# การประเมินช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพนิ่งดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ

นางสาวฐิธิมานัน ศรีมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

# EVALUATION OF DYNAMIC RANGE OF DIGITAL STILL CAMERA BY NATURAL SCENE SIMULATION BOX

Miss Tithimanan Srimongkon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การประเมินช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพนิ่งดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ |
| โดย | นางสาว ฐิธิมานัน ศรีมงคล |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีทางภาพ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์ |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์)

…………………………………………… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา สื่อประสาร)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นายธีระ ปิยคุณากร)

ฐิธิมานัน ศรีมงคล : การประเมินช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพนิ่งดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ. (EVALUATION OF DYNAMIC RANGE OF DIGITAL STILL CAMERA BY NATURAL SCENE SIMULATION BOX) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์, 82 หน้า.

ช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าความสว่างที่สูงที่สุดต่อต่ำที่สุดที่กล้องสามารถบันทึกได้ หากค่าช่วงพลวัตกว้างนั่นคือ กล้องจะสามารถผลิตการไล่น้ำหนักสีได้ดี ด้วยเหตุนี้ ช่วงพลวัตจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบคุณภาพกล้องโดยทั่วไป ช่วงพลวัตวัดได้ด้วยการถ่ายภาพกระดาษสีเทากลางที่มีค่าการสะท้อน 18% ด้วยค่าการเปิดรับแสงที่แตกต่างกัน ข้อมูลภาพที่ได้จะนำไปเขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าการเปิดรับแสงกับค่าพิกเซล เรียกเส้นโค้งนี้ว่า เส้นโค้งลักษณะเฉพาะ แต่วิธีนี้ใช้เวลานาน อีกทั้งไม่มีวัตถุจริงในธรรมชาติไว้เปรียบเทียบรายละเอียด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีใหม่สำหรับใช้ในการวัดช่วงพลวัต

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีใหม่ในการประเมินคุณภาพด้านช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ ซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้ด้วยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว กล่องจำลองนี้ถูกออกแบบมาเพื่อจำลองสภาวะความเปรียบต่างของแสงสูง นอกจากนี้ยังใส่แผ่นสเกลสีเทาซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่จะใช้ประเมินช่วงพลวัตในส่วนสว่างและส่วนเงาเพื่อใช้จัดเป็นค่าอ้างอิง เพื่อนำมาเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ รวมถึงวัตถุจริงในธรรมชาติที่นำมาตกแต่งภายในกล่องจำลอง เมื่อนำผลการประเมินทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบด้วยการหาค่าความสอดคล้องตามทฤษฎีของเพียร์สันพบว่า การประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติให้ค่าความสอดคล้องเท่ากับ 0.99 นั่นคือ กล่องจำลองนี้ประเมินช่วงพลวัตได้เทียบเท่าวิธีทั่วไป

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ลายมือชื่อนิสิต......................................................
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก............
ปีการศึกษา 2554

# # 5172279123 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY
KEYWORDS: Evaluation of dynamic range / Natural scene simulation box

TITHIMANAN SRIMONGKON : EVALUATION OF DYNAMIC RANGE OF DIGITAL STILL CAMERA BY NATURAL SCENE SIMULATION BOX. ADVISOR: ASST. PROF. CHAWAN KOOPIPAT, Ph.D., 82 pp.

Dynamic range (DR) of a digital camera is the ratio between the maximum and minimum light intensities which vary from white to black that the camera can capture. When the result of the measurement shows that the DR is high, a digital camera is identified as giving the good tone reproduction capability. This is the reason why DR becomes a key factor in decision making as to buy a digital camera. Therefore, many camera reviewers offer the DR comparison between many cameras in the market. In conventional photography, evaluation of DR is usually done by capturing an 18% reflective gray paper with a series of exposures and analyzed through the characteristic curve plotted between log exposure and pixel values. This method is time consuming and has no natural objects for comparing within those images. Therefore, we propose a new method for measuring DR.

