B. Index of refraction of clear plastic is 1.55.  
C. This drawing is subject to change without notice.

Figure 6. P — Plastic Dual-In-Line Packaging Configuration





# Agilent Sun Power Series HLMP-CB15, HLMP-CM15, HLMP-CB30, HLMP-CM30 T-1<sup>3</sup>/<sub>4</sub> (5 mm) Precision Optical Performance InGaN Blue and Green Lamps Data Sheet



## Description

These high intensity blue and green LEDs are based on InGaN material technology. InGaN is the most efficient and cost effective material for LEDs in the blue and green region of the spectrum. The 472 nm typical dominant wavelength for blue and 526 nm typical dominant wavelength for green are well suited to color mixing in full color signs.

These LED lamps are untinted, nondiffused, T-1<sup>3</sup>/<sub>4</sub> packages incorporating second generation optics producing well defined spatial radiation patterns at specific viewing cone angles.

These lamps are made with an advanced optical grade epoxy, offering superior high temperature and high moisture resistance performance in outdoor signal and sign applications. The high maximum LED junction temperature limit of +130°C enables high temperature operation in bright sunlight conditions. The package epoxy contains both UV-A and UV-B inhibitors to reduce the effects of long term exposure to direct sunlight.

These lamps are available in two viewing angle options to give the designer flexibility with optical design.

## Features

- Well defined spatial radiation pattern
- Viewing angles: 15° and 30°
- High luminous output
- Colors: 472 nm Blue, 526 nm Green
- Superior resistance to moisture
- UV resistant epoxy

## Benefits

- Superior performance in outdoor environments
- Wavelengths suitable for color mixing in full color (RGB) signs

## Applications

- Commercial outdoor signs
- Automotive interior lights
- Front panel indicators
- Front panel backlighting

**CAUTION:** HLMP-CBxx and HLMP-CMxx LEDs are Class 1 ESD sensitive. Please observe appropriate precautions during handling and processing. Refer to Agilent Application Note AN-1142 for additional details.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LED Indicators

### Device Selection Guide

Part Number	Typical Viewing Angle	Color and Dominant Wavelength $\lambda_d$ (nm) Typ.	Luminous Intensity, $I_v$ (mcd) Min.	Leads with Stand-Offs	Package Drawing
HLMP-CB15-P00xx	15°	Blue 472	880	No	A
HLMP-CB15-R00xx	15°	Blue 472	1500	No	A
HLMP-CB16-P00xx	15°	Blue 472	880	Yes	B
HLMP-CB30-K00xx	30°	Blue 472	310	No	A
HLMP-CB30-M00xx	30°	Blue 472	520	No	A
HLMP-CB31-M00xx	30°	Blue 472	520	Yes	B
HLMP-CM15-S00xx	15°	Green 526	1900	No	A
HLMP-CM15-W00xx	15°	Green 526	5500	No	A
HLMP-CM16-S00xx	15°	Green 526	1900	Yes	B
HLMP-CM30-M00xx	30°	Green 526	520	No	A
HLMP-CM30-S00xx	30°	Green 526	1900	No	A
HLMP-CM31-M00xx	30°	Green 526	520	Yes	B

### Part Numbering System

HLMP - X X XX - X X X XX

#### Mechanical Options

- 00: Bulk
- DD: Ammo Pack

#### Color Bin Selection

- 0: Full color range

#### Maximum Intensity Bin

- 0: No maximum  $I_v$  bin limit

#### Minimum Intensity Bin

Refer to device selection guide

#### Viewing Angle and Standoff Options

- 15: 15 degree without standoff
- 16: 15 degree with standoff
- 30: 30 degree without standoff
- 31: 30 degree with standoff

