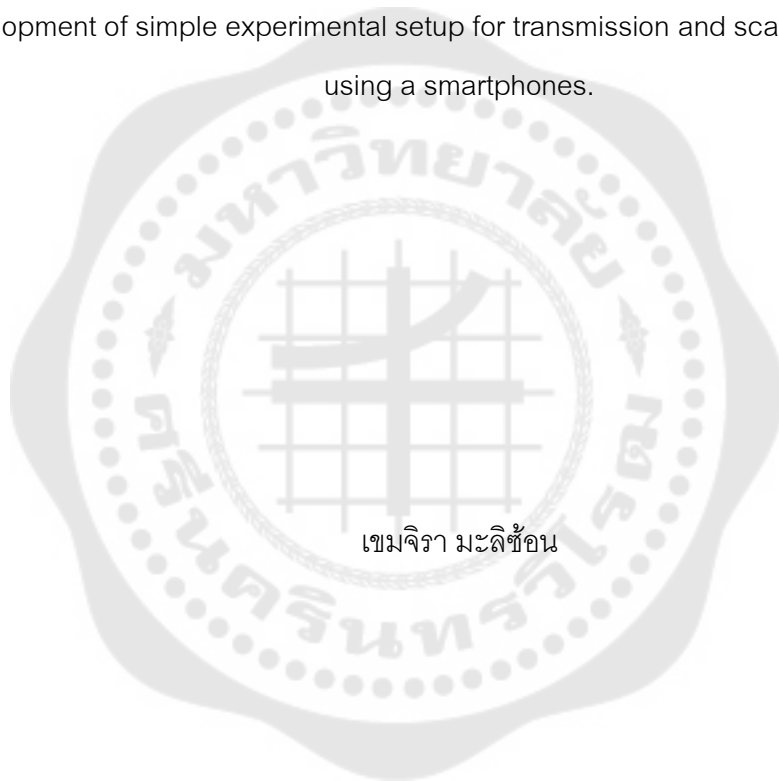




การพัฒนาชุดการทดลองวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงอย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟน
Development of simple experimental setup for transmission and scattering of light by
using a smartphones.



เขมจิรา มะลิซ้อน

การพัฒนาชุดการทดลองวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงอย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Development of simple experimental setup for transmission and scattering of light by
using a smartphones.



KHEMCHIRA MALISORN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF EDUCATION
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาชุดการทดลองวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงอย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟน

ของ

เขมจิรา มะลิซ้อน

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา)

(อาจารย์ ดร.ชินวุธ พิพัฒน์ภานุกุล)

ที่ปรึกษาร่วม

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์)

| | |
|----------------------|--|
| ชื่อเรื่อง | การพัฒนาชุดการทดลองวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงอย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟน |
| ผู้วิจัย | ชมจิรา มะลิซ้อน |
| ปริญญา | การศึกษามหาบัณฑิต |
| ปีการศึกษา | 2562 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธิรักษา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง |

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองสำหรับวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง โดยวัดค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านสารละลายเพื่อศึกษาความสามารถในการส่องผ่านหรือการดูดกลืนแสงของสารละลายที่สอดคล้องกับกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ทั้งนี้สามารถนำมาใช้ศึกษาการกระเจิงแสงของสารละลายเมื่อสารละลายมีความขุ่นโดยใช้สมาร์ทโฟนที่ทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันที่เหมาะสมเป็นแหล่งกำเนิดแสงด้วยหน้าจอสมาาร์ทโฟน และใช้เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงด้วยกล้องหลังของสมาร์ตโฟน ในการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านของแสงจัดวางอุปกรณ์โดยให้แหล่งกำเนิดแสง สารละลาย และอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสงให้อยู่ในแนวเดียวกัน สำหรับการทดลองการวัดค่าการกระเจิงแสงจัดวางอุปกรณ์ให้อุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสงอยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงและสารละลาย ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายนั้นสอดคล้องกับกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต รวมทั้งสามารถนำมาใช้วัดการกระเจิงแสงของสารละลายได้ ซึ่งชุดการทดลองนี้สามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย อุปกรณ์ที่นำมาใช้มีราคาถูกและหาได้ง่าย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าชุดการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์แก่ครูผู้สอนที่ต้องการออกแบบหรือสร้างชุดการทดลองสำหรับวัดค่าการส่องผ่านแสงพร้อมทั้งสามารถวัดค่าการกระเจิงของแสงได้

คำสำคัญ : กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต, การดูดกลืนแสง, การกระเจิงแสง, ชุดการทดลองฟิสิกส์, การส่องผ่านของแสง, สมาร์ทโฟน

| | |
|----------------|---|
| Title | Development of simple experimental setup for transmission and scattering of light by using a smartphones. |
| Author | KHEMCHIRA MALISORN |
| Degree | MASTER OF EDUCATION |
| Academic Year | 2019 |
| Thesis Advisor | Assistant Professor Chokchai Puttharugsa , Ph.D. |
| Co Advisor | Assistant Professor Nongluck Hounkhang , Ph.D. |

This paper demonstrates the use of smartphones in an experiment on light adsorption (according to the law of Beer-Lambert) and light scattering. The smartphones with an appropriate application (app) acts as a light source using the LED display of the smartphone and as a detector using the back camera. The light source, sample and detector was aligned in the same direction to measure light adsorption. In order to measure the light scattering, the detector was aligned orthogonally to the light source-sample direction. The results found that the light absorption and light scattering can be measured using a smartphone. The experiment setup is easy to set without any further expensive apparatus. It can be expected that this experiment may be useful to physics teachers to demonstrate light adsorption and light scattering in the classroom or in the physics laboratory.

Keyword : Experimental setup, Light scattering, smartphones, transmission of light, the law of Beer-Lambert

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้จากความกรุณาให้คำแนะนำ ความรู้ ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา และการช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธิรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาหลักปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นงลักษณ์ หวงกาแหง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญาโท

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ชินวุฒ พิพัฒน์ภาณุกุล รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ อาจารย์ ดร. สุพิชญ์ เขมมณี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ พลายพิชิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรวุฒิ วิจารณ์ ที่ให้ความกรุณารับเป็นคณะกรรมการในการสอบเค้าโครงและการสอบปากเปล่าปริญญาโทรวมทั้งให้คำแนะนำและข้อแก้ไขเพิ่มเติมเพื่อให้ปริญญาโทฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณเสริมสุข รัตเร่ง และคุณวิวัฒน์ เครือวงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านการใช้สถานที่ทำการทดลอง ช่วยจัดหาเครื่องมือวิทยาศาสตร์พร้อมคำอธิบายการใช้งาน รวมทั้งให้การช่วยเหลือการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ของปริญญาโทฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (โครงการ สควค.) ผู้สนับสนุนเงินทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท และเงินทุนสนับสนุนการทำปริญญาโท

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการทำวิจัยแผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักการงานวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๓ ขอกราบขอบพระคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับเงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย ทำให้การดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนางสาววิชญาพร นามจันทร์ เพื่อนนิสิตปริญญาโท รวมถึงเพื่อน ๆ นิสิตในหลักสูตรปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยให้คำแนะนำและคำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดช่วงระยะเวลาในการเรียนในระดับปริญญาโท และที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวทุก ๆ ท่านที่คอยส่งเสริมให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยเสมอมา



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| | ช |
| สารบัญ | ฌ |
| สารบัญตาราง..... | 1 |
| สารบัญรูปภาพ | 2 |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| ภูมิหลัง | 1 |
| ความมุ่งหมายของการวิจัย | 3 |
| ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| นิยามศัพท์เฉพาะ..... | 4 |
| บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... | 5 |
| 1. อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย..... | 5 |
| 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงของแสง..... | 6 |
| 3. ระบบสี RGB | 7 |
| 4. สีที่ถูกดูดกลืนและสีที่มองเห็นของวัตถุ (absorbed-transmitted color feature) | 8 |
| 5. กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) | 10 |

| | |
|--|----|
| 6. Modern Derivation of the Beer-Lambert Law | 14 |
| 7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 15 |
| 7.1 งานวิจัยภายในประเทศ | 15 |
| 7.2 งานวิจัยในต่างประเทศ | 16 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย | 20 |
| 1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น งานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย | 20 |
| 2. สร้างการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง | 20 |
| 2.1 วัสดุอุปกรณ์ | 20 |
| 2.2 วิธีการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านแสง | 26 |
| ตอนที่ 1 การวัดค่าการส่องผ่านแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 26 |
| ตอนที่ 2 การวัดค่าการส่องผ่านแสงเมื่อสารมีความหนาเพิ่มขึ้น | 28 |
| 2.3 วิธีการทดลองการวัดค่าการกระเจิงแสงเมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น | 30 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา | 33 |
| 1. การวัดค่าความเข้มแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟน | 33 |
| 2. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 35 |
| 3. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น | 36 |
| 4. วัดการกระเจิงของแสงที่เมื่ออุปกรณ์วัดความเข้มแสงทำมุม 90 องศา กับแหล่งกำเนิดแสง จากสารละลายกวิสคอนที่มีความเข้มข้น (ความขุ่น) เพิ่มมากขึ้น | 38 |
| บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ | 41 |
| 1. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง | 41 |
| 2. ข้อเสนอแนะ | 41 |
| บรรณานุกรม | 45 |
| ประวัติผู้เขียน | 47 |

| | |
|---|----|
| ภาคผนวก..... | 51 |
| ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง | 52 |
| ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์..... | 63 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตาราง 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของวัตถุที่มองเห็น..... | 10 |
| ตาราง 2 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 53 |
| ตาราง 3 ค่า RGB ของแสงสีขาวเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 54 |
| ตาราง 4 ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 55 |
| ตาราง 5 ค่าการส่องผ่านของแสงสีขาวเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 56 |
| ตาราง 6 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น | 57 |
| ตาราง 7 ค่า RGB ของแสงสีขาวเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น..... | 58 |
| ตาราง 8 ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น | 59 |
| ตาราง 9 ค่าการส่องผ่านของแสงสีขาวเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น..... | 60 |
| ตาราง 10 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเนื่องจากการกระเจิงของแสงเมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น | 61 |
| ตาราง 11 ค่า RGB ของแสงสีขาวเนื่องจากการกระเจิงของแสงเมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น | 62 |

สารบัญรูปภาพ

หน้า

| | |
|--|----|
| ภาพประกอบ 1 อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย | 5 |
| ภาพประกอบ 2 คลื่นระนาบโพลาไรส์ในระนาบ x-z ที่ตกกระทบบนทรงกลมจากทางซ้าย ส่วนของคลื่นกระเจิงที่กระเจิงไปในมุม จนถึงลูกศรภายในทรงกลมบอกถึงแสงโพลาไรส์บนวัสดุที่เป็นฉนวน | 6 |
| ภาพประกอบ 3 ระบบสี RGB | 7 |
| ภาพประกอบ 4 แสงที่ตกกระทบและแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุสีต่าง ๆ | 8 |
| ภาพประกอบ 5 วงล้อสี | 9 |
| ภาพประกอบ 6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อแสงเคลื่อนผ่านสารละลายที่ชั้นต่าง ๆ | 11 |
| ภาพประกอบ 7 รูปแสดงการเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารละลายที่ความเข้มข้นต่างกัน | 11 |
| ภาพประกอบ 8 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ %T และ absorbance | 13 |
| ภาพประกอบ 9 แผนภาพแสดงแสงเชิงเดี่ยวเมื่อส่องผ่านสารละลาย ที่สอดคล้องตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต | 14 |
| ภาพประกอบ 10 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 20 |
| ภาพประกอบ 11 เส้นใย PLA สีดำ | 21 |
| ภาพประกอบ 12 สัญลักษณ์โปรแกรม Autodesk 123D Design (A) และภาพขณะเปิดใช้งาน (B) | 22 |
| ภาพประกอบ 13 สัญลักษณ์โปรแกรม Ultimaker Cura (A) และภาพขณะเปิดใช้งาน (B) | 23 |
| ภาพประกอบ 14 สัญลักษณ์โปรแกรม ColorAssist (A) ภาพขณะเปิดใช้งานแอปพลิเคชัน (B) และค่าสีที่บันทึกได้ (C) | 24 |
| ภาพประกอบ 15 สัญลักษณ์แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer (A) ภาพพื้นหลังหน้าจอสีแดง (B) สีเขียว (C) สีน้ำเงิน (D) และสีขาว (E) | 25 |
| ภาพประกอบ 16 สารละลายสีผสมอาหารเจือจางสีแดงที่ความเข้มข้น 0.05 % - 0.5 % โดยปริมาตร | 26 |

| | |
|--|----|
| ภาพประกอบ 17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร เมื่อมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น..... | 27 |
| ภาพประกอบ 18 สารละลายสีผสมอาหารสีแดงความเข้มข้น 0.30% โดยปริมาตร ความหนา ตั้งแต่ 1 – 10 mm..... | 28 |
| ภาพประกอบ 19 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร เมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น | 29 |
| ภาพประกอบ 20 สารละลายกาวิสกอนความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยปริมาตร | 30 |
| ภาพประกอบ 21 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองการกระเจิงของแสงจากสารละลายกา วิสกอนที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น..... | 31 |
| ภาพประกอบ 22 ความยาวคลื่นแสงจากหน้าจอสมาร์ตโฟน | 34 |
| ภาพประกอบ 23 กราฟการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน (เส้นทึบ) และสีขา (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น | 35 |
| ภาพประกอบ 24 กราฟการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน (เส้นทึบ) และสีขา (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น..... | 37 |
| ภาพประกอบ 25 กราฟการกระเจิงของแสงสีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน (เส้นทึบ) และสีขา (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น..... | 39 |

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ปัจจุบันสมาร์ทโฟนมีบทบาทอย่างมากในยุค 4.0 ที่นอกจากการใช้ในด้านการติดต่อสื่อสารแล้ว ยังสามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตเพื่อความบันเทิง สืบค้นข้อมูล และที่สำคัญยังใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษามากมายจากการใช้แอปพลิเคชันต่าง ๆ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ โดยมีงานวิจัยต่างๆ ที่นำสมาร์ทโฟนมาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ เช่น San และคณะ รวมทั้ง Oprea และ Cristina ใช้เซนเซอร์ในสมาร์ทโฟนได้อย่างหลากหลายแทนการใช้อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ เช่น การใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Acceleration) ในการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่แนวตั้งสำหรับการคำนวณหาค่าความเร่งสนามโน้มถ่วงของโลก และหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิววัตถุต่าง ๆ ใช้เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) มาใช้ในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณเสาไฟฟ้าแรงสูง และใช้เซนเซอร์แสง (Ambient light sensor) หาระยะห่างของวัตถุกับแหล่งกำเนิดแสง (Oprea และ Miron, 2014; Sans และคนอื่นๆ, 2015) ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่ใช้เซนเซอร์แสงตรวจจับการกระเจิงของแสงเพื่อหาปริมาณความขุ่นของน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ อีกทั้งยังสามารถใช้หาการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ที่พบได้ในเนื้อสุกร เนื้อโค และผิวหนังของมนุษย์ หรือจะเป็นการใช้เซนเซอร์แสงแทนอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่อยู่ในเครื่อง Spectrophotometer (Hussain, Ahamad, และ Nath, 2016; Liang, San Park, และ Yoon, 2014; Sweeney, Budiman, และ Yoon, 2017, July) ดังที่ Onorato, Malgieri และ De Ambrosio รวมทั้ง Bill สร้างเครื่อง Spectrophotometer อย่างง่ายโดยใช้สมาร์ทโฟนเป็นตัวตรวจจับแสง (Hosker, 2017; P Onorato, Malgieri, และ De Ambrosio, 2015) ในขณะที่ Thomas และ Erik รวมทั้ง Pasquale และคณะ ก็ได้สร้างเครื่อง Spectrophotometer อย่างง่ายเพื่อใช้ในการศึกษากฎของ Beer และ Lambert (Kuntzleman และ Jacobson, 2016; Pasquale Onorato, Gratton, Polesello, Salmoiraghi, และ Oss, 2018) นอกจากนี้ David, San และ Jeong-Yeol ยังได้ใช้หลักการของเครื่อง Spectrophotometer ร่วมกับเซนเซอร์แสงหาความเข้มข้นของฮอร์โมน TSH ในที่ทดสอบการตั้งครรภ์ (You, Park, และ Yoon, 2013) และ Clifford และคณะ ใช้หาปริมาณของโปรตีนจากการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายไบยูเรต (P Onorato, Malgieri, และ Ambrosio, 2016) นอกจากนี้ Porter และคณะ ได้ประยุกต์ใช้การปรับ 3 มิติมาใช้ในการสร้างเครื่อง spectrophotometer อย่างง่ายให้มีความแม่นยำในการวัดมากยิ่งขึ้น (Porter

Jr, Chapman, และ Alaniz, 2016; Porter Jr, Washer, Hakim, และ Dallinger, 2016) จากงานวิจัยในช่วงต้นจะเห็นได้ที่เราสามารถนำสมาร์ตโฟนมาใช้แทนเครื่องมือวิทยาศาสตร์บางชนิดที่มีราคาสูง ซึ่งถือเป็นการเปิดโอกาสให้กับโรงเรียนหลาย ๆ โรงเรียนที่มีงบประมาณอย่างจำกัดและไม่เพียงพอต่อการซื้ออุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่มีราคาแพงได้

โดยทั่วไปการทดลองเรื่องแสงและการมองเห็นจะใช้หลอดไฟหรือหลอด LED แทนแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งจะต้องมีการต่อวงจร และสายไฟที่ยูกยาก ไม่เป็นระเบียบ และยังให้แสงที่ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหลอด โดยหากจัดวางอุปกรณ์คลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อยค่าแสงที่ออกมาจากหลอด LED ก็จะมีค่าความเข้มแสงที่ผิดเพี้ยนไป จึงอาจส่งผลให้ค่าความเข้มแสงที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นค่าความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงควรที่จะมีค่าเท่ากันในแต่ละการทดลอง และจากคุณสมบัติหน้าจอสมาร์ตโฟนที่สามารถควบคุมค่าความเข้มแสงและปรับเลือกแสงสีต่าง ๆ ได้ ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์นำเอาหน้าจอสมาร์ตโฟนมาทดแทนการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟ LED โดยนำแอปพลิเคชันที่สามารถตั้งค่าเลือกสีพื้นหลังได้ใช้งานร่วมกับหน้าจอของสมาร์ตโฟน เพื่อให้ได้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงคงที่และปรับเลือกสีของแสงได้

เครื่องมือ 3 มิติเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันนี้ สามารถสร้างชิ้นงานออกมาเป็นแบบ 3 มิติ ที่สามารถจับต้องได้ โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ เครื่องมือ 3 มิติจึงสามารถสร้างชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ ตามความต้องการของผู้ใช้งานได้ ทำให้ลดความซับซ้อนในการหาชุดอุปกรณ์ได้ อีกทั้งตัวชิ้นงานที่ได้ยังมีความแข็งแรง และมีราคาค่อนข้างถูกเนื่องจากพลาสติกที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานนั้นมีราคาที่ค่อนข้างต่ำ ทางผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของเครื่องมือ 3 มิติ มาช่วยในการออกแบบอุปกรณ์และสร้างชิ้นงานที่เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการส่องผ่าน การดูดกลืน และการกระเจิงแสงที่เกิดกับสารละลายแบบต่าง ๆ

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้ในการหาค่าการส่องผ่านของแสง หรือเครื่อง UV Visible spectrophotometer นั้นเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีราคาสูง ขั้นตอนการใช้งานซับซ้อน อาจเป็นเรื่องยากหากจะนำไปใช้ในห้องเรียน

ในโครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการดูดกลืน การส่องผ่านและการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นชุดการทดลองอย่างง่าย โดยนำเครื่องมือ 3 มิติมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ชุดการทดลองต้นแบบ ร่วมกับการนำสมาร์ตโฟนแทนแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้หน้าจอของสมาร์ตโฟนและทดแทนอุปกรณ์วัดค่าแสงจากกล้องของสมาร์ตโฟน โดยชุดการทดลองต้นแบบดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้อธิบายเนื้อหาเรื่องการส่องผ่านแสงที่สอดคล้องกับกฎของเบียร์

- แลมเบิร์ต และการกระเจิงของแสงในห้องเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยสร้างความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาเรื่องการส่องผ่านและการกระเจิงแสงให้นักเรียนได้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อสร้างชุดการทดลองหาค่าการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง โดยใช้หน้าจอของสมาร์ทโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องของสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง
2. เพื่อศึกษาการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร และศึกษาการกระเจิงของแสงจากแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายโซเดียมแอลจีเนต

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี ออกแบบและสร้างชุดการทดลองโดยใช้หน้าจอของสมาร์ทโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องของสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง
2. ศึกษาค่าการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นและความหนาเพิ่มขึ้น
3. ศึกษาค่าการกระเจิงของแสงจากแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายโซเดียมแอลจีเนต ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดการทดลองสำหรับหาค่าการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง โดยใช้หน้าจอของสมาร์ทโฟนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้กล้องของสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง
2. ได้ศึกษาค่าการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นและความหนาเพิ่มขึ้น
3. ได้ศึกษาค่าการกระเจิงของแสงจากแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายโซเดียมแอลจีเนต เมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้นโดยใช้สมาร์ทโฟน

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การกระเจิงของแสง (Ray, 2560) เป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการแผ่ของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นสารที่ไม่ใช่สารเนื้อเดียว จะทำให้สารนั้นเปล่งแสงออกมา

2. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ระดับของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”

3. กฎของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”

4. สมาร์ทโฟน (Smartphone) คือโทรศัพท์มือถือเคลื่อนที่ที่มีความสามารถมากกว่าการใช้ติดต่อสื่อสารโดยสามารถทำงานได้หลากหลายคล้ายกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กจากการใส่แอปพลิเคชันต่าง ๆ เข้าไปตามความสามารถที่ต้องการ

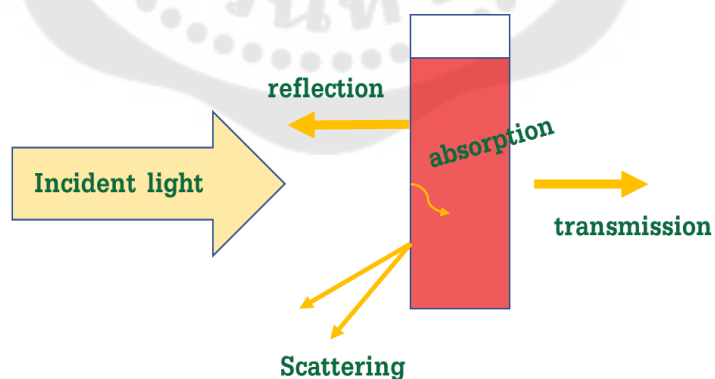
บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. อันตรกิริยาของแสงกับสาร
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงของแสง
3. สีที่ถูกดูดกลืนและสีที่มองเห็นของวัตถุ (absorbed-transmitted color feature)
4. กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)
5. เครื่อง UV-Visible spectrophotometer
6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 6.1 งานวิจัยภายในประเทศ
 - 6.2 งานวิจัยในต่างประเทศ

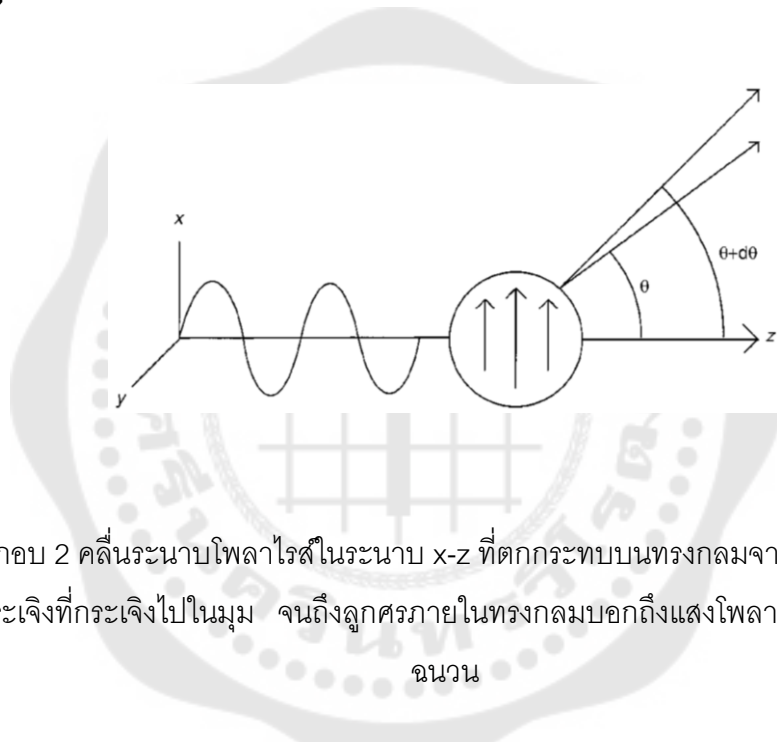
1. อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย



ภาพประกอบ 1 อันตรกิริยาของแสงกับสารละลาย

เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนสารละลายจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแสงกับสารละลาย โดยแสงบางส่วนสามารถส่องผ่านสารละลายได้ บางส่วนถูกสารละลายดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อนกับสารละลาย และแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงแสงได้ ทั้งนี้ปริมาณของแสงที่ส่องผ่านสารละลาย ถูกสารละลายดูดกลืน สะท้อนออกจากสารละลาย และกระเจิงแสงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย พร้อมทั้งค่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบบนสารละลาย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงของแสง



ภาพประกอบ 2 คลื่นระนาบโพลาไรส์ในระนาบ $x-z$ ที่ตกกระทบบนทรงกลมจากทางซ้าย ส่วนของคลื่นกระเจิงที่กระเจิงไปในมุม θ จนถึงลูกศรภายในทรงกลมบอกถึงแสงโพลาไรส์บนวัสดุที่เป็นฉนวน

ที่มา : (Cox, DeWeerd, และ Linden, 2002, June)

แสงเมื่อตกกระทบบนสารละลายที่มีความขุ่น (สารเนื้อผสม) (Cox และคนอื่น ๆ, 2002, June) จะเกิดการกระเจิงของแสง โดยลักษณะการกระเจิงแสงจะมีรูปแบบการกระเจิงที่แตกต่างกันไปซึ่งเป็นการสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นแสงและขนาดอนุภาคของสารละลายที่แสงตกกระทบบน รูปแบบการกระเจิงของแสงถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การกระเจิงของแสงแบบเรย์เล

(Rayleigh scattering) และการกระเจิงของแสงแบบมี (Mie scattering) ในแต่ละรูปแบบของการกระเจิงของแสงสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 การกระเจิงแบบเรย์เล (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรย์เล นำไปใช้อธิบายการกระเจิงของแสงเมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคทรงกลมที่มีรัศมีน้อยกว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ

2.2 การกระเจิงแบบมี (Mie scattering)

การกระเจิงแบบมีนำไปใช้อธิบายการกระเจิงของแสงเมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคทรงกลมที่มีรัศมีของตัวกลางมากกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

3. ระบบสี RGB



ภาพประกอบ 3 ระบบสี RGB

RGB คือระบบสีพื้นฐานที่ประกอบไปด้วยสีสามสี คือ สีแดง (R), สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) โดยทั้งสามสีนี้ถือเป็นแม่สีของแสง ที่สามารถบอกค่าสีของแสงแต่ละสีได้ทั้งหมด 256 ค่า (0 – 255) เมื่อนำแม่สีของแสงทั้งสามสีนี้มารวมกัน (R = 255, G = 255 และ B = 255) จะได้เป็น

แสงสีขาว แต่เมื่อค่า RGB ในแต่ละค่ามีค่าลดน้อยลง จนเป็น 0 ทั้งสามค่า แสงที่เปล่งออกมาจะมีสีดำ

4. สีที่ถูกดูดกลืนและสีที่มองเห็นของวัตถุ (absorbed-transmitted color feature)

เมื่อมีแสงขาวตกกระทบหรือส่องผ่านวัตถุหนึ่ง วัตถุอาจเกิดการดูดกลืนแสงบางส่วนหรือดูดกลืนแสงทั้งหมดหรืออาจไม่มีการดูดกลืนแสงเลย ถ้าหากวัตถุเหล่านั้นดูดกลืนแสงทั้งหมดจะทำให้มองเห็นวัตถุชิ้นนั้นเป็นสีดำ ในทางกลับกันหากวัตถุชิ้นนั้นไม่มีการดูดกลืนแสงเลยจะทำให้เห็นวัตถุชิ้นนั้นเป็นสีขาว แต่ถ้าดูดกลืนแสงบางส่วนจะเห็นสีที่ต่าง ๆ ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2 คือมีแสงสีขาวตกกระทบมาที่แมลง และแสงที่สะท้อนออกจากแมลงเข้าสู่ดวงตาของผู้สังเกตมีแค่คลื่นแสงสีแดงจึงทำให้ผู้สังเกตเห็นแมลงเป็นสีแดงได้ เป็นต้น

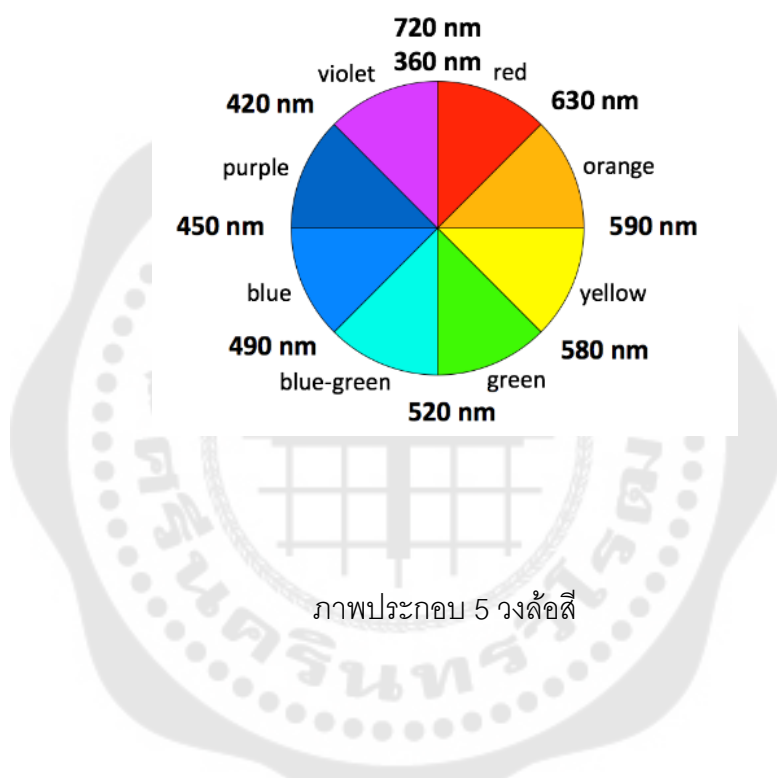


ภาพประกอบ 4 แสงที่ตกกระทบและแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุสีต่าง ๆ

ที่มา : ("Absorption Of Light By Object," 2018)

จากภาพประกอบที่ 4 จะเห็นได้ว่าแสงที่ตกกระทบลงบนวัตถุทั้ง 2 เป็นแสงสีขาว แต่การที่ผู้สังเกตมองเห็นวัตถุเป็นสีแดงได้นั้นเนื่องมาจากวัตถุมีความสามารถในการดูดกลืนแสงทุกช่วง ยกเว้นช่วงแสงสีแดงที่วัตถุไม่สามารถดูดกลืนได้ วัตถุจึงปล่อยสีแดงสะท้อนออกมาจากวัตถุจึงทำให้ผู้สังเกตมองเห็นวัตถุเป็นสีแดง หรือการที่เรามองเห็นวัตถุเป็นสีเขียวเนื่องมาจากมีแต่แสงช่วงสี

เช็ยวที่สะท้อนเข้าตาของเรา ส่วนแสงสีอื่น ๆ นั้นถูกวัตถุดูดกลืน จากเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าวัตถุสีต่าง ๆ ที่มีแสงขาวตกกระทบนั้นจะมีแสงสีบางช่วงที่ถูกดูดกลืนไปและปล่อยให้แสงบางช่วงสะท้อนออกมา หลักในการพิจารณาของวัตถุสีต่าง ๆ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีใดนั้นสามารถใช้วงล้อสีดังแสดงในภาพประกอบ 5 มาใช้ในการอธิบายการดูดกลืนแสงของวัตถุสีต่าง ๆ



ที่มา : ("Color wheel wavelengths," 2018)

ดังนั้นจากภาพประกอบ 8 สามารถนำมาระบุถึงความสามารถของวัตถุสีต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงสีที่เราสามารถมองเห็นได้ตามตารางที่ 1

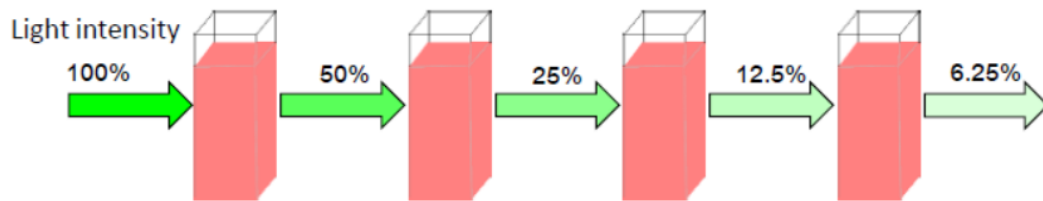
ตาราง 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของวัตถุที่มองเห็น

| สีที่มองเห็น | สีที่ถูกดูดกลืน |
|---------------|-----------------|
| เขียว-เหลือง | ม่วง |
| เหลือง | ม่วง-ฟ้า |
| ส้ม | น้ำเงิน |
| แดง | เขียว-น้ำเงิน |
| ม่วง | เขียว-เหลือง |
| ม่วง-น้ำเงิน | เหลือง |
| น้ำเงิน | ส้ม |
| เขียว-น้ำเงิน | แดง |

ที่มา : (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อัจฉริยะ, 2561)

5. กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

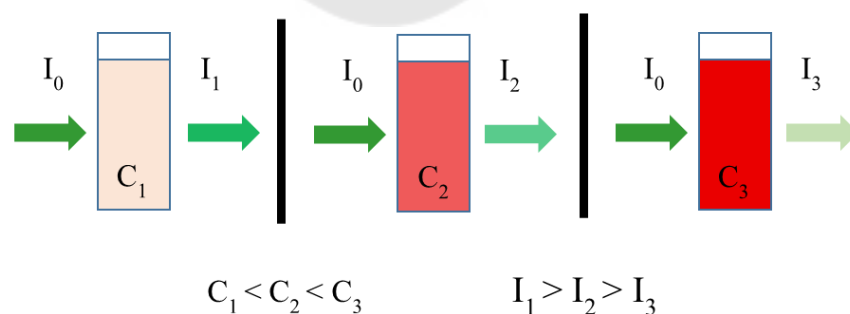
กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อัจฉริยะ, 2561) คือกฎที่สามารถนำมาใช้อธิบายถึงความสามารถของแสงที่มาสามารถการส่องผ่านสารละลายสีต่างๆ หรืออธิบายถึงความสามารถของสารละลายสีต่างๆ ที่ดูดกลืนแสงสีต่างๆ ไปได้โดยกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) อธิบายได้ว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูก แต่ระดับของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”



ภาพประกอบ 6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อแสงเคลื่อนผ่านสารละลายที่ชั้นต่าง ๆ

จากภาพประกอบ 6 สามารถยกตัวอย่างการอธิบายได้ว่าเมื่อแสงเดินทางผ่านสารละลายในแต่ละชั้น จะถูกโมเลกุลของสารละลายของแต่ละชั้นนั้น ๆ ดูดกลืนแสงไป 50% ของแสงที่มาตกกระทบเสมอ และหากเปลี่ยนชนิดของสารละลายหรือแสงที่มาตกกระทบ อัตราการดูดกลืนในแต่ละชั้นก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่ในการดูดกลืนที่แต่ละชั้นจะมีค่าการดูดกลืนที่เท่า ๆ กัน

กฎของเบียร์ (Beer's law) อธิบายไว้ว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”



ภาพประกอบ 7 รูปแสดงการเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารละลายที่ความเข้มข้นต่างกัน

จากภาพประกอบ 7 ถ้าสารละลายชนิดเดียวกันความเข้มข้นต่างกัน โดยสารละลาย C_2 มีค่าความเข้มข้นมากกว่าสารละลาย C_1 เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านสารละลาย C_2 แสงที่ส่องผ่านออกมาจะมีค่าความเข้มแสงน้อยกว่าตอนที่แสงเคลื่อนที่ผ่านสารละลาย C_1 เนื่องจากสารละลายที่มีค่าความเข้มข้นมากจะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้มากกว่า

หากรวมกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) เข้าด้วยกันจึงสามารถบอกได้ว่าการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นและความหนาของสารละลายที่แสงต้องเคลื่อนที่ผ่าน

โดยกำหนดให้ Transmittance (T) เป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ผ่านออกมา (I) ต่อปริมาณแสงที่ ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (I_0) เขียนสมการได้ว่า

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.1)$$

Absorbance (A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (2.2)$$

โดยทั่วไปจะรายงานค่า Transmittance เป็นเปอร์เซ็นต์ ($\%T$) และจะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการส่องผ่านและการดูดกลืนแสง ได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$A = 2 - \log \%T \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.11 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อแสงสามารถส่องผ่านได้ร้อยละ 100 นั่นคือสารละลายไม่มีการดูดกลืนแสงจึงได้ค่า $A=0$ หากแสงมีการส่องผ่านออกมาได้ร้อยละ 10 นั่นคือค่า $A=1$ และหากแสงสามารถส่องผ่านออกมาได้เพียงร้อยละ 1 นั่นคือมีค่าการดูดกลืนเป็น $A=2$ เป็นต้น

ในข้างต้นจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้งค่าความเข้มข้นและความหนาของสารละลาย จึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$A = \epsilon cl \quad (2.4)$$

เมื่อ

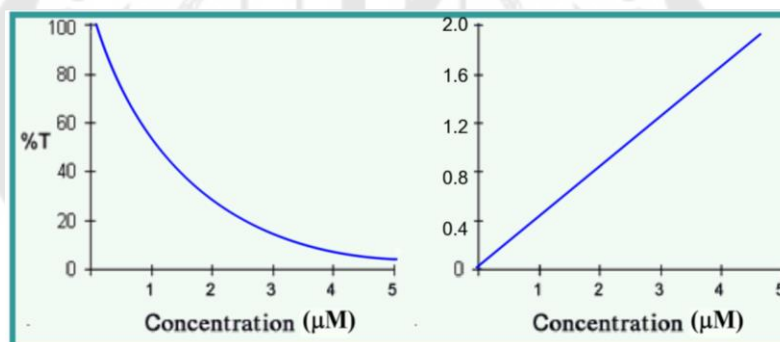
A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