In this research, a new method for evaluating an image quality or DR using well-calibrated Natural Scene Simulation Box. Only one photograph is required to evaluate the DR of the camera. The box is designed to simulate a high contrast scene. The key factor is two light sources that had extremely different intensities. Moreover, the box is fitted with a gray scale step wedge which is an important tool in evaluating the dynamic range of each camera. Some real objects were put in the box for to aid the comparisons for some fine details in highlight and shadow areas of the real objects. Through Pearson's theory test, it was found that two methods had correlation coefficient as 0.99, revealing that the box is correlated well with the conventional method.

Department : Imaging and Printing Technology Student's Signature ......................
Field of Study : Imaging Technology Advisor's Signature ......................
Academic Year : 2011

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เพราะมีบุคคลที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอยู่เสมอ ดิฉันขอขอบพระคุณทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาดังมีรายนามต่อไปนี้

1. ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์ ที่ให้คำปรึกษา และการช่วยเหลือในทุกด้าน ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

2. ขอขอบพระคุณ ประธานและกรรมการสอบทุกท่าน สำหรับคำแนะนำที่มีประโยชน์

3. ขอขอบพระคุณ อาจารย์ฮักเชิล คิม ที่ปรึกษาอาวุโสประจำมูลนิธิเยาวชนสัมพันธ์นานาชาติ ประจำประเทศไทย สำหรับคำแนะนำ และการช่วยเหลือในทุกด้าน ทำให้ดิฉันมีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

4. ขอขอบพระคุณบริษัทโฟโต้ไฟล์ สำหรับความอนุเคราะห์ให้ยืมกล้องถ่ายภาพ บริษัทโจตัน สำหรับความอนุเคราะห์ให้สีทาภายใน และบริษัทอีสต์บอร์น สำหรับความอนุเคราะห์ให้ฟิล์มในการทำวิจัย

5. ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข สำหรับความอนุเคราะห์ด้านข้อมูลความรู้ความเชี่ยวชาญพิเศษ อาจารย์ธำรงรุจน์ ฮุนตระกูล ผู้เอื้อเฟื้อการสอนและสถานที่ในการผลิตแผ่นลิ่มแสงสเกลสีเทา และคุณสมคิด ทองศิลา เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์

6. ขอขอบพระคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ทุกท่าน สำหรับคำสอน ข้อแนะนำ และการช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง

7. ขอขอบคุณนางสาวอารีรัตน์ ปฐมชัยวาลย์ นิสิตปริญญาเอก สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำงานตลอดมา

8. ขอขอบพระคุณ ครอบครัวศรีมงคล ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้โอกาส ยอมรับและเข้าใจในสิ่งที่ดิฉันทำตลอดมาและตลอดไป

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญภาพ | ฏ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 แนวคิดและทฤษฎี | 3 |
| 2.1.1 แสงและการมองเห็น | 3 |
| 2.1.2 การวัดแสง | 13 |
| 2.1.3 Signal-to-noise ratio (SNR) | 15 |
| 2.1.4 การฉายแสง | 16 |
| 2.1.5 ช่วงพลวัต | 17 |
| 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 18 |
| 2.2.1 การใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลแทนเครื่องมือวัดแสง | 18 |
| 2.2.2 ISO 15739:2003 | 18 |
| 2.2.3 ISO 21550:2004 | 22 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 28 |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 28 |
| 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ | 28 |
| 3.1.2 เครื่องมือ | 29 |
| 3.1.3 สารเคมี | 30 |
| 3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย | 30 |