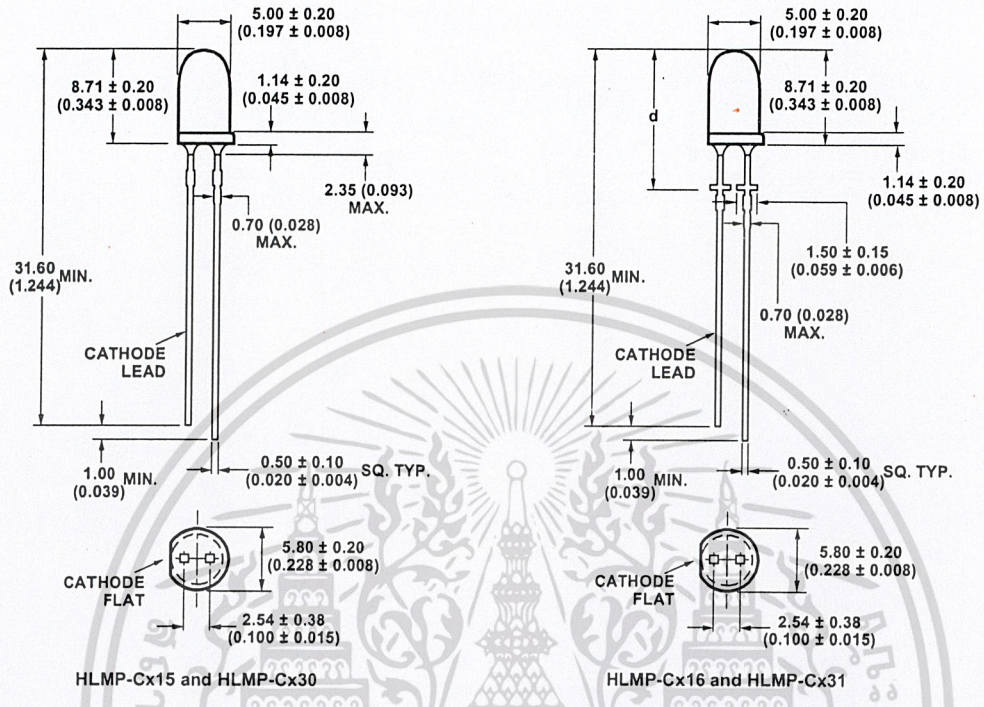
#### Color

- B: Blue
- M: Green

#### Package

- C: T-1 3/4 (5 mm) round lamp

**Package Dimensions**



HLMP-Cx16	HLMP-Cx31
$d = 12.60 \pm 0.25$ (0.496 ± 0.010)	$d = 12.22 \pm 0.50$ (0.481 ± 0.020)

**Notes:**

1. Dimensions in mm.
2. Tolerance  $\pm 0.1$  mm unless otherwise noted.

### Absolute Maximum Ratings at $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Blue and Green
DC Forward Current <sup>(1)</sup>	30 mA
Peak Pulsed Forward Current	100 mA
Average Forward Current	30 mA
Reverse Voltage ( $I_R = 100 \mu\text{A}$ )	5 V
Power Dissipation	120 mW
LED Junction Temperature	130°C
Operating Temperature Range	-40°C to +80°C
Storage Temperature Range	-40°C to +100°C
Soldering Temperature	260°C for 5 seconds

**Note:**

1. Derate linearly as shown in Figure 5 for temperatures above 50°C.

### Electrical/Optical Characteristics at $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
Forward Voltage						
HLMP-CB1x-P0000	$V_F$		3.8	4.0	V	$I_F = 20 \text{ mA}$
HLMP-CB15-R0000			3.5	4.0		
HLMP-CB3x-K0000			3.8	4.0		
HLMP-CB3x-M0000			3.8	4.0		
HLMP-CM1x-S0000			3.8	4.0		
HLMP-CM15-W0000			3.5	4.0		
HLMP-CM3x-M0000			3.8	4.0		
HLMP-CM30-S0000			3.5	4.0		
Reverse Voltage	$V_R$	5				$I_R = 100 \mu\text{A}$
Peak Wavelength						Peak of Wavelength of Spectral Distribution at $I_F = 20 \text{ mA}$
Blue ( $\lambda_d = 472 \text{ nm}$ )	$\lambda_{\text{peak}}$		470		nm	
Green ( $\lambda_d = 526 \text{ nm}$ )			524			
Spectral Halfwidth						Wavelength Width at Spectral Power Point at $I_F = 20 \text{ mA}$
Blue ( $\lambda_d = 472 \text{ nm}$ )	$\Delta\lambda_{1/2}$		35		nm	
Green ( $\lambda_d = 526 \text{ nm}$ )			47			
Capacitance	C		43		pF	$V_F = 0, F = 1 \text{ MHz}$
Luminous Efficacy						Emitted Luminous Power/Emitted Radiant Power
Blue ( $\lambda_d = 472 \text{ nm}$ )	$\eta_v$		75		lm/W	
Green ( $\lambda_d = 526 \text{ nm}$ )			520			
Thermal Resistance	$R_{\theta\text{J-PIN}}$		240		°C/W	LED Junction-to-Cathode Lead

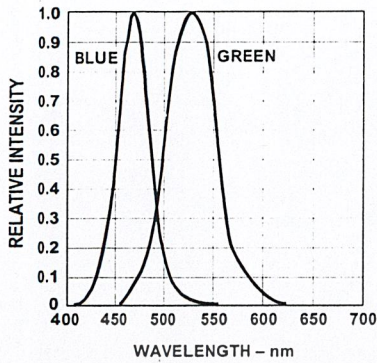


Figure 1. Relative intensity vs. wavelength.