ϵ คือ เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง เรียกว่า molar absorptivity ($\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$)

l คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์นั่นเอง (cm)

c คือ ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

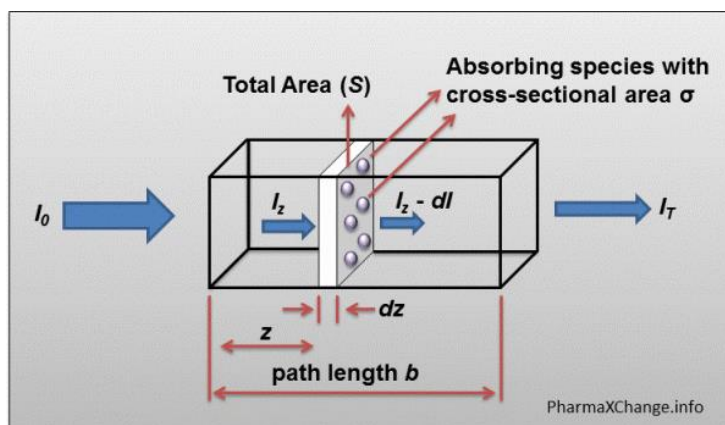
จากสมการที่ 2.12 สามารถบอกได้ว่า เมื่อค่าความเข้มข้นหรือความหนาของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกัน ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นหรือความหนาน้อยลง ค่าการดูดกลืนแสงก็จะมีค่าลดลงไปด้วย



ภาพประกอบ 8 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ %T และ absorbance

ที่มา : (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้, 2561)

6. Modern Derivation of the Beer-Lambert Law



ภาพประกอบ 9 แผนภาพแสดงแสงเชิงเดี่ยวเมื่อส่องผ่านสารละลาย ที่สอดคล้องตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต

ที่มา : Modern Derivation of the Beer-Lambert Law (Mehta, 2012)

การวัดค่าการส่องผ่านหรือการดูดกลืนแสงที่สอดคล้องกับกฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต อีกสมการหนึ่งที่ (Mehta, 2012) สามารถนำมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมื่อสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเข้มข้นและความหนาของสารละลาย พิจารณาเมื่อมีแสงที่มีความเข้ม I_0 เคลื่อนที่ทะลุผ่านสารละลายความหนา b เซนติเมตร และมีจำนวนโมเลกุลซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้จำนวน N โมเลกุลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเข้มแสงจะลดลงเหลือ I โดยแต่ละโมเลกุลในสารละลายสามารถดูดกลืนแสงไว้ได้ (Typical cross-sections) σ ตารางเซนติเมตรต่อโมเลกุล (Thani, Al-Ameri, และ Sultan, 2018) ดังแสดงในสมการ (2.5)

$$I = I_0 e^{-\sigma N b} \quad (2.5)$$

นำสมการ 2.5 เขียนให้อยู่ในรูปที่สอดคล้องกับสมการ 2.9 จะได้เป็น

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma Nb} \quad (2.6)$$

7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

7.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ณัฐวุฒิ เริงชั้น ได้ทำวิจัยเรื่อง การออกแบบ/สร้างต้นแบบเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่าย โดยใช้หลอดไฟ LED แบบ Multi-Color เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมี Photo transistor เป็นตัววัดค่าแสงที่ส่องผ่านมาจากสารละลาย โดยใช้ Microcontroller เป็นตัวแปลงค่าแสงที่อ่านได้จาก Photo transistor ไปแสดงผลที่หน้าจอ LCD ซึ่งเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่ายนี้มีขนาดที่กะทัดรัด สามารถพกพาไปทำการทดสอบในสถานที่ต่าง ๆ ที่นอกเหนือจากห้องทดลองได้ ในการทดสอบเบื้องต้นได้ใช้สีผสมอาหารสีแดง เหลือง และน้ำเงิน ไปทดสอบค่าการดูดกลืนแสง และได้ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของชุดทดลองนี้กับเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ผลการทดลองที่ได้ของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่ายนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่อง UV-VIS spectrophotometer นอกจากนี้ยังนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาปริมาณสารตัวอย่างในปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ หาปริมาณกรดยูริก หาปริมาณเหล็ก และหาปริมาณเอทานอล ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่าย ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้เครื่อง UV-VIS spectrophotometer จึงอาจบอกได้ว่าเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่าย นี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่อง UV-VIS spectrophotometer (ณัฐวุฒิ, 2557)

ศานติกร อำนวยผล ได้ทำการทดลองเรื่อง เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบพกพา สำหรับการประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์เชิงเคมี ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆจากหลอดไฟ LED ที่มีสีต่างกันที่ต่อกับเครื่อง Servo motor เพื่อใช้ในการเลือกช่วงสีของแสงที่ใช้ไปตกกระทบกับสารละลายตัวอย่าง ใช้ Phototransistor เป็นตัวตรวจจับแสงให้กับตัววัดค่าการดูดกลืนแสงแบบพกพา และได้ตรวจสอบความแม่นยำของอุปกรณ์กับเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ซึ่งผลการทดลองที่ได้ของชุดการทดลองแบบพกพานั้นให้ค่าใกล้เคียงกับค่าของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer (ศานติกร, 2558)

วิศรุต ศรีนวล และคณะ ได้ทำการทดลองเรื่อง การออกแบบและสร้างชุดทดสอบเพื่อหาค่าการส่งผ่านแสงของพอลิเอทิลีนในงานเกษตรกรรม คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบอุปกรณ์โดย

การใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นโคมไฟที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก ให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเคลื่อนที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงไปตกกระทบที่พอลิเอทิลีนทั้ง 4 ชนิด ที่แตกต่างกัน แล้วแสงบางส่วนที่ส่องผ่านออกมาได้จะมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวรับแสงอีกด้านหนึ่งที่ต่อกับเครื่องเครื่องวัดค่าความเข้มแสง และต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะเป็นตัวบันทึกและประมวลผลที่ได้ โดยได้ผลการทดลองเป็นดังนี้ พอลิเอทิลีนที่ต่างกันมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน และพอลิเอทิลีนที่มีขนาดต่างกัน (ในระดับไมโครเมตร) ก็จะทำให้ค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านออกมาที่แตกต่างกันด้วย (วิศรุต, ต้นติวรรานุรักษ์, ศรีบุญ, และ สุขประสงค์, 2560)

7.2 งานวิจัยในต่างประเทศ

David J.You และ Jeong YeolYoon ได้ทำการศึกษาเรื่อง Cell-phone-based measurement of TSH using Mie scatter optimized lateral flow assays คือได้คิดค้นการวัดปริมาณฮอร์โมน TSH โดยใช้หลักการการกระเจิงของแสงแบบมี (mie scattering) ซึ่งใช้มุมของแสงที่ส่องออกมากับ LFA และมุมของแสงที่ส่องออกมากับตัวที่เป็นตัววัดดังนี้ 45 และ 75 องศา, 60 และ 95 องศา, 65 และ 110 องศา โดยค้นพบว่ามุมที่ให้ค่าสัญญาณที่ชัดเจนที่สุดคือ 65 และ 110 องศา ซึ่งผลของการทดลองนี้สามารถวัดค่าฮอร์โมน TSH ที่ต่ำกว่า 0.4 mIU/L ได้คือ 0.31 mIU/L และที่ปริมาณฮอร์โมนมากกว่า 5 mIU/L นั้นสามารถวัดค่าออกมาได้ภายในระยะเวลา 5 นาทีเท่านั้น โดยชุดการวัดปริมาณฮอร์โมน TSH นี้ ได้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำและมีราคาถูก (You และคนอื่น ๆ, 2013)

Pei-Shih Liang, Tu San Park และ Jeong-Yeol Yoon ได้ทำการทดลองเรื่อง Rapid and reagentless detection of microbial contamination within meat utilizing a smartphone-based biosensor คือใช้เซนเซอร์จากโทรศัพท์สมาร์ทโฟนตรวจจับเชื้อจุลินทรีย์บนเนื้อวัวที่ไม่ใส่สารกันบูดเพื่อนำไปสู่การคัดกรองหาสารปนเปื้อนในเบื้องต้น โดยใช้สารละลายเชื้อ Escherichia coli K12 ที่ความเข้มข้น $10 - 10^8$ CFU/mL ใส่ลงไปกับเนื้อวัวเพื่อทำให้เนื้อวัวมีการติดเชื้อ หลังจากนั้นจึงฉายแสงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของเนื้อวัว ที่ความยาวคลื่น 880 nm ซึ่งเป็นแสงจาก NIR LED ที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและไม่มีผลต่อสีของเนื้อวัว วัดค่ามุมของการกระเจิงของแสงโดยใช้เซนเซอร์การหมุน (gyro sensor) เพื่อวัดมุมต่างๆที่แสงได้กระเจิงออกไป และใช้กล้องจากโทรศัพท์มือถือถ่ายภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยวัดการกระเจิงของแสงที่มุม 15 30 45 และ 60 องศา ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่มุม 15 องศา ไม่เห็นความแตกต่างของแสงที่ความเข้มข้น $10 - 10^4$ CFU/mL แต่สามารถเห็นค่าความเข้มแสงเปลี่ยนไปที่ค่าความเข้มข้น 10^8

CFU/mL ที่มูม 30 องศา วัดได้ค่าเพิ่มขึ้นจนไปถึงที่ความเข้มข้น 10^3 CFU/mL แล้วค่าค่อยลดลง ที่มูม 45 องศา ให้ค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้น 10 CFU/mL และที่มูม 60 องศา ให้ค่าสูงสุดที่ความเข้มข้น 10^2 CFU/mL (Liang, Park, และ Yoon, 2014, August)

Alexey V. Markin, Natalia E. Markina และ Ingo Eilks ได้ทำการทดลองเรื่อง The application of laser pointers for demonstration experiments in nanotechnology lessons at secondary school level ผู้วิจัยได้ศึกษาการกระเจิงและการดูดกลืนแสงจากสารละลาย Nanoparticles ที่หลายรูปแบบและหลายขนาด โดยใช้แสงเลเซอร์สีต่างๆกัน ดังนี้ สารละลาย Nanoparticles ที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ SiO_2 ขนาด 100 nm เป็นสารละลายอ้างอิง silver nanospheres ขนาด 70 nm, silver nanocubes ขนาด 60 nm, gold nanospheres ขนาด 30 nm, gold nanorods ขนาด 60 nm และ gold nanocages ขนาด 60 nm เป็นสารละลายตัวอย่าง และแสงเลเซอร์ที่นำมาใช้ทดสอบได้แก่ แสงเลเซอร์สีแดง ขนาด 650 nm, แสงเลเซอร์สีเขียว ขนาด 530 nm และแสงเลเซอร์สีน้ำเงิน ขนาด 405 nm การทดลองนี้ผู้วิจัยมีความต้องการที่จะนำไปเป็นชุดการทดลองหรือชุดสาธิตให้กับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่มีความสนใจเรื่อง Nanoaprticle ที่มีความจำเพาะต่อการกระเจิงและการดูดกลืนแสง โดยใช้แสงเลเซอร์สีต่างๆ ส่งไปที่สารละลายชนิดต่างๆแล้วใช้ตาเปล่าสังเกตลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านสารละลายก็จะพบว่าลำแสงเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านสารละลายต่างกันจะมีลำแสงที่ต่างกัน โดยใช้การสังเกตลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านสารละลายต่างๆเทียบกับสารละลายอ้างอิง เพื่อดูว่าสารละลายต่างๆเหล่านั้นมีการดูดกลืนหรือกระเจิงที่แสงในช่วงความยาวคลื่นใดบ้าง (Markin, Markina, และ Eilks, 2017, March)

Lon A. Porter, Jr. และคณะ ได้ทำการทดลองเรื่อง User-Friendly 3D Printed Colorimeter Models for Student Exploration of Instrument Design and Performance เป็นการออกแบบและสร้างชุดการทดลองเกี่ยวกับเครื่องมือการวัดสีที่มีความสามารถคล้ายๆกับเครื่อง spectrophotometer ที่มีราคาถูก โดยการใช้โปรแกรมในการออกแบบอุปกรณ์แบบ 3 มิติร่วมกับเครื่องปริ้นต์ 3 มิติ โดยชุดการทดลองนี้สามารถเอาไปใช้เป็นสื่อการสอนได้ตั้งแต่ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจนถึงระดับปริญญาตรี ทั้งนี้คณะผู้ทดลองได้ออกแบบอุปกรณ์ไว้ 2 ชนิดตามบรรจุกฎที่ใส่ใส่สารตัวอย่างคือ cuvette ขนาด 2, 3, 10, 20, 30 และ 50 มิลลิเมตรและหลอดทดลองขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว แล้วจึงทำการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์นี้กับเครื่อง spectrophotometer และ Cds photocell detector โดยใช้สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างกัน และความยาวของแสงที่ผ่านสารตัวอย่างที่ต่างกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่มีราคาแพง (Jr, Washer, Hakim, และ Dallinger, 2016, April)

Thomas S. Kuntzleman และ Erik C. Jacobson ได้ทำการทดลองเรื่อง Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol คือสร้างชุดการทดลองอย่างง่ายที่สอดคล้องกับทฤษฎีของเบียร์ โดยการใช้โทรศัพท์มือถือเป็นตัววัดค่า RGB จากสารละลายที่มีแสงสีต่างๆส่องผ่านและนำไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงเพื่อบอกปริมาณค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ทราบค่า ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ทั่วไปในโรงเรียนระดับมัธยม และนักเรียนในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายสามารถทำความเข้าใจเรื่องการดูดกลืนแสงได้จากการทำการทดลองนี้ (Kuntzleman และ Jacobson, 2016)

Robin E. Sweeney, Elizabeth Budiman และ Jeong-Yeol Yoon ได้ทำการทดลองเรื่อง Mie scatter spectra-based device for instant, contact-free, and specific diagnosis of bacterial skin infection คือได้คิดวิธีที่จะตรวจสอบการติดเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆบนผิวหนังต่างๆโดยใช้ความรู้เรื่องการกระเจิงของแสงแบบมี (mie scattering) โดยแบคทีเรียต่างชนิดกันจะเกิดการกระเจิงแสงได้แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดด้วยกันคือ Escherichia coli และ Staphylococcus aureus มีแหล่งกำเนิดแสงจากหลอด LED ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ที่มีมุมตกกระทบ 5 มุมต่าง ๆ คือ 90, 100, 110, 120, และ 135 องศา และใช้ photodiodes เป็นตัวรับค่าการกระเจิงของแสงที่มุมต่าง ๆ 8 มุมคือ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศา ในการทดลองนั้นจะทดลองบนผิว 3 ชนิดด้วยกันคือ วัฒนธรรมเลี้ยงเชื้อ LB, ผิวหนังของมนุษย์ และผิวหนังของสุกร ผลการทดลองพบว่า ใช้แสงตกกระทบที่มุม 110 องศาจะเห็นผลการกระเจิงที่ชัดเจนที่สุด สำหรับเชื้อแบคทีเรียที่ต่างกันนั้นจะเกิดผลการกระเจิงแสงแบบมีที่ต่างออกไปด้วย (Sweeney และคนอื่น ๆ, 2017, July)

Mohammed Than, Salam al-amri และ Muntadhar Sultan ได้ทำการทดลองเรื่อง Spectrophotometric Determination of Ponceau 4 R in the Several Beverages Using Mixed Micelles after Cloud Point Extraction คือทำการวิเคราะห์ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้งหาค่าการดูดกลืนแสงของ Ponceau 4R ที่มีอยู่ในสีผสมอาหารสีแดงซึ่งสามารถนำไปเป็นส่วนผสมในเครื่องดื่มและอาหารต่าง ๆ จากผลการทดลองที่หลากหลายวิธีสามารถได้ค่า Molar absorptivity ที่แสงความยาวคลื่น 507 nm อยู่ในช่วง $17 \times 10^4 - 24 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Thani และคนอื่น ๆ, 2018)

Malvern Instruments ได้ทำการทดลองเรื่อง Particle size analysis of calcium carbonates by laser diffraction คือวัดขนาดอนุภาคของ calcium carbonate โดยใช้วิธีการวัด

ค่าการกระเจิงแสงจากแสงเลเซอร์ จากผลการทดลองบ่งชี้ได้ว่าขนาดอนุภาคของ calcium carbonate โดยมากมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 – 100 ไมโครเมตร (Malvern, 2015) รวมทั้งบริษัท Sigma-Aldrich ได้ระบุขนาดอนุภาคของ calcium carbonate ได้ว่ามีขนาดน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร (Sigma, 2020)



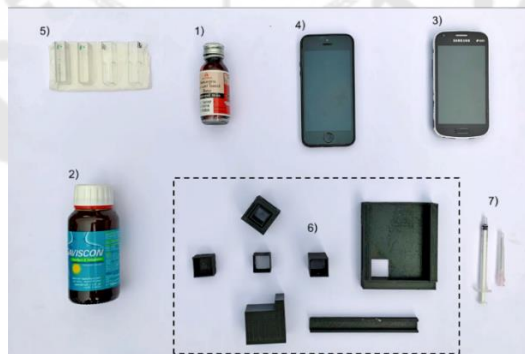
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น งานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ผู้วิจัยได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชุดการทดลองที่นำเอาสมาร์ตโฟนมาใช้แทนอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ เพื่อทำการศึกษาค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นและความหนาเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต และศึกษาการกระเจิงแสงเมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น จากเอกสาร บทความ งานวิจัยต่าง ๆ รวมทั้งศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างชิ้นงานโดยการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและสร้างชุดการทดลองที่สอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต และการกระเจิงแสง

2. สร้างการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง

2.1 วัสดุอุปกรณ์



ภาพประกอบ 10 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายสีผสมอาหารสีแดง ยี่ห้อ BEST ORDER โดยสารที่ให้สีแดงในสีผสมอาหารยี่ห้อนี้ที่นำมาใช้ในการคำนวณได้แก่ Ponceau 4R และ Carmoisine ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_{36}O_4$ และ $C_{20}H_{12}N_2Na_2C_7S_2$

2. ยาบรเทากรดไหลย้อนยี่ห้อกาวิสคอน
3. สมาร์ทโฟนสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ยี่ห้อ SAMSUNG S Duos GT-S7562 โดยใช้หน้าจอเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีต่าง ๆ เช่น แสงสีแดง เขียว น้ำเงิน และขาว จากการตั้งค่ารหัสค่าสี RGB จากแอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนต่อไป
4. สมาร์ทโฟนสำหรับใช้เป็นตัวรับแสง ยี่ห้อ Iphone 6S โดยใช้แอปพลิเคชัน ColorAssist วัดค่าความแสงโดยการอ่านค่า RGB
5. ทีวีสำหรับใส่สารละลาย สำหรับการศึกษาการส่องผ่านของแสงโดยใช้ทีวีชนิดพลาสติก และการศึกษาการกระเจิงของแสงโดยใช้ทีวีชนิดแก้ว
6. ชุดอุปกรณ์ที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ
7. หลอดฉีดยาขนาด 1 ml สำหรับหยดสารละลาย
8. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยก่อนเริ่มพิมพ์ชิ้นงานผู้ใช้งานจำเป็นต้องตรวจสอบความลาดเอียงของฐานรองในเครื่องพิมพ์ 3 มิติก่อนเพื่อให้ได้รูปชิ้นงานที่สมบูรณ์แบบในการพิมพ์ชิ้นงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เครื่องจะพิมพ์ฐานรองชิ้นงาน 1 ชั้น ก่อนการพิมพ์ชิ้นงานจริงเพื่อความสะดวกในการนำชิ้นงานออกจากฐานรองของเครื่อง การพิมพ์ชิ้นงานเครื่องพิมพ์จะฉีดเส้นใยออกเป็นชั้น ๆ จนได้รูปชิ้นงานตามทีออกแบบจากโปรแกรม Autodesk 123D Design
9. เส้นพลาสติกสำหรับพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Poly Lactic Acid (PLA) สีดำใช้ร่วมกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับสร้างชุดอุปกรณ์