หน้า

3.2.1 สร้างอุปกรณ์และวัสดุสำหรับจำลองฉากภายใน.................................. 30
3.2.2 สร้างอุปกรณ์และวัสดุสำหรับจำลองฉากภายนอก................................ 33
3.2.3 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยวิธีทั่วไป.................................... 34
3.2.4 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................................ 34
3.2.5 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก...................................................................................... 35
3.2.6 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยผู้สังเกต.................................... 35
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล........................................................................... 36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.................................................... 37
4.1 ผลการทดลองการผลิตแผ่นลิ่มแสงสเกลสีเทา.................................... 37
4.2 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน 40
4.2.1 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน.................. 41
4.2.2 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต.............................................................. 47
4.2.3 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวีธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในและการทดสอบด้วยตาเปล่าเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป..................................................... 49
4.3 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก.......................................................................................... 50
4.3.1 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก................ 51
4.3.2 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวีธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป.......................................................................................... 55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ................................... 57
5.1 สรุปผลการวิจัย................................................................................ 57
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.......................................................................... 57

หน้า

5.3 ข้อเสนอแนะ........................................................................................................ 58
รายการอ้างอิง............................................................................................................ 59
ภาคผนวก.................................................................................................................. 60
ภาคผนวก ก........................................................................................................... 61
ภาคผนวก ข........................................................................................................... 71
ภาคผนวก ค........................................................................................................... 76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์............................................................................................. 82

# สารบัญตาราง

| | | |
|---|---|---|
| | | หน้า |
| ตารางที่ 2.1 | หน่วยและสัญลักษณ์คำศัพท์ของแสงสว่าง……………………………………… | 6 |
| ตารางที่ 2.2 | การวัดแสงและการวัดการแผ่รังสี………………………………………….... | 14 |
| ตารางที่ 4.1 | ค่าความดำของแบคลิตฟิล์ม……………………………………………………… | 38 |
| ตารางที่ 4.2 | ค่าความเข้มของโฟตอนและความสว่างของฟิล์มแบคลิต…………........…. | 39 |
| ตารางที่ 4.3 | ค่าความเข้มของโฟตอนและความสว่างของแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS.. | 40 |
| ตารางที่ 4.4 | คุณสมบัติทางกายภาพของกล้องแต่ละรุ่น…………………………………........ | 41 |
| ตารางที่ 4.5 | ช่วงพลวัตเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต 20 คน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลของกล้องดิจิทัลทั้ง 5 รุ่น.......................... | 48 |
| ตารางที่ 4.6 | แสดงค่าคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีทั่วไปกับช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ........................................................................................... | 49 |
| ตารางที่ 4.7 | ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างช่วงพลวัตที่ได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่จำกัดขอบเขตการมองเห็นของสายตามนุษย์กับช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต......................................................................... | 50 |
| ตารางที่ 4.8 | คุณสมบัติทางกายภาพของกล้องแต่ละรุ่น….............................................. | 51 |
| ตารางที่ 4.9 | ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงพลวัต................................................................ | 55 |
| ตารางที่ ก1 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล A ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... | 61 |
| ตารางที่ ก2 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล B ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... | 62 |
| ตารางที่ ก3 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล C ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... | 63 |
| ตารางที่ ก4 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล D ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... | 64 |
| ตารางที่ ก5 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล E ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... | 65 |
| ตารางที่ ก6 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล A ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน..................................................................... | 66 |
| ตารางที่ ก7 | ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล B ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน..................................................................... | 67 |

หน้า

ตารางที่ ก8 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล C ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 68
ตารางที่ ก9 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล D ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 69
ตารางที่ ก10 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล E ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 70
ตารางที่ ข1 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล A ด้วยตาเปล่า................................................. 71
ตารางที่ ข2 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล B ด้วยตาเปล่า................................................. 72
ตารางที่ ข3 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล C ด้วยตาเปล่า................................................. 73
ตารางที่ ข4 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล D ด้วยตาเปล่า................................................. 74
ตารางที่ ข5 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล E ด้วยตาเปล่า................................................. 75
ตารางที่ ค1 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล F ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... 76
ตารางที่ ค2 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล G ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... 77
ตารางที่ ค3 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล H ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป........... 78
ตารางที่ ค4 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล F ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 79
ตารางที่ ค4 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล G ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 80
ตารางที่ ค4 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล H ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน........................................................................ 81