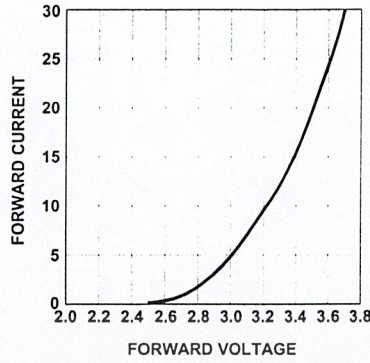


Figure 2. Forward current vs. forward voltage (for HLMP-CB15-R0000, HLMP-CM15-W0000 and HLMP-CM30-S0000).

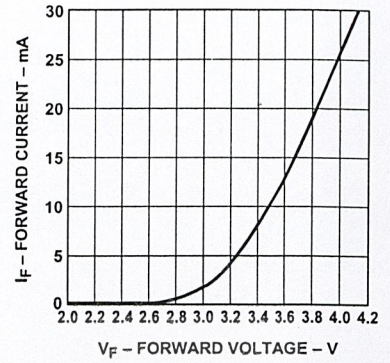


Figure 3. Forward current vs. forward voltage (for HLMP-CB1x-P0000, HLMP-CB30-K0000, HLMP-CB3x-M0000, HLMP-CM1x-S0000 and HLMP-CM3x-M0000).

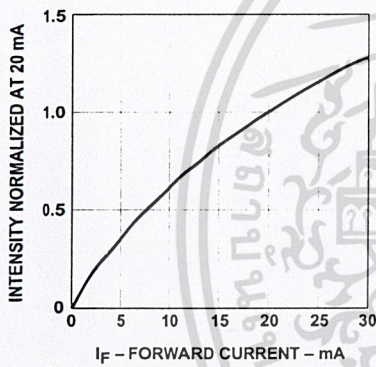


Figure 4. Relative luminous intensity vs. forward current.

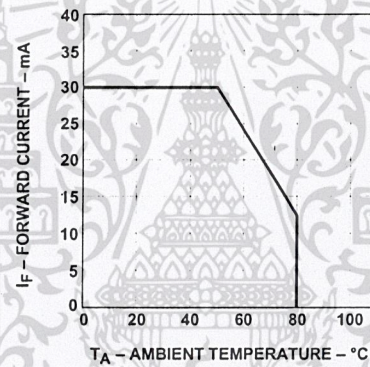


Figure 5. Maximum forward current vs. ambient temperature.

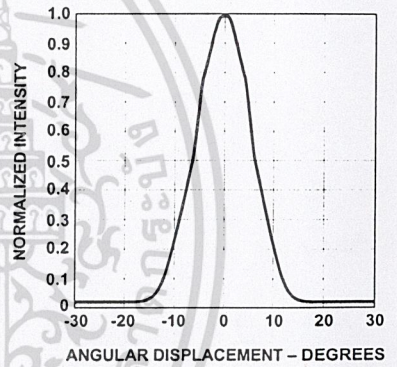


Figure 6. Spatial radiation pattern - 15° lamps.

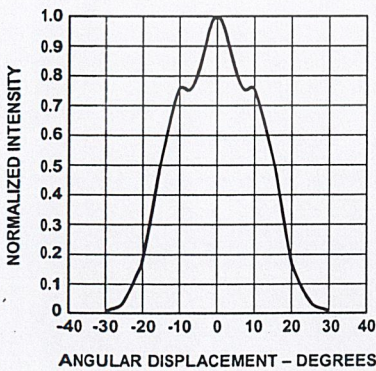


Figure 7. Spatial radiation pattern - 30° lamps.