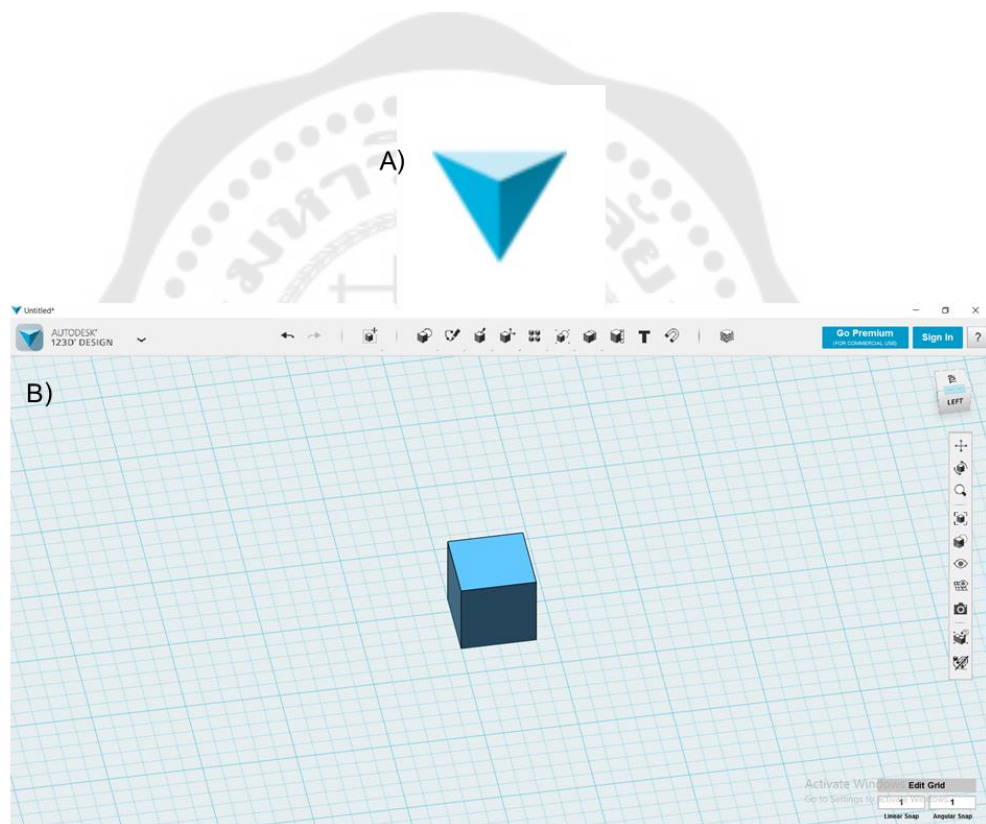
ภาพประกอบ 11 เส้นใย PLA สีดำ

ที่มา : ("เส้นใย PLA สีดำสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ," 2018)

10. โปรแกรมในเครื่องคอมพิวเตอร์

10.1 Autodesk 123D Design

โปรแกรม Autodesk 123D Design (ภาพประกอบ 12) โดย Autodesk สามารถ download ได้จาก <https://autodesk-123d-design.en.lo4d.com/windows> เป็นโปรแกรมสำหรับวาดและออกแบบ 3 มิติ โดยสามารถเลือกรูปทรงและปรับขนาดของชิ้นงานได้จากแถบเครื่องมือทางด้านบน เมื่อออกแบบชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์แล้วจึง export ไฟล์ที่ออกแบบเป็นไฟล์นามสกุล STL เพื่อใช้ในการสร้างชิ้นงานร่วมกับโปรแกรม cura และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

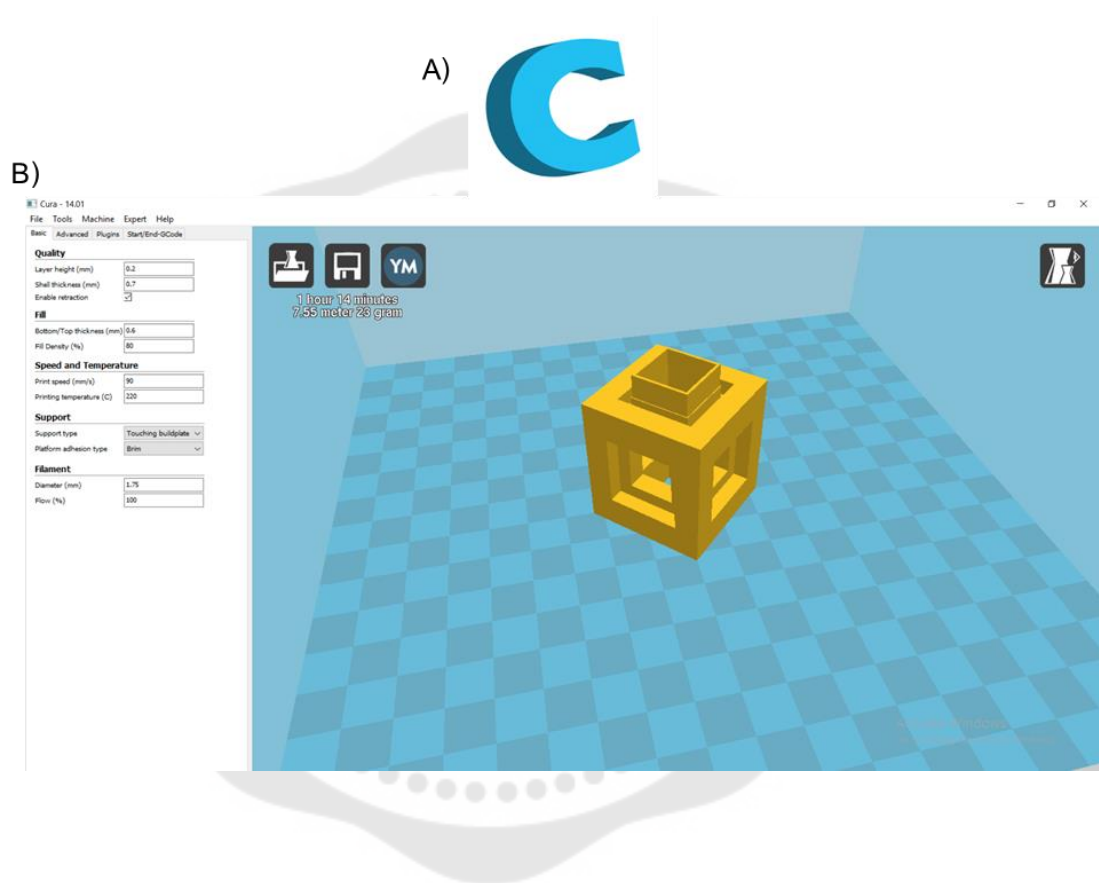


ภาพประกอบ 12 สัญลักษณ์โปรแกรม Autodesk 123D Design (A) และภาพขณะเปิดใช้งาน (B)

10.2 Ultimaker Cura

โปรแกรม Ultimaker Cura (ภาพประกอบ 13) ผลิตโดย David Braam สามารถ download ได้จาก <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการตั้ง

ค่ารายละเอียดต่าง ๆ ของการพิมพ์กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เช่น ความหนาแน่นของเส้นใย อัตราเร็วในการพิมพ์ ซัพพอร์ตชิ้นงาน เป็นต้น เมื่อตั้งค่ารายละเอียดการพิมพ์แล้วโปรแกรมสามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ตามการตั้งค่าของชิ้นงานนั้น ๆ เมื่อตั้งค่ารายละเอียดการพิมพ์เสร็จแล้วแปลงนามสกุลไฟล์เป็น gcode เพื่อนำคำสั่งรายละเอียดการพิมพ์ไปใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติจนได้รูปชิ้นงานตรงตามการออกแบบจากโปรแกรม Autodesk 123D Design



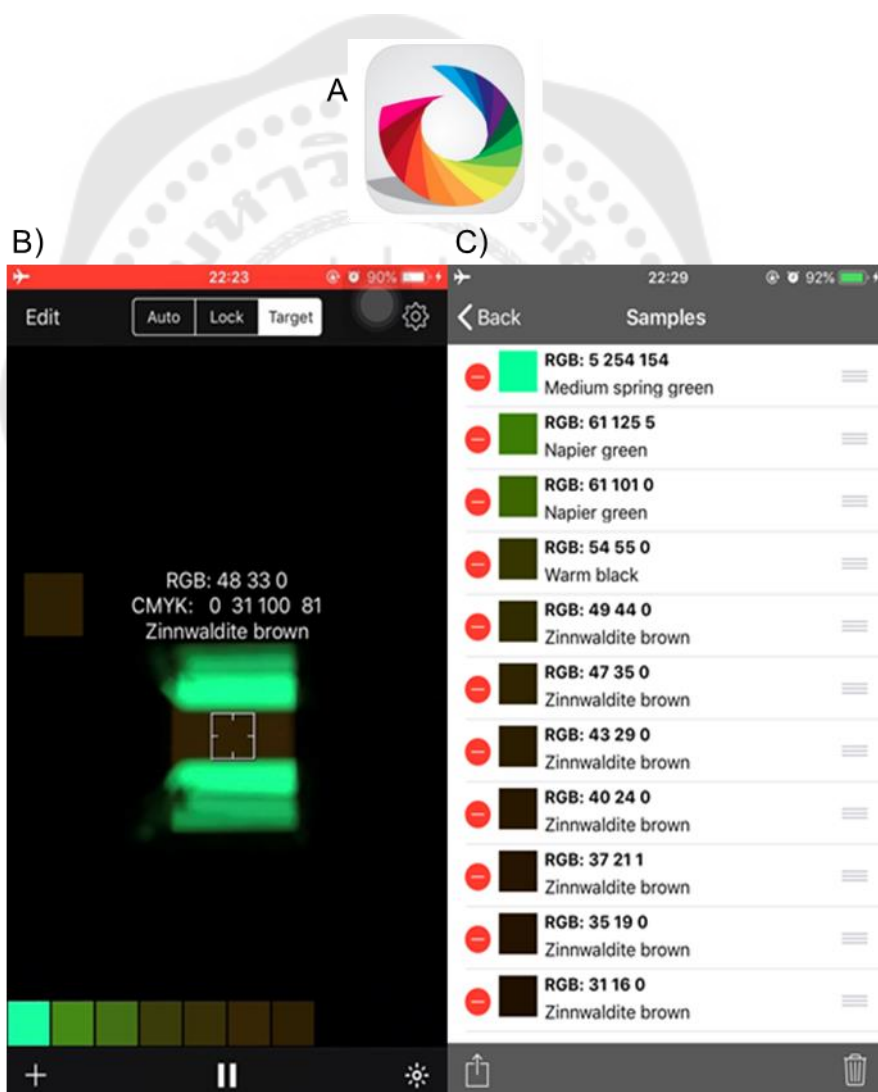
ภาพประกอบ 13 สัญลักษณ์โปรแกรม Ultimaker Cura (A) และภาพขณะเปิดใช้งาน (B)

11. แอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟน

11.1 ColorAssist

แอปพลิเคชัน ColorAssist (ภาพประกอบ 14) ผลิตโดย FT Labs, Inc. สามารถ download ได้จาก App store <https://apps.apple.com/us/app/colorassist-lite/id495034867> เป็นโปรแกรมที่ทำงานร่วมกับกล้องในสมาร์ทโฟนสำหรับแสดงค่าสีของภาพที่จับได้จาก โดยมีขอบเขตในการอ่านค่าสีเป็นกรอบสี่เหลี่ยม ซึ่งกรอบสี่เหลี่ยมนี้สามารถเลื่อนได้อย่างอิสระตาม

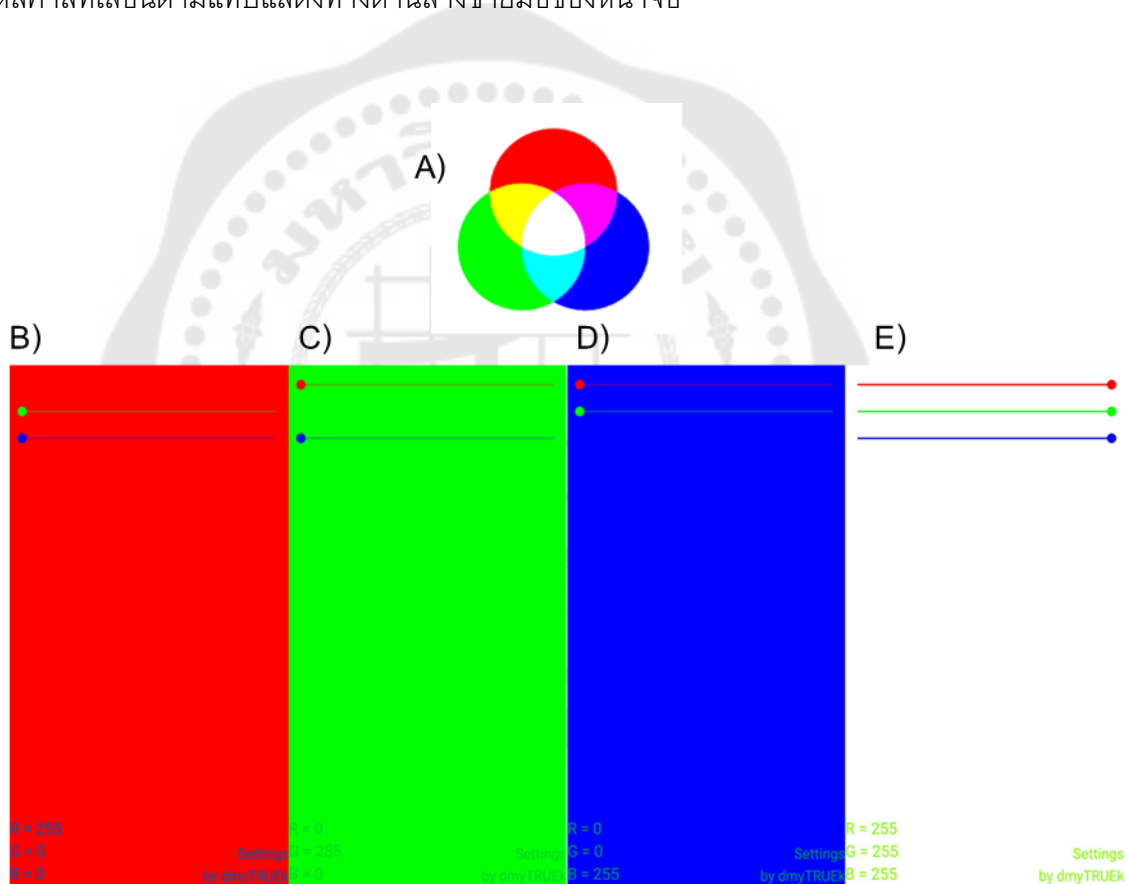
ตำแหน่งสีที่ต้องการวัดค่าสี โดยบอกชื่อของสีนั้น ๆ พร้อมทั้งแสดงค่าสีของภาพที่ได้เป็นค่า RGB, RYB, HSL and CMYK รหัสสี HTML เมื่อเปิดโปรแกรมแล้ว กล้องของสมาร์ทโฟนจะทำงานแสดงภาพที่กล้องจับได้ที่หน้าจอ เลือกขอบเขตของภาพที่ต้องนำมาหาค่าสี โปรแกรมจะแสดงค่าสีที่อ่านได้จากภาพได้หลากหลายรูปแบบ โดยผู้วิจัยได้เลือกให้โปรแกรมแสดงค่า RGB จากนั้นให้กดบันทึกค่าสีที่ได้จากสัญลักษณ์รูปเครื่องหมาย + ทางด้านล่างซ้าย โดยแอปพลิเคชันนี้สามารถบันทึกค่าสีได้ 20 ค่า สามารถดูค่าสีที่โปรแกรมบันทึกได้โดยกดที่สัญลักษณ์ หลอดไฟสว่างทางด้านล่างขวามือดังแสดงในรูปประกอบ 20 B ค่าสีที่โปรแกรมบันทึกได้แสดงดังภาพประกอบ 20 C



ภาพประกอบ 14 สัญลักษณ์โปรแกรม ColorAssist (A) ภาพขณะเปิดใช้งานแอปพลิเคชัน (B) และค่าสีที่บันทึกได้ (C)

11.2 RGB – Colors mixer

แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer (ภาพประกอบ 15) ผลิตโดย dmyTRUEk สามารถ download ได้จาก Play store เป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างภาพพื้นหลังเป็นสีต่าง ๆ ตามการตั้งค่า RGB ในโปรแกรม ผู้วิจัยได้ใช้แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer ร่วมกับหน้าจอสมาร์ตโฟนทดแทนแหล่งกำเนิดแสง ภาพประกอบ 21 A แสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรม และภาพประกอบ 21 B - E แสดงภาพพื้นหลังสี แดง เขียว น้ำเงิน และขาว ที่ได้จากการตั้งค่า RGB การกำหนดค่าสี RGB สามารถทำได้โดยการเลื่อนแถบค่าสีของค่า R ค่า G และค่า B ที่ด้านบนของหน้าจอได้ และรหัสค่าสีที่เลื่อนตามแถบแสดงทางด้านล่างซ้ายมือของหน้าจอ



ภาพประกอบ 15 สัญลักษณ์แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer (A) ภาพพื้นหลังหน้าจอสีแดง (B) สีเขียว (C) สีน้ำเงิน (D) และสีขาว (E)

2.2 วิธีการทดลองการวัดการส่องผ่านแสง

การทดลองการวัดการส่องผ่านของแสงสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือการทดลองการวัดการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และการทดลองการวัดการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น

ตอนที่ 1 การวัดการส่องผ่านแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

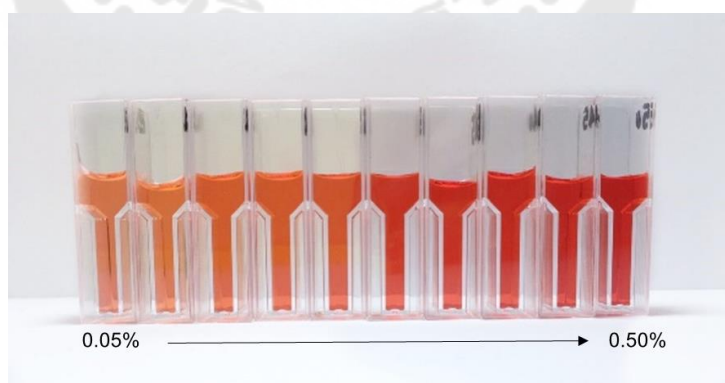
1. ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

1.1 เตรียมสารละลายสีผสมอาหารความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร

1.2 ลดความเข้มข้นของสารละลายให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 % โดยปริมาตร

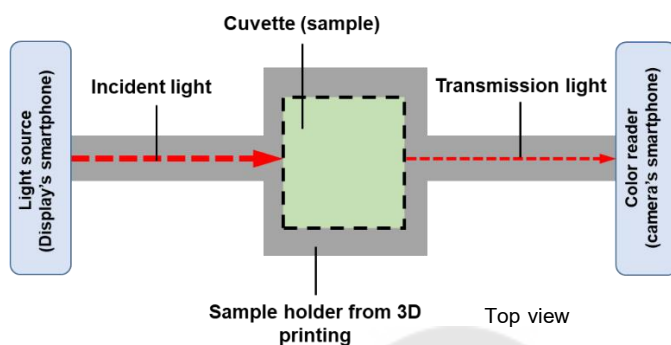
1.3 เปลี่ยนหน่วยของความเข้มข้นจากร้อยละโดยปริมาตรเป็น จำนวนโมเลกุลต่อลิตรของสารที่ดูดกลืนแสงลูบาศก์เซนติเมตร โดยสารที่ให้สีแดงในสีผสมอาหารยี่ห้อ Best order ที่นำมาใช้ในการคำนวณได้แก่ Ponceau 4R และ Carmoisine ซึ่งในสารละลายสีผสมอาหารสีแดงที่มีความเข้มข้นจำนวน 0.5 % โดยปริมาตรมีจำนวนโมเลกุลของ Ponceau 4R และ Carmoisine จำนวน 3.865×10^{17} โมเลกุลต่อลูบาศก์เซนติเมตร

โดยสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 % โดยปริมาตรแสดงไว้ในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 สารละลายสีผสมอาหารเจือจางสีแดงที่มีความเข้มข้น 0.05 % - 0.5 % โดยปริมาตร

2. ขั้นตอนการทดลอง



ภาพประกอบ 17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร
เมื่อมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

2.1 จัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยให้กล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ปิดช่องทางแสงทางด้านข้างทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกบริเวณดังแสดงในภาพประกอบ 17

2.2 ใช้แอปพลิเคชัน RGB - Colors mixer จากสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับตั้งค่าให้หน้าจอแสงแสดงสีต่างๆตามค่า RGB สีแดง R = 255, G = 0, B = 0 สีเขียว R = 0, G = 255, B = 0 สีน้ำเงิน R = 0, G = 0, B = 255 และสีขาว R = 255, G = 255, B = 255

2.3 เปิดแอปพลิเคชัน ColorAssist จากสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง

2.4 นำคิวเวทท์ที่ใส่น้ำเปล่าไว้มาทำการวัดการส่องผ่านแสงโดยเริ่มต้นใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีแดงก่อน ทำการบันทึกค่าแสงที่ส่องผ่านโดยกล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist บันทึกค่าแสงสีแดง (ค่า R) เท่านั้น และกำหนดให้ค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านน้ำเปล่าเป็นค่า I_0

2.5 เปลี่ยนจากน้ำเปล่าเป็นสารละลายสีแดงความเข้มข้น 0.05% โดยปริมาตรทำการบันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเป็นค่า I ของความเข้มข้น 0.05%

2.6 ทำซ้ำข้อ 3.5 โดยเปลี่ยนสารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อย ๆ จนครบทั้ง 10 ความเข้มข้น และทำซ้ำทั้งหมด 3 รอบ โดยเริ่มตั้งแต่ข้อ 2.4 เป็นต้นไป

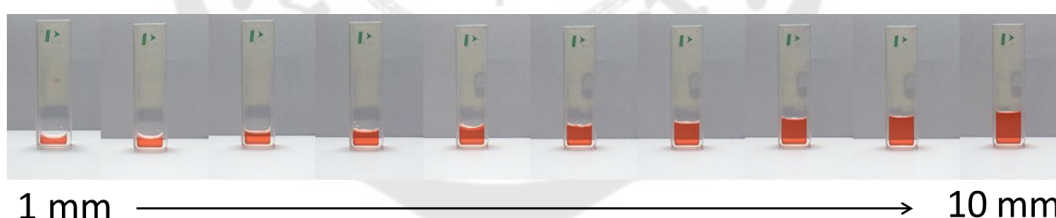
2.7 เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 10 ความเข้มข้นแล้วให้ทำซ้ำข้อ 2.4 โดยเปลี่ยนสีของแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงเขียว น้ำเงิน และขาว ตามลำดับ การทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเขียว ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีเขียว (ค่า G) หรือใช้แสงเป็นแสงสีน้ำเงิน ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีน้ำเงิน (ค่า B) ส่วนการใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีขาว ให้บันทึกค่า RGB ทั้งสามค่า

ตอนที่ 2 การวัดค่าการส่องผ่านแสงเมื่อสารมีความหนาเพิ่มขึ้น

1. ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

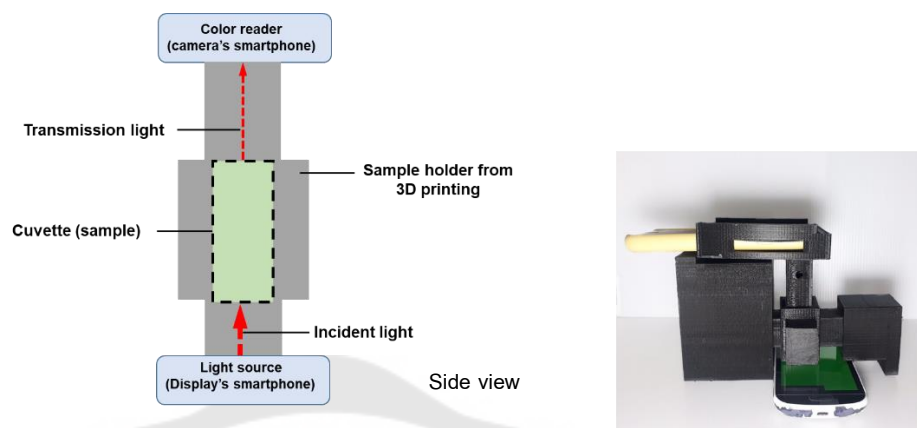
1.1 นำสารละลายสีผสมอาหารสีแดง ความเข้มข้น 0.30% โดยปริมาตรเทลงไปในปิ๊กเกอร์ที่เตรียมไว้

1.2 เตรียมสารละลายที่มีความหนา 1 mm โดยใช้หลอดฉีดยาขนาด 1 ml ดูดสารละลายจากในปิ๊กเกอร์จำนวน 0.1 ml ฉีดลงไปในคิวเวทต์ ดูดสารละลายจากในปิ๊กเกอร์จำนวน 0.1 ml สำหรับการเพิ่มความหนาของสารละลายจำนวน 1 mm โดยสารละลายที่ได้มีความหนา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 mm แสดงในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 สารละลายสีผสมอาหารสีแดงความเข้มข้น 0.30% โดยปริมาตร ความหนาตั้งแต่ 1 – 10 mm

2. ขั้นตอนการทดลอง



ภาพประกอบ 19 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหาร
เมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น

2.1 จัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยให้กล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ปิดช่องทางแสงทางด้านข้างทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกบริเวณดังแสดงในภาพประกอบ 19

2.2 ใช้แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer จากสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับตั้งค่าให้หน้าจอแสงแสดงสีต่างๆตามค่า RGB สีแดง R = 255, G = 0, B = 0 สีเขียว R = 0, G = 255, B = 0 สีน้ำเงิน R = 0, G = 0, B = 255 และสีขาว R = 255, G = 255, B = 255

2.3 เปิดแอปพลิเคชัน ColorAssist จากสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง

2.4 นำคิวเวทท์ที่ใส่น้ำเปล่าไว้มาทำการวัดการส่องผ่านแสงและปิดช่องแสงทางด้านบนเพื่อป้องกันแสงภายนอกบริเวณโดยเริ่มต้นใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีแดง ทำการบันทึกค่าแสงที่ส่องผ่านโดยกล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist บันทึกค่าแสงสีแดง (ค่า R) เท่านั้น และกำหนดให้ค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านน้ำเปล่าเป็นค่า I_0

2.5 เปลี่ยนจากน้ำเปล่าเป็นสารละลายสีแดงความหนา 1 mm ทำการบันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเป็นค่า I ของความหนา 1 mm

2.6 นำหลอดจีดียาคูดสารละลายมาจำนวน 0.1 ml แล้วจีดลงในคิวเวทท์ที่อยู่ในชุดทดลองผ่านรูทางด้านหน้าโดยไม่ต้องขยับอุปกรณ์ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความหนา 2 mm แล้วบันทึกค่าแสงที่ส่องผ่านเป็นค่า I ของความหนา 2 mm

2.7 ทำซ้ำข้อ 2.6 จนได้สารละลายครบทั้ง 10 ความหนาและทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยเริ่มตั้งแต่ข้อ 2.4 เป็นต้นไป

2.8 เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 10 ความหนาแล้วให้ทำซ้ำข้อ 2.4 โดยเปลี่ยนสีของแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงเขียว น้ำเงิน และขาว ตามลำดับ การทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเขียว ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีเขียว (ค่า G) หรือใช้แสงเป็นแสงสีน้ำเงิน ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีน้ำเงิน (ค่า B) ส่วนการใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีขาว ให้บันทึกค่า RGB ทั้งสามค่า

2.3 วิธีการทดลองการวัดการกระเจิงแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

1. ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

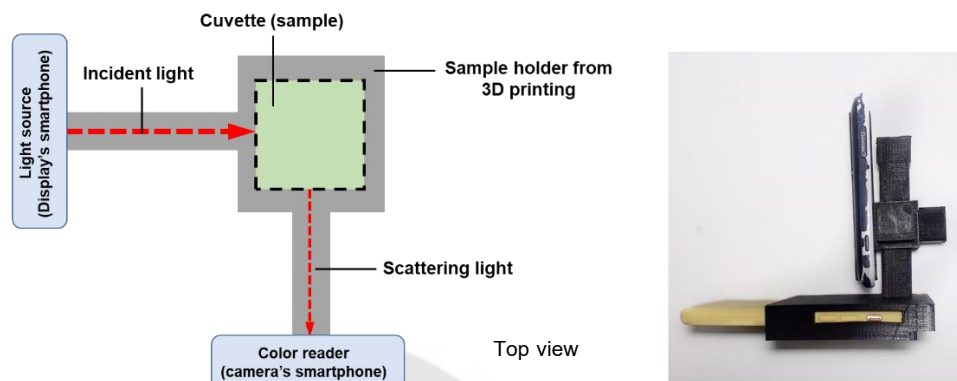
1.1 เตรียมสารละลายกาวิสคอนความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร

1.2 ลดความเข้มข้นของสารละลายจนได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10% แสดงในภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 สารละลายกาวิสคอนความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยปริมาตร

2. ขั้นตอนการทดลอง



ภาพประกอบ 21 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองการกระเจิงของแสงจากสารละลายกาวิสกอนที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

2.1 จัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยให้กล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงตั้งฉากกับสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ปิดช่องทางแสงทางด้านข้างทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกบริเวณดังแสดงในภาพประกอบ 21

2.2 ใช้แอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer จากสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับตั้งค่าให้หน้าจอแสงแสดงสีต่างๆตามค่า RGB สีแดง R = 255, G = 0, B = 0 สีเขียว R = 0, G = 255, B = 0 สีน้ำเงิน R = 0, G = 0, B = 255 และสีขาว R = 255, G = 255, B = 255

2.3 เปิดแอปพลิเคชัน ColorAssist จากสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง

2.4 นำคิวเวทท์ที่ใส่น้ำเปล่าไว้มาทำการวัดการส่องผ่านแสงและปิดช่องแสงทางด้านบนเพื่อป้องกันแสงภายนอกบริเวณโดยเริ่มต้นใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีแดง ทำการบันทึกค่าแสงที่ส่องผ่านโดยกล้องของสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist บันทึกค่าแสงสีแดง (ค่า R) เท่านั้น และกำหนดให้ค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านน้ำเปล่าเป็นค่า I_0

2.5 เปลี่ยนจากน้ำเปล่าเป็นสารละลายกาวิสกอนความเข้มข้น 2 % ทำการบันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเป็นค่า I ของความเข้มแสง 2 %

2.6 ทำซ้ำข้อ 3.5 โดยเปลี่ยนสารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อยๆจนครบทั้ง 5 ความเข้มข้น และทำซ้ำทั้งหมด 3 รอบ โดยเริ่มตั้งแต่ข้อ 3.4 เป็นต้นไป

2.7 เมื่อทำการทดลองครบทั้ง 5 ความเข้มข้นแล้วให้ทำซ้ำข้อ 2.4 โดยเปลี่ยนสีของแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงเขียว น้ำเงิน และขาว ตามลำดับ การทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเขียว ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีเขียว (ค่า G) หรือใช้แสงเป็นแสงสีน้ำเงิน ให้บันทึกค่า RGB ของแสงที่ส่องผ่านเฉพาะค่าของแสงสีน้ำเงิน (ค่า B) ส่วนการใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีขาว ให้บันทึกค่า RGB ทั้งสามค่า



บทที่ 4

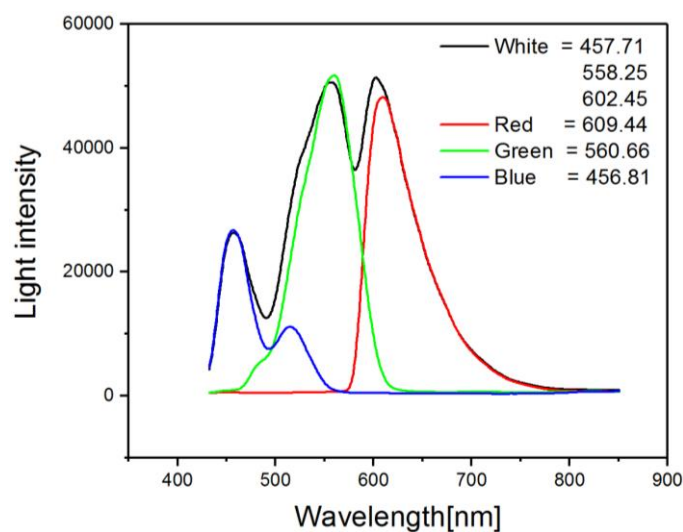
ผลการศึกษา

การทดลองนี้ได้ออกแบบและสร้างชุดการทดลองสำหรับวัดค่าการส่องผ่านและการกระเจิงแสงโดยใช้สมาร์ทโฟน 2 เครื่องเป็นแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง ออกแบบและสร้างชุดการทดลองโดยการพิมพ์ 3 มิติ ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองคือ การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น และวัดการกระเจิงของแสงที่มุม 90 องศาเมื่อสารละลายมีความขุ่นมากขึ้น โดยผู้วิจัยได้แสดงผลการวัดค่าและผลการทดลองตามหัวข้อดังนี้

1. การวัดค่าความเข้มแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟน
2. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น
3. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น
4. วัดการกระเจิงของแสงที่มุม 90 องศาเมื่อสารละลายมีความขุ่นมากขึ้น

1. การวัดค่าความเข้มแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟน

การวัดค่าความเข้มแสงของแสงสีต่าง ๆ จากหน้าจอสมาร์ทโฟนโดยเครื่อง Spectrophotometer (Ocean Optics, USB2000) เพื่อใช้ในการหาค่าความยาวคลื่นแสงที่มีความเข้มแสงที่มากที่สุดของแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน และขาว ที่ได้จากหน้าจอสมาร์ทโฟน SAMSUNG S Duos GT-S7562 โดยตั้งค่าแสงของหน้าจอสีต่าง ๆ จากแอปพลิเคชัน RGB – Colors mixer และมีค่า RGB ของแสงสีแดงเป็น 255, 0, 0 แสงสีเขียว 0, 255, 0 แสงสีน้ำเงิน 0, 0, 255 และแสงสีขาว 255, 255, 255 ผลการวัดค่าความเข้มแสงแต่ละสีดังแสงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 22 ความยาวคลื่นแสงจากหน้าจอสมาร์ทโฟน

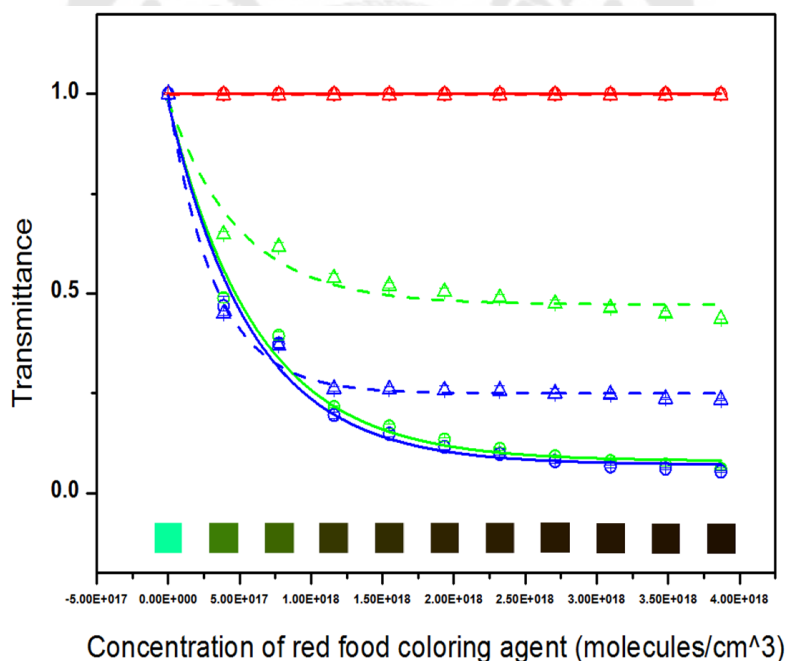
ผลของค่าความเข้มแสงที่มากที่สุดของแสงสีต่าง ๆ แสดงในภาพประกอบ 29 นั่นคือแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน มีความเข้มแสงที่มากที่สุดที่ความยาวคลื่น 609.44 nm, 560.66 nm และ 456.81 nm ตามลำดับ ในขณะที่แสงสีขาวให้ค่าความเข้มแสงที่มากที่สุดจำนวน 3 ค่าคือ 457.71 nm (ใกล้เคียงกับแสงสีน้ำเงิน), 558.25 nm (ใกล้เคียงกับแสงสีเขียว) และ 602.45 nm (ใกล้เคียงกับแสงสีแดง) สังเกตได้ว่าค่าความเข้มแสงของแสงสีขาวที่ได้มีค่าความเข้มแสงที่มากที่สุดจำนวน 3 ช่วง และแต่ละช่วงนั้นใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นที่มากที่สุดของแสงสีเดียว สาเหตุที่แสงสีขาวได้ค่าความเข้มแสงที่มากที่สุด 3 ช่วงและใกล้เคียงกับแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน เนื่องจากแสงสีขาวเกิดจากการผสมกันของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

จากกราฟผลของค่าความเข้มแสงของแสงสีต่าง ๆ ที่ได้จากหน้าจอสมาร์ทโฟน มีค่าความยาวคลื่นได้หลายค่า ซึ่งค่าที่อธิบายไปในข้างต้นเป็นเพียงแค่ว่าความยาวคลื่นที่มีความเข้มแสงมากที่สุด นั่นคือแสงที่ได้จากหน้าจอสมาร์ทโฟนนั้นไม่ใช่แสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว ในการทดลองครั้งนี้จึงใช้แสงสีต่าง ๆ จากหน้าจอสมาร์ทโฟนเปรียบเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว

2. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

การวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากสีผสมอาหารสีแดงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.05% - 0.50% โดยปริมาตร ความหนา 1.0 mm สามารถหาได้โดยใช้กล้องหลังของสมาร์ทโฟน Iphone 6S ร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist ซึ่งจะแสดงค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านจากสารละลายในรูปแบบค่า RGB นำค่า RGB ที่สมาร์ทโฟนวัดได้บันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง และนำไปคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสงจากสมการ 2.1 พร้อมทั้งคำนวณหาค่าเฉลี่ยและความคาดเคลื่อน

นำค่าเฉลี่ยของการส่องผ่านและค่าความคาดเคลื่อนที่คำนวณได้สร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกับค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาวยุ่จะได้กราฟผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 กราฟการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน (เส้นทึบ) และสีขาวยุ่ (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