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 การตกกระทบของแสงจากวัตถุเข้าสู่ดวงตา.................................... 4
ภาพที่ 2.2 CIE โครมาติซิตี ไดอะแกรม ที่มีการกำหนดรายละเอียดสีพิกัด x,y................ 5
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงอย่างสม่ำเสมอ......................... 7
ภาพที่ 2.4 การวัดค่าเรเดียน.......................................................................... 8
ภาพที่ 2.5 การพิจารณาพื้นที่เชิงอนุพันธ์บนพื้นผิวทรงกลม........................................ 9
ภาพที่ 2.6 ลักษณะการเดินทางของฟลักซ์ส่องสว่าง............................................... 10
ภาพที่ 2.7 ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบกับผิววัตถุของตัวรับที่มุมมุมหนึ่ง...................... 11
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและพื้นที่ที่ฉายของแหล่งกำเนิดแสงเชิงอนุพันธ์....................................................................................... 12
ภาพที่ 2.9 ความสว่างที่ฉายเข้าหากล้องถ่ายภาพแบบถอดชุดเลนส์ได้............................ 20
ภาพที่ 2.10 การวัดสัญญาณรบกวนจากแสงที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ.......................... 20
ภาพที่ 2.11 แผนภูมิทดสอบการวัดสัญญาณรบกวน...................................................... 21
ภาพที่ 2.12 ตัวอย่างแผนภูมิทดสอบ.......................................................................... 23
ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของอิเล็กโทรนิกส์สแกนเนอร์ ที่ X คือค่าความดำและY เป็นค่าความส่องสว่าง.................................................................. 27
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบจำลองฉากภายใน..................... 32
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบจำลองฉากภายนอก.................. 33
ภาพที่ 4.1 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น A เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ..................................................................... 42
ภาพที่ 4.2 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น B เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ..................................................................... 43
ภาพที่ 4.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น C เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ..................................................................... 44
ภาพที่ 4.4 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น D เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ..................................................................... 45

หน้า

ภาพที่ 4.5 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น D เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ........................................................................ 46
ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลของกล้องรุ่น A............................. 48
ภาพที่ 4.7 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น F เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ........................................................................ 52
ภาพที่ 4.8 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น G เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ........................................................................ 53
ภาพที่ 4.9 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น H เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ........................................................................ 54

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การถ่ายภาพดิจิทัลมีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของผู้คนในปัจจุบัน เพื่อให้การถ่ายภาพออกมามีคุณภาพเทียบเท่าการมองเห็นของตามนุษย์มากที่สุด กล้องถ่ายภาพนิ่งดิจิทัลได้มีการพัฒนาให้มีความสามารถในการบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงมากได้ อย่างไรก็ดีความสามารถในการบันทึกน้ำหนักสียังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากความสว่างที่แตกต่างกันระหว่างบริเวณที่รับแสงและบริเวณที่ไม่รับแสงมีค่าสูงเกินกว่าที่กล้องดิจิทัลจะสามารถเก็บรายละเอียดการลำดับค่าความสว่างตั้งแต่ช่วงความสว่างต่ำสุดจนถึงช่วงค่าความสว่างสูงสุดไว้ได้อย่างครบถ้วน โดยตัวแปรที่ใช้ระบุความสามารถในการบันทึกน้ำหนักสีหรือการบันทึกรายละเอียดของกล้องดิจิทัลนั้น เรียกว่า ช่วงพลวัต (dynamic range) เอกสาร ISO 15739 [1] ได้ระบุนิยามของช่วงพลวัตไว้ หมายถึง อัตราส่วนของความสว่างสูงสุดต่อค่าความสว่างต่ำสุดสำหรับ signal-to-noise ratio (SNR) การบันทึกความละเอียดภาพด้วย SNR ต้องมีค่าตั้งแต่ 1 ขึ้นไปถึงสามารถใช้ได้ การบันทึกด้วย SNR ที่ต่ำกว่า 1 นั้นไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนมีค่ามากกว่าสัญญาณรับเข้า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการบันทึกน้ำหนักสีขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวรับภาพ (image sensor) แต่เนื่องจากความสามารถของตัวรับภาพในการบันทึกน้ำหนักสีมีข้อจำกัด ผู้ผลิตกล้องดิจิทัลแต่ละรายจึงพยายามปรับปรุงความสามารถในการบันทึกน้ำหนักสีให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสูง มีการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้ในการขยายช่วงของน้ำหนักสีด้วยการถ่ายภาพด้วยค่าการเปิดรับแสงที่แตกต่างกัน ประมวลผลผ่านอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นมานำมารวมกันเป็นภาพเดียว [2] ถือว่าเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมในการใช้เพื่อขยายช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล เมื่อมีช่วงน้ำหนักสีกว้างขึ้น จึงเห็นรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นด้วย หรือผู้ผลิตกล้องดิจิทัลบางรายได้พัฒนาการจัดเรียงตัวของเซนเซอร์ขึ้นมาใหม่ เพื่อขยายการบันทึกน้ำหนักสีให้มากกว่าที่เซนเซอร์กล้องดิจิทัลปกติจะทำได้