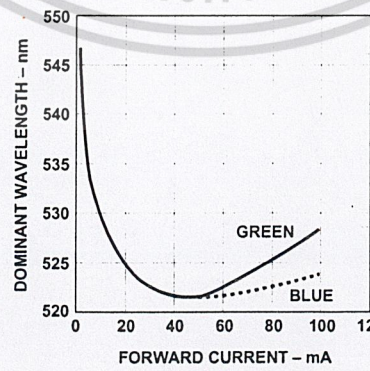


Figure 8. Color vs. forward current.

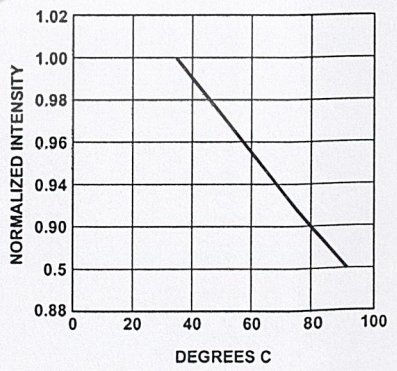


Figure 9. Normalized  $I_v$  vs.  $T$  (green).

**Color Bin Limits (nm at 20 mA)**

Blue Bin ID	Color Range (nm)	
	Min.	Max.
1	460.0	464.0
2	464.0	468.0
3	468.0	472.0
4	472.0	476.0
5	476.0	480.0

Tolerance for each bin limit is  $\pm 0.5$  nm.

Green Bin ID	Color Range (nm)	
	Min.	Max.
1	520.0	524.0
2	524.0	528.0
3	528.0	532.0
4	532.0	536.0
5	536.0	540.0

Tolerance for each bin limit is  $\pm 0.5$  nm.

**Intensity Bin Limits**

Bin Name	Min.	Max.
K	310	400
L	400	520
M	520	680
N	680	880
P	880	1150
Q	1150	1500
R	1500	1900
S	1900	2500
T	2500	3200
U	3200	4200
V	4200	5500
W	5500	7200

Tolerance of each minimum and maximum is  $\pm 15\%$ .

**Note:**

1. All bin categories are established for classification of products. Products may not be available in all bin categories. Please contact your Agilent representatives for further information.



**[www.agilent.com/semiconductors](http://www.agilent.com/semiconductors)**

For product information and a complete list of distributors, please go to our web site.

For technical assistance call:

Americas/Canada: +1 (800) 235-0312 or (408) 654-8675

Europe: +49 (0) 6441 92460

China: 10800 650 0017

Hong Kong: (+65) 6271 2451

India, Australia, New Zealand: (+65) 6271 2394

Japan: (+81 3) 3335-8152(Domestic/International), or 0120-61-1280(Domestic Only)

Korea: (+65) 6271 2194

Malaysia, Singapore: (+65) 6271 2054

Taiwan: (+65) 6271 2654

Data subject to change.

Copyright © 2003 Agilent Technologies, Inc.

Obsoletes 5988-7309EN

January 16, 2003

5988-8658EN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TSL230R, TSL230AR, TSL230BR PROGRAMMABLE LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTERS

TAOS048 – OCTOBER 2002

**PRODUCTION DATA** — information in this document is current at publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

## NOTICE

Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. (TAOS) reserves the right to make changes to the products contained in this document to improve performance or for any other purpose, or to discontinue them without notice. Customers are advised to contact TAOS to obtain the latest product information before placing orders or designing TAOS products into systems.

TAOS assumes no responsibility for the use of any products or circuits described in this document or customer product design, conveys no license, either expressed or implied, under any patent or other right, and makes no representation that the circuits are free of patent infringement. TAOS further makes no claim as to the suitability of its products for any particular purpose, nor does TAOS assume any liability arising out of the use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages.

TEXAS ADVANCED OPTOELECTRONIC SOLUTIONS, INC. PRODUCTS ARE NOT DESIGNED OR INTENDED FOR USE IN CRITICAL APPLICATIONS IN WHICH THE FAILURE OR MALFUNCTION OF THE TAOS PRODUCT MAY RESULT IN PERSONAL INJURY OR DEATH. USE OF TAOS PRODUCTS IN LIFE SUPPORT SYSTEMS IS EXPRESSLY UNAUTHORIZED AND ANY SUCH USE BY A CUSTOMER IS COMPLETELY AT THE CUSTOMER'S RISK.

LUMENOLOGY is a registered trademark, and TAOS, the TAOS logo, and Texas Advanced Optoelectronic Solutions are trademarks of Texas Advanced Optoelectronic Solutions Incorporated.