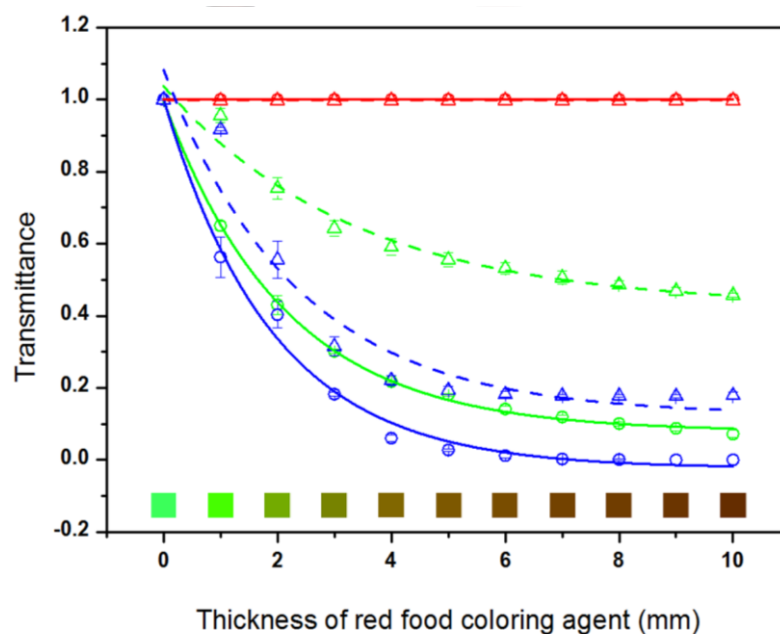
กราฟในภาพประกอบ 30 แสดงการส่องผ่านของแสงที่ผ่านสารละลายสีผสมอาหารสีแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงสีต่าง ๆ คือ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว พบว่าเมื่อสารละลายสีผสมอาหารสีแดงมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะมีค่าการส่องผ่านของแสงสีเขียวและแสงสีน้ำเงินลดลง แต่ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดงมีค่าเท่าเดิม นั่นคือสารละลายสีผสมอาหารสีแดงที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นนี้ไม่ดูดกลืนแสงสีแดง แต่จะสามารถดูดกลืนแสงสีเขียวและสีน้ำเงินได้ และจากกราฟผลการทดลองในภาพประกอบ 30 คำนวณได้ค่า Typical cross-sections ของแสงสีเขียวและแสงสีน้ำเงิน 1.62×10^{-18} และ $1.71 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{N}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.98438 และ 0.9844 ตามลำดับ และเมื่อใช้แสงสีขาว (เส้นประ) เปรียบเสมือนเป็นการใช้แสงครบทั้งสามสีในครั้งเดียวกัน ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับตอนที่ใช้แสงสีเขียว

จากผลการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหารสีแดงนั้น สารละลายสีผสมอาหารสีแดงมีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีเขียวและน้ำเงิน และจากค่า Typical cross-sections จะได้ว่าแสงสีน้ำเงินสามารถถูกสารละลายสีผสมอาหารสีแดงดูดกลืนแสงได้มากกว่าแสงสีเขียว และเมื่อใช้แสงสีขาวผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ สารละลายสีผสมอาหารสีแดงจะดูดกลืนแสงได้มากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีวงล้อสีและกฎของเบียร์

3. การวัดค่าการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น

การวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากสีผสมอาหารสีแดงเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 1 mm – 10 mm ความเข้มข้น 0.30% โดยปริมาตร สามารถหาได้โดยใช้กล้องหลังของสมาร์ทโฟน Iphone 6S ร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist ซึ่งจะแสดงค่าความเข้มแสงที่ส่องผ่านจากสารละลายในรูปแบบค่า RGB นำค่า RGB ที่สมาร์ทโฟนวัดได้บันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง และนำไปคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสงจากสมการ 2.1 พร้อมทั้งคำนวณหาค่าเฉลี่ยและความคาดเคลื่อน

นำค่าเฉลี่ยของการส่องผ่านและค่าความคาดเคลื่อนที่คำนวณได้ไปสร้างเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของสารละลายกับค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว จะได้กราฟผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 24 กราฟการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน (เส้นทึบ) และสีขาวย (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น

กราฟในภาพประกอบ 24 แสดงการส่องผ่านของแสงที่ส่องผ่านสารละลายสีผสมอาหารสีแดงความเข้มข้น 0.30% ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงสีต่าง ๆ คือ สีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน และสีขาวย พบว่าเมื่อสารละลายสีผสมอาหารสีแดงมีความหนาเพิ่มขึ้น จะมีค่าการส่องผ่านของแสงสีเขียวและแสงสีนํ้าเงินลดลง แต่ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดงมีค่าเท่าเดิม นั่นคือ สารละลายสีผสมอาหารสีแดงความเข้มข้น 0.30% ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นนี้ไม่ดูดกลืนแสงสีแดง แต่จะสามารถดูดกลืนแสงสีเขียวและสีนํ้าเงินได้ และจากกราฟผลการทดลองในภาพประกอบ 35 คำนวณได้ค่า Typical cross-sections ของแสงสีเขียวและแสงสีนํ้าเงิน เท่ากับ 2.02×10^{-18} และ $2.25 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{N}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99055 ตามลำดับ และเมื่อใช้แสงสีขาวย (เส้นประ) ที่ถือได้ว่าเป็นการใช้แสงครบทั้งสามสีในครั้งเดียวกัน ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับตอนที่ใช้แสงสีเขียว

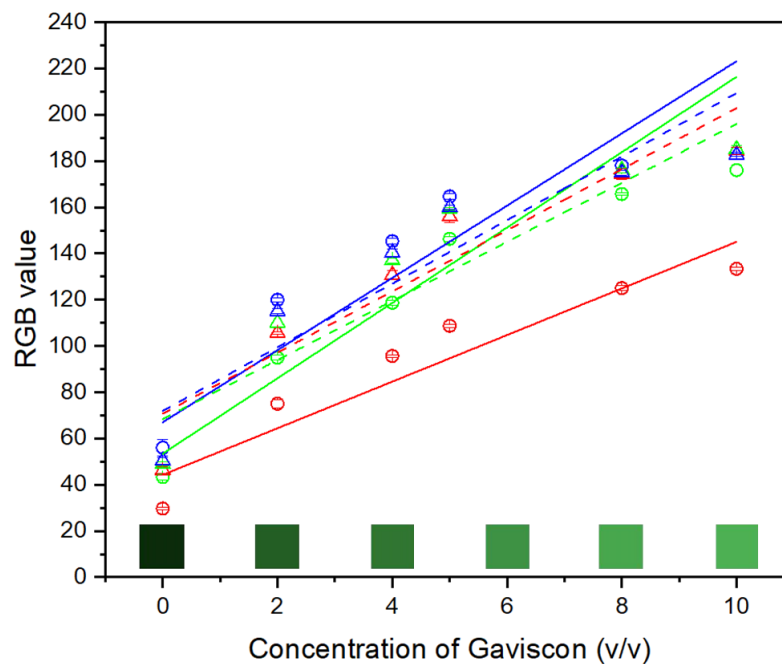
จากผลการทดลองการวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหารสีแดงที่มีความหนาเพิ่มขึ้นนั้น สารละลายสีผสมอาหารสีแดงมีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีเขียวและ

น้ำเงิน และจากค่า Typical cross-sections จะได้ว่าแสงสีน้ำเงินสามารถถูกสารละลายสีผสมอาหารสีแดงดูดกลืนแสงได้มากกว่าแสงสีเขียว และเมื่อใช้แสงสีขาวยผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้สารละลายสีผสมอาหารสีแดงจะดูดกลืนแสงได้มากขึ้นเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีวงล้อสีและกฎของแลมเบิร์ต

4. วัดการกระเจิงของแสงที่เมื่ออุปกรณ์วัดความเข้มแสงทำมุม 90 องศา กับแหล่งกำเนิดแสงจากสารละลายกวิสคอนที่มีความเข้มข้น (ความขุ่น) เพิ่มขึ้น

การวัดค่าการกระเจิงของแสงจากสารละลายกวิสคอนเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 % - 10 % โดยปริมาตร สามารถหาได้โดยใช้กล้องหลังของสมาร์ทโฟน Iphone 6S ร่วมกับแอปพลิเคชัน ColorAssist ซึ่งจะแสดงค่าความเข้มแสงที่กระเจิงออกมาที่มุม 90 องศา กับแหล่งกำเนิดแสงในรูปแบบค่า RGB นำค่า RGB ที่สมาร์ทโฟนวัดได้บันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง และนำไปคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสงจากสมการ 2.1 พร้อมทั้งคำนวณหา ค่าเฉลี่ยและความคาดเคลื่อน

นำค่าเฉลี่ยของแสงที่กระเจิงและความคาดเคลื่อนที่คำนวณได้ไปสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกวิสคอนกับค่าการกระเจิงของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาว จะได้กราฟผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 กราฟการกระเจิงของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน (เส้นทึบ) และสีขาวย (เส้นประ) พร้อมภาพแสงสีเขียวที่วัดได้เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

กราฟผลการทดลองในภาพประกอบ 32 แสดงการกระเจิงของแสงที่ผ่านสารละลายกาวิสกอนความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงสีต่าง ๆ คือ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีขาวย พบว่าเมื่อสารละลายกาวิสกอนมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การกระเจิงของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยแสงสีแดงวัดค่าการกระเจิงแสงได้น้อยที่สุด แสงสีน้ำเงินวัดค่าการกระเจิงแสงได้มากที่สุด ได้ค่า R^2 ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเท่ากับ 0.94399, 0.9687 และ 0.9279 ตามลำดับ และเมื่อใช้แสงสีขาวย (เส้นประ) เปรียบเสมือนเป็นการใช้แสงครบทั้งสามสีในครั้งเดียวกัน ได้ค่าแสงสีแดงมีความสามารถในการกระเจิงแสงน้อยที่สุด และแสงสีเขียวมีความสามารถในการกระเจิงแสงได้มากที่สุด

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่าแสงแต่ละสีนั้นมีความสามารถในการกระเจิงแสงจากสารละลายกาวิสกอนได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากความสามารถในการกระเจิงแสงมีค่าขึ้นอยู่กับค่า

ความยาวคลื่นและขนาดของอนุภาคที่เป็นตัวกลางทำให้แสงกระเจิง แสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันจะมีค่าการกระเจิงของแสงที่ไม่เท่ากัน



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

1. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างชุดการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของแสง คือ วัฏการส่องผ่านของแสงจากสารละลายสีผสมอาหารเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นและความหนาเพิ่มขึ้น และวัฏการกระเจิงของแสงจากสารละลายกาววิสคอนเมื่อสารละลายมีความเข้มข้น(ความขุ่น)มากขึ้น ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับบรรจุสารละลายและจัดวางสมาร์ตโฟนโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ นำสมาร์ตโฟนใช้งานร่วมกับการใช้แอปพลิเคชันเพื่อทดแทนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสงมาประยุกต์ใช้แทนอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่มีราคาแพง ผลการศึกษาที่ได้นั้นเป็นไปตามทฤษฎีวงล้อสีคือสีที่ถูกดูดกลืนจะเป็นสีที่อยู่ตรงข้ามกับสีของวัตถุหรือสารละลายในวงล้อ ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับกฎของเบียร์ คือแสงถูกดูดกลืนมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น และกฎของแลมเบิร์ต คือแสงถูกดูดกลืนมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความหนาเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสามารถนำมาวัดค่าการกระเจิงแสงจากสารละลายกาววิสคอนที่มีความเข้มข้น (ความขุ่น) เพิ่มขึ้นได้ เห็นได้ว่าชุดการทดลองนี้เป็นชุดการทดลองที่ติดตั้งได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่มีราคาแพง ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าชุดการทดลองเรื่องการส่องผ่านและการกระเจิงของแสงจะเป็นประโยชน์ต่อครูผู้สอน นักเรียน นักศึกษา หรือผู้ที่สนใจเรื่องการส่องผ่านและการกระเจิงของแสงได้

2. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์การทดลองอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดการทดลอง

1.1 สมาร์ตโฟนที่ใช้ทดแทนแหล่งกำเนิดแสง (SAMSUNG S Duos GT-S7562) มือสอง ราคา 1,000 บาท

1.2 สมาร์ตโฟนที่ใช้ทดแทนอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง (Iphone 6s) มือสอง ราคา 5,000 บาท

1.3 คิวเวทชนิดพลาสติกสำหรับบรรจุสารละลาย 100 ชิ้นราคา 850 บาท

1.4 คิวเวทชนิดแก้วสำหรับบรรจุสารละลาย 2 ชิ้นราคา 2,250. บาท

1.4 เส้นใย PLA สำหรับพิมพ์ 3 มิติ ราคา 750 บาท/ม้วน

1.5 ยาลดกรด กาวีสคอน 320 บาท/ขวด

1.6 สีสผสมอาหาร 20 บาท/ขวด

รวมค่าวัสดุอุปกรณ์สำหรับการออกแบบและสร้างชุดการทดลอง 10,190 บาท ซึ่ง
ค่าใช้จ่ายตามที่แสดงนี้ยังไม่รวมค่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

2. ข้อเสนอแนะของชุดการทดลอง

2.1 การออกแบบชุดการทดลองไม่สามารถใช้ขนาดที่วัดได้ตามจริง เนื่องจากในการพิมพ์
3 มิติมีการหดและขยายตัวของเส้นใยจึงทำให้ขนาดของชุดการทดลองไม่ได้ตามที่ต้องการ ผู้วิจัย
จึงต้องออกแบบและตั้งค่าการพิมพ์ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรงตามขนาดที่ต้องการ

2.2 .การทดลองแต่ละครั้งจำเป็นต้องตั้งค่าความสว่างของหน้าจอให้มีค่าความสว่างไม่
มากจนเกินไป เนื่องจากความสว่างของหน้าจอสมาร์ทโฟนที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่ามากเกินไป
จะส่งผลให้ความเข้มแสงที่ส่องผ่านสารละลายไม่มีค่าลดลง

2.3 ในการเลือกระยะห่างระหว่างสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงกับ
สารละลายต้องมีระยะที่พอดีสำหรับให้ช่องวัดค่าสีในแอปพลิเคชัน ColorAssist อยู่ในขอบเขตที่
เหมาะสม หากอยู่ไกลเกินไปอาจมีโอกาที่ขอบเขตในแอปพลิเคชัน ColorAssist วัดค่าสีอ่านค่าสี
ที่ไม่ต้องการได้

2.4 ในการตั้งค่ารูรับแสงของกล้องในสมาร์ทโฟนเป็นตัวรับภาพอาจทำได้ยาก ผู้วิจัยได้
นำสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงไปจับภาพของแสงสว่างจากหลอดไฟเพื่อให้ได้ค่ารูรับ
แสงที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดของในแต่ละการทดลอง

2.5 สารละลายที่ใช้ในการทดลองหากเป็นสารละลายใสหรือมีความเข้มของสีน้อยเกินไป
จะไม่สามารถระบุได้ว่าสารละลายมีการดูดกลืนแสงหรือไม่ เนื่องจากค่าการส่องผ่านของแสงนั้น
สามารถส่องผ่านออกไปได้ 100 % ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้สารละลายที่มีความเข้มของสีที่มาก จึง
ได้ผลการทดลองที่เห็นความแตกต่างของการส่องผ่านของแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มขึ้นและ
ความหนาย่างชัดเจน

3. ข้อเสนอแนะสำหรับวิจัยครั้งต่อไป

3.1 สร้างแอปพลิเคชันที่ใช้ร่วมกับสมาร์ทโฟนที่เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงเอง โดยเพิ่ม
ความสามารถของแอปพลิเคชันให้สามารถปรับขนาดรูรับแสงเองได้จากในแอปพลิเคชัน

3.2 .ศึกษาค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายสีผสมอาหารสีอื่นเพิ่มเติม เช่น สีเขียว สีน้ำเงิน เป็นต้น

3.3 ศึกษาการกระเจิงแสงของสารละลายหลากหลายชนิด

3.4 ศึกษาการกระเจิงของแสงที่มุมอื่น ๆ เพิ่มเติม

3.5 พัฒนาชุดการทดลองที่สามารถวัดค่าการส่องผ่านของแสงโดยใช้สารละลายใสหรือสารละลายสีที่เจือจางมาก ๆ





บรรณานุกรม



Absorption Of Light By Object. (2018). <http://nchsbands.info/2017/absorption-of-light-by-object.html>

Color wheel wavelengths. (2018). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Color_wheel_wavelengths.png

Cox, A. J., DeWeerd, A. J., และ Linden, J. (2002, June). An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. *American Association of Physics Teachers*, 70(6), 620-625.

Hosker, B. S. (2017). Demonstrating Principles of Spectrophotometry by Constructing a Simple, Low-Cost, Functional Spectrophotometer Utilizing the Light Sensor on a Smartphone. *Journal of chemical education*, 95(1), 178-181.

Hussain, I., Ahamad, K., และ Nath, P. (2016). WATER TURBIDITY SENSING USING A SMARTPHONE. *Royal Society of Chemistry*, 27(6), 22374-22382.

Jr, L. A. P., Washer, B. M., Hakim, M. H., และ Dallinger, R. F. (2016, April). User-Friendly 3D Printed Colorimeter Models for Student Exploration of Instrument Design and Performance. *Journal of chemical education*, 93(7), 1305-1309.

Kuntzleman, T. S., และ Jacobson, E. C. (2016). Teaching Beer's law and absorption spectrophotometry with a smart phone: a substantially simplified protocol. *Journal of chemical education*, 93(7), 1249-1252.

Liang, P.-S., Park, T. S., และ Yoon, J.-Y. (2014, August). Rapid and reagentless detection of microbial contamination within meat utilizing a smartphone-based biosensor. *Scientific Reports*, 4(1), 1-8.

Liang, P.-S., San Park, T., และ Yoon, J.-Y. (2014). Rapid and reagentless detection of microbial contamination within meat utilizing a smartphone-based biosensor. *Scientific Reports*, 4, 5953.

Malvern, I. L. (2015). Particle size analysis of calcium carbonates by laser diffraction. Retrieved from <https://www.technologynetworks.com/analysis/go/lc/view-application-note-231257>

- Markin, A. V., Markina, N. E., and Eilks, I. (2017, March). The application of laser pointers for demonstration experiments in nanotechnology lessons at secondary school level. *The international society for optics and phonics*, 10336, 1-8.
- Mehta, A. (2012). Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy-derivation of beer-lambert law. *Analytical Chemistry*. Available at pharmaxchange.info.
- Onorato, P., Gratton, L. M., Polesello, M., Salmoiraghi, A., and Oss, S. (2018). The Beer Lambert law measurement made easy. *Physics Education*, 53(3), 035033.
- Onorato, P., Malgieri, M., and Ambrosio, A. D. (2016). Quantitative analysis of transmittance and photoluminescence using a low cost apparatus. *European Journal of Physics*, 37(1).
- Onorato, P., Malgieri, M., and De Ambrosio, A. (2015). Quantitative analysis of transmittance and photoluminescence using a low cost apparatus. *European Journal of Physics*, 37(1), 015301.
- Oprea, M., and Miron, C. (2014). MOBILE PHONES IN THE MODERN TEACHING OF PHYSICS. *Romanian Reports in Physics*, 66(4), 1236-1252.
- Porter Jr, L. A., Chapman, C. A., and Alaniz, J. A. (2016). Simple and inexpensive 3D printed filter fluorometer designs: User-friendly instrument models for laboratory learning and outreach activities. In: ACS Publications.
- Porter Jr, L. A., Washer, B. M., Hakim, M. H., and Dallinger, R. F. (2016). User-friendly 3D printed colorimeter models for student exploration of instrument design and performance. In: ACS Publications.
- Ram, T. (2016). การวัดความเข้มของแสงด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงแบบพกพา. <http://www.truepllookpanya.com/knowledge/content/62889/-blo-sciphy-sci->
- Sans, J. A., Manjón, F. J., Cuenca-Gotor, V., Giménez-Valentín, M. H., Salinas, I., Barreiro, J. J., . . . Gomez-Tejedor*, J. A. (2015). Smartphone: a new device for teaching Physics. *1st International Conference on Higher Education Advances, HEAd'15*.