เมื่อช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลได้กลายมาเป็นสิ่งที่มีบทบาทในการผลิตน้ำหนักสีของภาพ ผู้ใช้กล้องดิจิทัลจึงให้ความสำคัญกับช่วงพลวัตเป็นอันดับแรกเมื่อจะตัดสินใจเลือกซื้อกล้อง และผู้วิจารณ์กล้องดิจิทัลเองก็ได้นำเสนอการเปรียบเทียบช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลแต่ละรุ่นไว้เป็นแนวทางให้ผู้บริโภคตัดสินใจ ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตกล้องแต่ละรายได้จึงได้ทำการประเมินช่วงพลวัตและกล่าวรับรองคุณภาพช่วงพลวัตของตนเองว่ามีคุณภาพดี โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าช่วงพลวัตจะกระทำในหน่วยของการเปิดรับแสง (exposure stop) การประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลนิยมใช้การถ่ายภาพกระดาษสีเทากลางที่มีค่าการสะท้อนแสง 18% ด้วยค่าการเปิดรับ

แสงที่แตกต่างกัน แล้วนำค่าการบันทึกแสงในแต่ละภาพไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าการเปิดรับแสงและค่าพิเซล เรียกว่า เส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (characteristic curve) [3] แต่การประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องถ่ายภาพจำนวนมากเพื่อนำมาวิเคราะห์ จึงทำให้ใช้เวลามาก อีกทั้งไม่มีวัตถุจริงในธรรมชาติไว้เปรียบเทียบน้ำหนักสี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการประเมินช่วงพลวัตแบบใหม่เรียกว่า การหาช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ ซึ่งวิธีทำให้การประเมินช่วงพลวัตสามารถแล้วเสร็จได้ภายในการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว เป็นการช่วยลดขั้นตอน ประหยัดเวลา และสะดวกกับการประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างกล่องจำลองฉากธรรมชาติและวิธีประเมินผลช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพนิ่งดิจิทัลแบบสะท้อนแสงเลนส์เดี่ยวด้วยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว
2. เปรียบเทียบช่วงพลวัตของกล้องแต่ละชนิด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างอุปกรณ์ประเมินช่วงพลวัต และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ผ่านเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการประเมินระหว่างวิธีทั่วไปและอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson product-moment correlation coefficient) [4]

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว
2. ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

### 2.1.1 แสงและการมองเห็น

แสงเป็นพลังงานการแผ่รังสี (radiant energy) ที่กระตุ้นประสาทตาให้เกิดการมองเห็นและเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นได้ เราสามารถอธิบายพลังงานการแผ่รังสีหรือสเปกตรัม (spectrum) ได้โดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