- Sigma, A. (2020). Properties of Calcium carbonate. Retrieved from <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/310034?lang=en®ion=TH>
- Sweeney, R. E., Budiman, E., และ Yoon, J.-Y. (2017, July). Mie scatter spectra-based device for instant, contact-free, and specific diagnosis of bacterial skin infection. *Scientific Reports*, 7, 1-11.
- Thani, M. Z., Al-Ameri, S. A., และ Sultan, M. S. (2018). Spectrophotometric Determination of Ponceau 4 R in the Several Beverages Using Mixed Micelles after Cloud Point Extraction. *Al-Nahrain Journal of Science*, 21(1), 8-13.
- You, D. J., Park, T. S., และ Yoon, J.-Y. (2013). Cell-phone-based measurement of TSH using Mie scatter optimized lateral flow assays. *Biosensors and Bioelectronics*, 40(1), 180-185.
- ณัฐวุฒิ, เ. (2557). การออกแบบ/สร้างต้นแบบเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อย่างง่าย. http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/384297/e7556ff87ef3d7be5e186a721a89eb5f?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2014.159
- วิศรุต, ศ., ต้นติวานุรักษ์, อ., ศรีบุญ, ว., และ สุขประสงค์, ศ. (2560). การออกแบบและสร้างชุดทดสอบเพื่อหาค่าการส่งผ่านแสงของพอลิเอทิลีนในงานเกษตรกรรม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(9), 520-530.
- ศานติกร, อ. (2558). เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบพกพาสำหรับการประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์เชิงเคมี. <http://161.246.37.102/dcms/files/Fulltext%20Santikon%20Amnuayphol.pdf>
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อ, ม. (2561). สีและแสง การวัดและการดูดกลืน. <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/content.html>
- เส้นใย PLA สีดำสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ. (2018). สืบค้นจาก <https://imgaz2.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/B7/26/760bcf85-0f19-4cc3-a41d-1f616742f253.JPG>





ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลอง

ตาราง 2 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

| ความเข้มข้น $\times 10^7$ | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| (โมเลกุล/ | | | | | | | | | | | |
| ลูกบาศก์เซนติเมตร) | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 3.8689 | 7.7378 | 11.607 | 15.476 | 19.345 | 23.213 | 27.082 | 30.951 | 34.82 | 38.689 |
| แดง (R value) | X ₁ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₂ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₃ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X _{ave} | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | SD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| เขียว (G value) | X ₁ | 254 | 125 | 101 | 55 | 44 | 35 | 29 | 24 | 21 | 16 |
| | X ₂ | 254 | 121 | 97 | 54 | 41 | 33 | 27 | 23 | 20 | 15 |
| | X ₃ | 254 | 126 | 102 | 55 | 42 | 34 | 28 | 23 | 20 | 15 |
| | X _{ave} | 254 | 124 | 100 | 54.67 | 42.33 | 34 | 28 | 23.33 | 20.33 | 15.33 |
| | SD | 2.65 | 2.65 | 0.58 | 1.53 | 1 | 1 | 0.58 | 0.58 | 1 | 0.58 |
| น้ำเงิน (B value) | X ₁ | 254 | 232 | 170 | 61 | 43 | 40 | 42 | 39 | 41 | 42 |
| | X ₂ | 254 | 235 | 173 | 60 | 46 | 42 | 41 | 40 | 41 | 42 |
| | X ₃ | 254 | 241 | 178 | 62 | 46 | 41 | 42 | 40 | 41 | 42 |
| | X _{ave} | 254 | 236 | 173.67 | 61 | 45 | 41 | 41.67 | 39.67 | 41 | 42 |
| | SD | 0 | 4.58 | 4.04 | 1 | 1.73 | 1 | 0.58 | 0.58 | 0 | 1 |

ตาราง 3 ค่า RGB ของแสงสีขาวยืดขวางเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

| ความเข้มข้น $\times 10^7$ | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| (โมเลกุล/ | | | | | | | | | | | |
| ลูกบาศก์เซนติเมตร) | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 3.8689 | 7.7378 | 11.607 | 15.476 | 19.345 | 23.213 | 27.082 | 30.951 | 34.82 | 38.689 |
| ขาว (R value) | X ₁ | 255 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₂ | 255 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₃ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X _{ave} | 254.67 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | SD | 0.58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ขาว (G value) | X ₁ | 255 | 166 | 158 | 139 | 133 | 124 | 122 | 119 | 115 | 112 |
| | X ₂ | 255 | 167 | 160 | 139 | 134 | 127 | 123 | 120 | 116 | 112 |
| | X ₃ | 255 | 163 | 154 | 134 | 131 | 126 | 123 | 118 | 113 | 110 |
| | X _{ave} | 255 | 165.33 | 157.33 | 137.33 | 132.67 | 128.67 | 124.67 | 118.33 | 114.67 | 111.33 |
| | SD | 0 | 2.08 | 3.06 | 2.89 | 1.53 | 2.52 | 2.08 | 2.65 | 2.08 | 1.53 |
| ขาว (B value) | X ₁ | 255 | 115 | 95 | 67 | 66 | 63 | 63 | 62 | 61 | 60 |
| | X ₂ | 255 | 116 | 96 | 68 | 68 | 69 | 67 | 65 | 60 | 60 |
| | X ₃ | 255 | 113 | 92 | 65 | 65 | 63 | 64 | 62 | 60 | 59 |
| | X _{ave} | 255 | 114.67 | 94.33 | 66.67 | 66.33 | 65.67 | 65.33 | 63 | 60.33 | 59.67 |
| | SD | 0 | 1.53 | 2.08 | 1.53 | 1.53 | 3.06 | 3.21 | 3.06 | 1.73 | 0.58 |

ตาราง 4 ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

| ความเข้มข้น $\times 10^7$ | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (โมเลกุล/ | | | | | | | | | | | |
| ลูกบาศก์เซนติเมตร) | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 3.8689 | 7.7378 | 11.607 | 15.476 | 19.345 | 23.213 | 27.082 | 30.951 | 34.82 | 38.689 |
| แดง | | | | | | | | | | | |
| (R value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T ₂ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T ₃ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T _{ave} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| เขียว | | | | | | | | | | | |
| (G value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 1 | 0.49213 | 0.39764 | 0.21654 | 0.17323 | 0.13780 | 0.11417 | 0.09449 | 0.08268 | 0.07480 | 0.06299 |
| T ₂ | 1 | 0.47638 | 0.38189 | 0.21260 | 0.16142 | 0.12992 | 0.10630 | 0.09055 | 0.07874 | 0.06693 | 0.05906 |
| T ₃ | 1 | 0.49606 | 0.40157 | 0.21654 | 0.16535 | 0.13386 | 0.11024 | 0.09055 | 0.07874 | 0.07087 | 0.05906 |
| T _{ave} | 1 | 0.48819 | 0.39370 | 0.21522 | 0.16667 | 0.13386 | 0.11024 | 0.09186 | 0.08005 | 0.07087 | 0.06037 |
| SD | 0 | 0.01042 | 0.01042 | 0.00227 | 0.00601 | 0.00394 | 0.00394 | 0.00227 | 0.00227 | 0.00394 | 0.00227 |
| น้ำเงิน | | | | | | | | | | | |
| (B value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 1 | 0.91339 | 0.66929 | 0.24016 | 0.16929 | 0.15748 | 0.16535 | 0.15354 | 0.16142 | 0.16142 | 0.16535 |
| T ₂ | 1 | 0.92520 | 0.68110 | 0.23622 | 0.18110 | 0.16535 | 0.16142 | 0.15748 | 0.16142 | 0.16535 | 0.16535 |
| T ₃ | 1 | 0.94882 | 0.70079 | 0.24409 | 0.18110 | 0.16142 | 0.16535 | 0.15748 | 0.16142 | 0.16929 | 0.16535 |
| T _{ave} | 1 | 0.92913 | 0.68373 | 0.24016 | 0.17717 | 0.16142 | 0.16404 | 0.15617 | 0.16142 | 0.16535 | 0.16535 |
| SD | 0 | 0.01804 | 0.01591 | 0.00394 | 0.00682 | 0.00394 | 0.00227 | 0.00227 | 0 | 0.00394 | 0 |

ตาราง 5 ค่าการส่องผ่านของแสงสีขาวยellow ที่มีความเข้มเพิ่มขึ้น

| ความเข้มขึ้น $\times 10^7$ | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (โมเลกุล/ | | | | | | | | | | | |
| ลูกบาศก์เซนติเมตร) | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 3.8689 | 7.7378 | 11.607 | 15.476 | 19.345 | 23.213 | 27.082 | 30.951 | 34.82 | 38.689 |
| ขาว (R value) | T ₁ | 1.00131 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| | T ₂ | 1.00131 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| | T ₃ | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| | T _{ave} | 1.00000 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| | SD | 0.00227 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ขาว (G value) | T ₁ | 1 | 0.65098 | 0.61961 | 0.54510 | 0.52157 | 0.50588 | 0.48627 | 0.47843 | 0.46667 | 0.45098 |
| | T ₂ | 1 | 0.65490 | 0.62745 | 0.54510 | 0.52549 | 0.51373 | 0.49804 | 0.48235 | 0.47059 | 0.45490 |
| | T ₃ | 1 | 0.63922 | 0.60392 | 0.52549 | 0.51373 | 0.49412 | 0.48235 | 0.46275 | 0.45490 | 0.44314 |
| | T _{ave} | 1 | 0.64837 | 0.61699 | 0.53856 | 0.52026 | 0.50458 | 0.48889 | 0.47451 | 0.46405 | 0.44967 |
| | SD | 0 | 0.00816 | 0.01198 | 0.01132 | 0.00599 | 0.00987 | 0.00816 | 0.01038 | 0.00816 | 0.00599 |
| ขาว (B value) | T ₁ | 1 | 0.45098 | 0.37255 | 0.26275 | 0.25882 | 0.25490 | 0.24706 | 0.24706 | 0.23922 | 0.23529 |
| | T ₂ | 1 | 0.45490 | 0.37647 | 0.26667 | 0.26667 | 0.27059 | 0.27059 | 0.26275 | 0.25490 | 0.23529 |
| | T ₃ | 1 | 0.44314 | 0.36078 | 0.25490 | 0.25490 | 0.24706 | 0.25098 | 0.23922 | 0.24314 | 0.23137 |
| | T _{ave} | 1 | 0.44967 | 0.36993 | 0.26144 | 0.26013 | 0.25752 | 0.25621 | 0.24967 | 0.24706 | 0.23660 |
| | SD | 0 | 0.00599 | 0.00816 | 0.00599 | 0.00599 | 0.01198 | 0.01261 | 0.01198 | 0.00679 | 0.00226 |

ตาราง 6 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น

| ความหนา (mm) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| แดง (R value) | | | | | | | | | | | |
| X ₁ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| X ₂ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| X ₃ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| X _{ave} | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| SD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| เขียว (G value) | | | | | | | | | | | |
| X ₁ | 254 | 169 | 107 | 78 | 55 | 47 | 38 | 31 | 27 | 24 | 21 |
| X ₂ | 254 | 163 | 117 | 75 | 56 | 46 | 36 | 31 | 26 | 22 | 18 |
| X ₃ | 255 | 164 | 104 | 77 | 55 | 45 | 34 | 29 | 24 | 21 | 16 |
| X _{ave} | 254.33 | 165.33 | 109.33 | 76.67 | 55.33 | 46 | 36 | 30.33 | 25.67 | 22.33 | 18.33 |
| SD | 0.58 | 3.21 | 6.81 | 1.53 | 0.58 | 1 | 2 | 1.15 | 1.53 | 1.53 | 2.52 |
| น้ำเงิน (B value) | | | | | | | | | | | |
| X ₁ | 254 | 156 | 105 | 45 | 17 | 8 | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| X ₂ | 254 | 128 | 110 | 46 | 16 | 7 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| X ₃ | 254 | 145 | 92 | 48 | 13 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| X _{ave} | 254.00 | 143.00 | 102.33 | 46.33 | 15.33 | 7 | 3 | 0.67 | 0.33 | 0 | 0 |
| SD | 0 | 14.11 | 9.29 | 1.53 | 2.08 | 1 | 1.73 | 0.58 | 0.58 | 0 | 0 |

ตาราง 7 ค่า RGB ของแสงสีขาวยี่เมื่อส่องผ่านสารละลายภายใต้ความหนาเพิ่มขึ้น

| ความหนา (mm) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| ขาว (R value) | X ₁ | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₂ | 255 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X ₃ | 255 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | X _{ave} | 254.67 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 | 254 |
| | SD | 0.58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ขาว (G value) | X ₁ | 255 | 239 | 187 | 159 | 145 | 138 | 132 | 125 | 122 | 117 |
| | X ₂ | 255 | 249 | 189 | 163 | 150 | 140 | 135 | 128 | 123 | 120 |
| | X ₃ | 255 | 243 | 201 | 170 | 157 | 147 | 140 | 134 | 127 | 122 |
| | X _{ave} | 255 | 243.67 | 192.33 | 164 | 150.67 | 141.67 | 135.67 | 129 | 124 | 119.67 |
| | SD | 0 | 5.03 | 7.57 | 5.57 | 6.03 | 4.73 | 4.04 | 4.58 | 2.65 | 2.52 |
| ขาว (B value) | X ₁ | 254 | 233 | 143 | 82 | 56 | 51 | 47 | 46 | 46 | 44 |
| | X ₂ | 255 | 235 | 128 | 73 | 53 | 46 | 44 | 44 | 44 | 44 |
| | X ₃ | 255 | 233 | 154 | 86 | 60 | 51 | 48 | 46 | 46 | 45 |
| | X _{ave} | 254.67 | 233.67 | 141.67 | 80.33 | 56.33 | 49.33 | 46.33 | 45.33 | 45.33 | 45 |
| | SD | 0.58 | 1.15 | 13.05 | 6.66 | 3.51 | 2.89 | 2.08 | 1.15 | 1.15 | 1 |

ตาราง 8 ค่าการส่องผ่านของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเมื่อส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น

| ความหนา (mm) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| แดง (R value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T ₂ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T ₃ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T _{ave} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| เขียว (G value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 0.99869 | 0.66448 | 0.42071 | 0.30668 | 0.21625 | 0.18480 | 0.14941 | 0.12189 | 0.10616 | 0.09436 | 0.08257 |
| T ₂ | 0.99869 | 0.64089 | 0.46003 | 0.29489 | 0.22018 | 0.18087 | 0.14155 | 0.12189 | 0.10223 | 0.08650 | 0.07077 |
| T ₃ | 1.00262 | 0.64482 | 0.40891 | 0.30275 | 0.21625 | 0.17693 | 0.13368 | 0.11402 | 0.09436 | 0.08257 | 0.06291 |
| T _{ave} | 1.00000 | 0.65007 | 0.42988 | 0.30144 | 0.21756 | 0.18087 | 0.14155 | 0.11927 | 0.10092 | 0.08781 | 0.07208 |
| SD | 0.00227 | 0.01264 | 0.02676 | 0.00601 | 0.00227 | 0.00393 | 0.00786 | 0.00454 | 0.00601 | 0.00601 | 0.00989 |
| น้ำเงิน (B value) | | | | | | | | | | | |
| T ₁ | 1 | 0.61417 | 0.41339 | 0.17717 | 0.06693 | 0.03150 | 0.01969 | 0.00394 | 0.00394 | 0 | 0 |
| T ₂ | 1 | 0.50394 | 0.43307 | 0.18110 | 0.06299 | 0.02756 | 0.00787 | 0.00394 | 0 | 0 | 0 |
| T ₃ | 1 | 0.57087 | 0.36220 | 0.18898 | 0.05118 | 0.02362 | 0.00787 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T _{ave} | 1 | 0.56299 | 0.40289 | 0.18241 | 0.06037 | 0.02756 | 0.01181 | 0.00262 | 0.00131 | 0 | 0 |
| SD | 0 | 0.05554 | 0.03658 | 0.00601 | 0.00820 | 0.00394 | 0.00682 | 0.00227 | 0.00227 | 0 | 0 |

ตาราง 9 ค่าการส่องผ่านของแสงสีขาวยืดส่องผ่านสารละลายที่มีความหนาเพิ่มขึ้น

| ความหนา (mm) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| T ₁ | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| T ₂ | 1.00131 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| T ₃ | 1.00131 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| T _{ave} | 1 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 | 0.99738 |
| SD | 0.00227 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T ₁ | 1 | 0.93725 | 0.73333 | 0.62353 | 0.56863 | 0.54118 | 0.51765 | 0.49020 | 0.47843 | 0.45882 | 0.46275 |
| T ₂ | 1 | 0.97647 | 0.74118 | 0.63922 | 0.58824 | 0.54902 | 0.52941 | 0.50196 | 0.48235 | 0.47059 | 0.45098 |
| T ₃ | 1 | 0.95294 | 0.78824 | 0.66667 | 0.61569 | 0.57647 | 0.54902 | 0.52549 | 0.49804 | 0.47843 | 0.45882 |
| T _{ave} | 1 | 0.95556 | 0.75425 | 0.64314 | 0.59085 | 0.55556 | 0.53203 | 0.50588 | 0.48627 | 0.46928 | 0.45752 |
| SD | 0 | 0.01974 | 0.02969 | 0.02183 | 0.02364 | 0.01853 | 0.01585 | 0.01797 | 0.01038 | 0.00987 | 0.00599 |
| T ₁ | 0.99738 | 0.91492 | 0.56152 | 0.32199 | 0.21990 | 0.20026 | 0.18455 | 0.18063 | 0.18063 | 0.17277 | 0.18848 |
| T ₂ | 1.00131 | 0.92277 | 0.50262 | 0.28665 | 0.20812 | 0.18063 | 0.17277 | 0.17277 | 0.17277 | 0.18063 | 0.17277 |
| T ₃ | 1.00131 | 0.91492 | 0.60471 | 0.33770 | 0.23560 | 0.20026 | 0.18848 | 0.18063 | 0.18063 | 0.17670 | 0.17670 |
| T _{ave} | 1 | 0.91754 | 0.55628 | 0.31544 | 0.22120 | 0.19372 | 0.18194 | 0.17801 | 0.17801 | 0.17670 | 0.17932 |
| SD | 0.00227 | 0.00453 | 0.05125 | 0.02615 | 0.01379 | 0.01134 | 0.00817 | 0.00453 | 0.00453 | 0.00393 | 0.00817 |

ตาราง 10 ค่า RGB ของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเนื่องจากการกระเจิงของแสงเมื่อ
สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

| ร้อยละความเข้มข้น (v/v) | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------|------------------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| แดง (R value) | X ₁ | 30 | 73 | 95 | 108 | 126 | 133 |
| | X ₂ | 29 | 76 | 96 | 109 | 124 | 133 |
| | X ₃ | 30 | 76 | 96 | 109 | 125 | 134 |
| | X _{ave} | 29.67 | 75 | 95.67 | 108.67 | 125 | 133.33 |
| | SD | 0.58 | 1.73 | 0.58 | 0.58 | 1 | 0.58 |
| เขียว (G value) | X ₁ | 44 | 96 | 120 | 145 | 166 | 176 |
| | X ₂ | 42 | 95 | 118 | 147 | 165 | 176 |
| | X ₃ | 44 | 94 | 118 | 147 | 166 | 176 |
| | X _{ave} | 43.33 | 95 | 118.67 | 146.33 | 165.67 | 176 |
| | SD | 1.15 | 1 | 1.15 | 1.15 | 0.58 | 0 |
| น้ำเงิน (B value) | X ₁ | 60 | 119 | 144 | 164 | 178 | 184 |
| | X ₂ | 55 | 121 | 146 | 164 | 178 | 183 |
| | X ₃ | 53 | 120 | 146 | 166 | 178 | 183 |
| | X _{ave} | 56 | 120 | 145.33 | 164.67 | 178 | 183.33 |
| | SD | 3.61 | 1 | 1.15 | 1.15 | 0 | 0.58 |

ตาราง 11 ค่า RGB ของแสงสีขาวเนื่องจากการกระเจิงของแสงเมื่อสารละลายมีความขุ่นเพิ่มขึ้น

| ร้อยละความเข้มข้น (v/v) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|----------------------------|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ขาว (R value) | X_1 | 45 | 106 | 129 | 155 | 173 | 184 |
| | X_2 | 48 | 105 | 130 | 154 | 173 | 183 |
| | X_3 | 46 | 106 | 133 | 159 | 177 | 186 |
| | X_{ave} | 46.33 | 105.67 | 130.67 | 156.00 | 174.33 | 184.33 |
| | SD | 1.53 | 0.58 | 2.08 | 2.65 | 2.31 | 1.53 |
| ขาว (G value) | X_1 | 48 | 110 | 136 | 159 | 176 | 186 |
| | X_2 | 50 | 110 | 137 | 159 | 177 | 186 |
| | X_3 | 49 | 110 | 138 | 160 | 175 | 183 |
| | X_{ave} | 49 | 110 | 137 | 159.33 | 176 | 185 |
| | SD | 1 | 0 | 1 | 0.58 | 1 | 1.73 |
| ขาว (B value) | X_1 | 49 | 114 | 139 | 161 | 174 | 183 |
| | X_2 | 52 | 115 | 140 | 159 | 176 | 182 |
| | X_3 | 50 | 116 | 142 | 160 | 175 | 183 |
| | X_{ave} | 50.33 | 115 | 140.33 | 160 | 175 | 182.67 |
| | SD | 1.53 | 1 | 1.53 | 1 | 1 | 0.58 |

ภาคผนวก ข
บทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์



Demonstration of light absorption and light scattering using smartphones

Khemchira Malisorn¹, Surawut Wicharn¹, Suwan Plaipichit¹,
Chinnawut Pipatpanukul^{2,4}, Nongluck Houngkamhang^{3,4}
and Chokchai Puttharugsa^{1,5}

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University,
114 Sukhumvit23, Wattana, Bangkok 10110, Thailand

² Office of Education, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi 20131,
Thailand

³ College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand

⁴ Thailand Center of Excellence in Physics, Ministry of Higher Education, Science Research
and Innovation, 328 Ayutthaya Road, Bangkok 10400, Thailand

E-mail: chokchai@g.swu.ac.th



Abstract

This paper demonstrates the use of smartphones in an experiment of light absorption and light scattering. The LED display and camera of the smartphone are used as the light source and as the detector, respectively. The color wheel is used to choose the color of the light source to be shone through the sample for analysis. The detector directly measures the intensity of the light that passes through the sample to study light absorption according to the Beer–Lambert law. On the other hand, to investigate the light scattering, the detector orthogonally measures the intensity of the scattered light from the sample. The results of the light absorption correspond to the Beer–Lambert law. The scattered light from the sample is measured by a smartphone. The experiment is easy to set up, without the need for any further expensive apparatus. We expect that this experiment will be useful for physics teachers to demonstrate light absorption and light scattering in the classroom or in a physics laboratory.

Introduction

Nowadays, smartphones play an important role in both the classroom and the laboratory, especially in a physics laboratory, because many sensors are embedded in it, such as an accelerometer,

gyroscope, magnetometer, GPS, speaker, and camera. These sensors can read out experimental data using an appropriate application (app). Recent studies used the sensors of a smartphone to observe motions (circular motion, oscillation motion, 1D motion, and 2D motion) [1–4], and the sensors (accelerometer, gyroscope, and magnetometer) can measure experimental data

⁵ Author to whom any correspondence should be addressed.

K Malisorn *et al*

precisely and accurately. However, there are a few papers that use smartphones to study the topic of light. Most of them use the ambient light sensor to measure the intensity of light for the study of the inverse-square law, Brewster's angle, diffraction pattern, and Malus's law [5–9]. Moreover, the properties of light, especially in absorption, transmission, and scattering, are important topics taught in the physics curriculum at the undergraduate and high school levels. This topic will help students understand the physics of color [10] and can be applied to many applications, such as biosensors, chemical sensors, and analytical science [11]. Previous research used the ambient light sensor of smartphones to study the Beer–Lambert law and used LEDs as a light source [12]. They aim to improve the alternative methods of studying or demonstrating the physics of light.

In this work, we will demonstrate experiments of light absorption (corresponding to the Beer–Lambert law) and light scattering using smartphones as the light source and detector. The experiments are easy to set up and do not require any further expensive apparatus, only two smartphones to use as a light source (display of smartphone) and as a detector (camera of smartphone). We expect that this experiment will be useful for physics teachers to show the phenomena of light absorption and light scattering.

Background theory and experimental setup

The color wheel (see figure 1, upper) is used to estimate the color of light that is absorbed by a particular chemical species in solution. The approximation is done by noting the color on the wheel opposite the observed color of the solution. For example, if a red color (sample solution) is to be analyzed, it probably absorbs green light very well, then a green color should be used as the light source. The predictions made using the color wheel are not absolute. Its use is complicated by the fact that our eyes are not equally sensitive to all colors of light [13]. Thus, to study light absorption, we have to select a color of the light source that is suitable to the color of the sample using the color wheel. When the monochromatic light of intensity I_0 travels in a sample for a distance x (see figure 1, upper), some of the light is

absorbed, yielding the intensity of the transmitted light I less than I_0 . The relationship between I and I_0 depends on the path length (x) and the concentration of the sample (c). We can write the Beer–Lambert law as

$$I(x, c) = I_0 e^{-\sigma c x} = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

where σ is the cross section of the effective area and $\mu = \sigma c$ is the linear attenuation coefficient. Equation (1) can be expressed in terms of transmittance (T), that is,

$$T \equiv \frac{I(x, c)}{I_0} = e^{-\mu x}. \quad (2)$$

To study light scattering, the incident light of intensity I_0 passes through the sample containing any particle (Gaviscon particle) in the solution. Some of the light can be scattered by the particle in the solution. The intensity of scattering light depends on the amount of particle and particle size.

The experimental setup consists of a light source, a detector, and a sample holder. We used two smartphones with the appropriate apps to act as the light source and detector. One smartphone, a Samsung Galaxy S Duos (GT-S7562), with the RGB app was used as the light source using its LED display. Another smartphone, an iPhone 6S, with the ColorAssist app acts as the color detector. The sample holder and smartphone holder were 3D printed using a black polymer PLA (polylactic acid). The sample solution for absorption measurement was a food dye (red color). For measuring light scattering, we used a solution of Gaviscon diluted in water as a sample. Gaviscon contains calcium carbonate particles dispersed in a solution of sodium bicarbonate. In the experiment of absorption, the light source, sample, and detector were aligned in the same direction, as shown in figure 1. The light source, the LED display of the smartphone, was adjusted to a green color in the value of 0, 255, 0 using the RGB app, which refers to the intensity of the red, green, and blue color, respectively. The green light was shone through the sample, and then the back camera of the smartphone measured the green color intensity using the ColorAssist app because of the red sample absorbing the green light. To measure light scattering, the green light source directly shined to the sample solution. The detector, the back camera of the smartphone, was orthogonally

Demonstration of light absorption and light scattering using smartphones

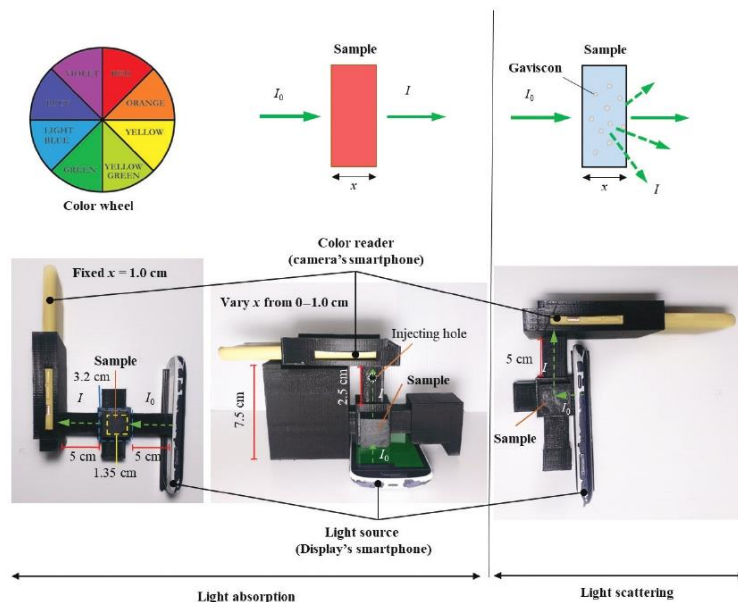


Figure 1. The color wheel and schematics of the basic principle of light absorption and light scattering (upper). The lower shows digital images of the experimental setup for light absorption and light scattering.

aligned respective to the light source—sample (see figure 1). The intensity of light scattering was also measured using the ColorAssist app.

Results and discussion

Figure 2 shows the spectra of the LED display of a smartphone using a spectrophotometer (Ocean Optics, USB2000). The colors of the LED display were adjusted to red, green, and blue using the RGB app, in which the RGB level was 255, 0, 0; 0, 255, 0; and 0, 0, 255 for red, green, and blue, yielding the position of maximum peaks of 609 nm, 560 nm, and 456 nm, respectively. The color of the LED display can be adjusted in any wavelength by selecting the combination of red, green, and blue level in the RGB app according to the following website: <https://academo.org/demos/wavelength-to-colour-relationship/>. In this study, the green LED display of the smartphone was selected and adjusted to be 0, 255, 0 in the

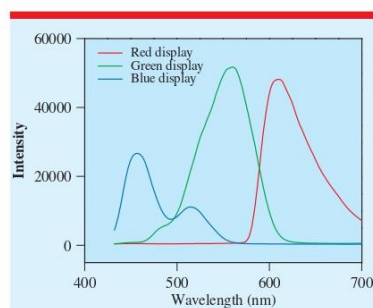


Figure 2. Spectra of the LED display of the smartphone in red, green, and blue.

RGB level because it is the complementary color according to the color wheel. This is because the red color of the food dye can absorb the green

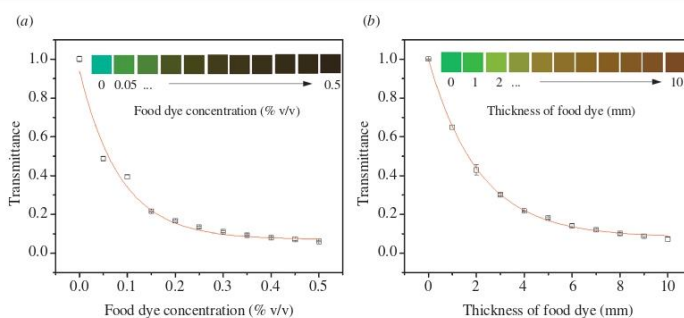


Figure 3. Light absorption of food dye (red color) from a green light source. (A) The plot of transmittance versus food dye concentration and (B) the plot of transmittance versus thickness of the food dye. Insets are the images captured from the ColorAssist app.

light. It can be seen that the selected green display is not a monochromatic light, it emits the highest intensity at 560 nm with a broad spectrum. It acts as the pseudo-monochromatic light source [12]. However, the display (green color) is enough to use as the light source for demonstration of light absorption and light scattering since it provides the highest maximum intensity at 560 nm of wavelength. This is because the red food dye sample absorbs the wavelength at 514 nm (data not show).

Figure 3(A) shows light absorption according to the Beer–Lambert law using the green display as a light source. In the experiment, the food dye concentrations (the thickness of sample was about 10 mm) varied from 0.05 to 0.50% v/v, and the value of the green color was measured by the camera’s smartphone using the ColorAssist app. This app measures the level of color from 0 to 255. The transmittance can be calculated from equation (2). In figure 3(A), when the food dye concentration increases, the transmittance of green light exponentially decreases. The inset in figure 3(A) shows the images captured from the ColorAssist app. The green color will be darker when the food dye concentration increases. It becomes dark or black when the concentration is about 0.3% v/v. The red line was fitted according to equation (2), yielding the cross effective area, which was $11.68 \pm 0.75 \text{ cm}^{-1} \cdot (\%v/v)^{-1}$ (at 1.0 cm of path length). Figure 3(B) shows light absorption depending on the thickness of the food dye. In the experiment, the thickness of

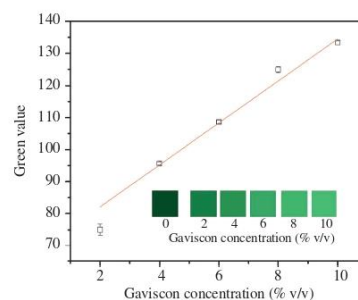


Figure 4. The experiment of light scattering from the Gaviscon sample using a green display as a light source.

the food dye (concentration of 0.3% v/v) varied from 1 to 10 mm, and the value of the green color was measured by the ColorAssist app. To vary the thickness of the sample, the 0.1 ml of sample solution was injected into the sample holder via a small hole (see figure 1) by using a syringe. In each measurement, the sample thickness increases 1.0 mm. As a result, when the thickness of the food dye increases, the transmittance exponentially decreases (see equation [2]). The inset in figure 3(B) shows the image captured by the ColorAssist app. The green image becomes darker when the thickness increases. Notice that the insets in figures 3(A) and (B) at 0.3% v/v are different in color. This occurs because the

Demonstration of light absorption and light scattering using smartphones

distance between light source and sample is different. The distance in the experiment in figure 3(B) is closer. The fit of the experiment (red line) in figure 3(B) reveals the linear attenuation coefficient, which is $0.47 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$ (at 0.3% v/v of concentration). This means that the green light can travel through the sample about $0.47 \pm 0.01 \text{ cm}$. This suggests that we can use a smartphone as the light source and detector to demonstrate light absorption according to the Beer–Lambert law.

Figure 4 shows the experiment of light scattering from the Gaviscon sample using the green display of the smartphone as a light source. The value of the green color scattering from the Gaviscon sample was orthogonally measured using the back camera of the smartphone with the ColorAssist app. When the concentration of the Gaviscon increases, the value of scattering green light also increases linearly because of the light scattering of the calcium carbonate particle in the sample. The particle size of the calcium carbonate is about 10–15 μm . The inset in figure 4 shows the image captured by the ColorAssist app. It can be seen that the color of the image becomes green when the concentration of Gaviscon increases. This indicates that we can use a smartphone for measuring light scattering from the calcium carbonate particle in demonstrations to teach the topic of light scattering without any expensive apparatus.

Conclusion

We have demonstrated the use of smartphones as a light source and a detector for studying light absorption and light scattering. The results from light absorption correspond to the Beer–Lambert law. The important parameters, such as the cross effective area and linear attenuation coefficient, can be obtained by fitting the plot of transmittance. The experiment is easy to set up and does not need any expensive apparatus. We hope that the use of a smartphone to demonstrate light absorption and light scattering will be useful to physics teachers and students in understanding more the phenomena of light absorption and light scattering.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Thailand Center of Excellence in Physics for financial support. KM gratefully acknowledges financial support

from the Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology.

Received 8 August 2019, in final form 9 October 2019
Accepted for publication 28 October 2019
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab51ea>

References

- [1] Hochberg K, Gröber S, Kuhn J and Müller A 2014 The spinning disc: studying radial acceleration and its damping process with smartphone acceleration sensors *Phys. Educ.* **49** 137
- [2] Castro-Palacio J C, Velázquez-Abad L, Giménez F and Monsoriu J A 2013 A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors *Eur. J. Phys.* **34** 737
- [3] Nuryantini A Y, Sawitri A and Nuryadin B W 2018 Constant speed motion analysis using a smartphone magnetometer *Phys. Educ.* **53** 065021
- [4] Tuset-Sanchis L, Castro-Palacio J C, Gómez-Tejedor J A, Manjón F J and Monsoriu J A 2015 The study of two-dimensional oscillations using a smartphone acceleration sensor: example of Lissajous curves *Phys. Educ.* **50** 580
- [5] Sans J A, Gea-Pinal J, Gimenez M H, Esteve A R, Solbes J and Monsoriu J A 2017 Determining the efficiency of optical sources using a smartphone's ambient light sensor *Eur. J. Phys.* **38** 025301
- [6] Sans J A, Manjón F J, Pereira A L J, Gomez-Tejedor J A and Monsoriu J A 2013 Oscillations studied with the smartphone ambient light sensor *Eur. J. Phys.* **34** 1349
- [7] Chiang C M and Cheng H Y 2019 Use smartphones to measure Brewster's angle *Phys. Teach.* **57** 118
- [8] Díaz-Melián V L, Rodríguez L A, Pedroso-Camejo F, Mieres J, de Armas Y, Batista-Leyva A J and Altshuler E 2018 (arXiv:1811.09546)
- [9] Monteiro M, Stari C, Cabeza C and Martí A C 2017 The polarization of light and Malus' law using smartphones *Phys. Teach.* **55** 264
- [10] Rosil T, Malgieri M, Onorato P and Oss S 2016 What are we looking at when we say magenta? Quantitative measurements of RGB and CMYK colours with a homemade spectrophotometer *Eur. J. Phys.* **37** 065301
- [11] Roda A, Michelini E, Zangheri M, Fusco M D, Calabria D and Simoni P 2016 Smartphone-based biosensors: a critical review and perspectives *TrAC Trends Anal. Chem.* **79** 317
- [12] Onorato P, Gratton L M, Polesello M, Salmoiraghi A and Oss S 2018 The Beer Lambert law measurement made easy *Phys. Educ.* **53** 035033
- [13] Kuntzleman T S and Jacobson E C 2016 Teaching Beer's law and absorption spectrophotometry with a smart phone: a substantially simplified protocol *J. Chem. Educ.* **93** 1249

K Malisorn et al

Khemchira Malisorn has a bachelor's degree in physics education. She is currently studying for a master's degree in physics at Srinakharinwirot University. Her interests are in utilizing a smartphone-based experimental set-up and 3D printing to develop a more interesting, practical high school physics laboratory which is easy to carry out in the classroom.



Surawut Wicharn received his BSc degree with honors, MSc degree, and PhD degree in applied physics from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, in 2007, 2010, and 2014, respectively. He is currently an instructor at the Department of Physics of Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand. His research areas include the theoretical and computational study on photonic structure and optical metamaterials, optimal design of the wireless energy harvesting system, and physics education.



Suwan Plaipichit received his BS, MS and PhD degrees in applied physics from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2008, 2010, and 2014, respectively. He is currently an instructor at Department of Physics of Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand. His research interests include nonlinear optics, photorefractive effect, digital holography, and physics education.



Chinnawut Pipatpanukul studied materials science and engineering and received his PhD from Mahidol University, Thailand, working with Asst. Prof. Dr. Toemsak Srikirin at Center of Nanoscience and Nanotechnology, Mahidol University on surface functionalization materials for biosensors application, specifically self-assembled silane monolayers. After a postdoctoral stay at the Chemistry and Physics of Interfaces research laboratories in Freiburg, Germany, where he studied photoactive polymer layers for the improvement of surface functionalization of materials, he returned to Thailand and in 2016 started to work at Burapha University. He is also interested in biomedical physics research applied to a biomedical laboratory.



Nongluck Houngkamhang received a BSc degree in chemistry at Naresuan University. She gained a PhD in Materials Science and Engineering at Mahidol University (Bangkok, Thailand). She is a lecturer in chemistry at College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (Bangkok, Thailand). She is interested in the field of nanomaterials, nanotechnology and biosensors.



Chokchai Puttharugsa gained a PhD in physics at the Mahidol University (Bangkok, Thailand). He is a lecturer in physics at the Srinakharinwirot University (Bangkok, Thailand). His research fields involve nanomaterial and nanotechnology. He is also interested in physics education research for applying a smartphone in physics laboratory.