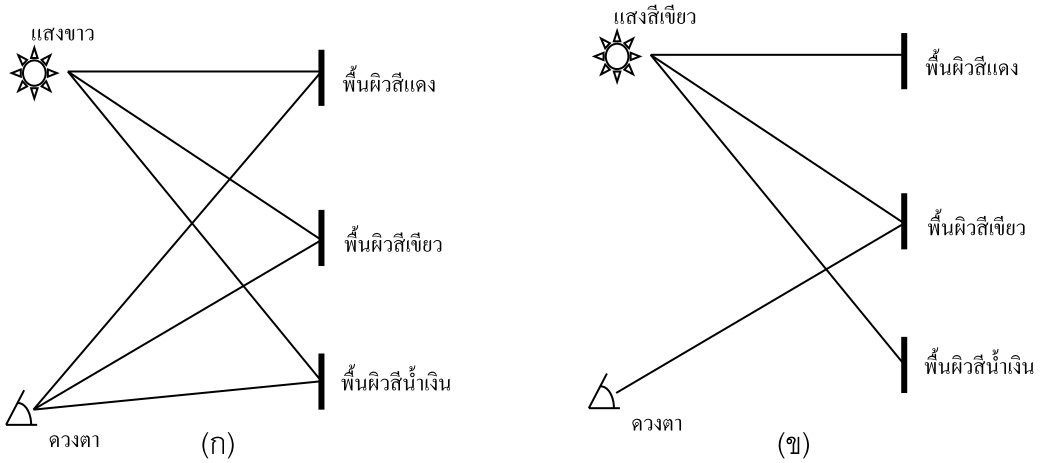
สำหรับกระบวนการที่ทำให้เกิดการมองเห็น ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวดัดแปร ตัวรับ และตัวตีความ

แหล่งกำเนิดแสง (source) ได้แก่ ดวงอาทิตย์ เปลวไฟ หรือแหล่งกำเนิดแสงไฟฟ้าอื่นๆ

ตัวดัดแปร (modifier) เป็นวัตถุทางธรรมชาติ หรือวัตถุที่ผลิตขึ้นตามธรรมชาติซึ่งจะสะท้อนหรือส่งผ่านแสงมายังดวงตา (วัตถุเหล่านี้อาจดูดซับแสงได้ด้วย) เช่น กระจก หน้าต่าง ดวงจันทร์ หรือหน้าของหนังสือ เป็นต้น

ตัวดัดแปรทำหน้าที่เปลี่ยนคุณลักษณะของแสงของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดแสงในทันที กล่าวคือ เมื่อแหล่งกำเนิดแสงสีขาวตกกระทบพื้นผิวสีแดง เขียว น้ำเงิน ดังแสดงในภาพที่ 2.1(ก) คลื่นแสงทั้งสามจะสะท้อนเข้าดวงตา นั่นคือ คลื่นแสงสีแดงสะท้อนจากพื้นผิวสีแดง ส่วนคลื่นแสงสีเขียวและคลื่นแสงสีน้ำเงินสะท้อนจากพื้นผิวสีเขียวและสีน้ำเงินตามลำดับ ทำให้ดวงตามองเห็นพื้นผิวเป็นสีแสง สีเขียว และสีน้ำเงิน

เมื่อแหล่งกำเนิดแสงสีเขียวตกกระทบพื้นผิวเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (ข) คลื่นสีเขียวจะสะท้อนจากพื้นสีเขียวเข้าสู่ดวงตา ส่วนพื้นผิวที่เหลืออีก 2 ประเภท จะดูดซับแสงสีเขียวจึงไม่มีแสงสะท้อนทำให้พื้นผิวเหล่านั้นมืด ดังนั้น สีที่ดวงตามองเห็นจึงขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงและตัวดัดแปร




ภาพที่ 2.1 การตกกระทบของแสงจากวัตถุเข้าสู่ดวงตา

ตัวรับ (receiver) คือ ดวงตาซึ่งทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ รับปริมาณของแสงและเป็นตัวดำเนินการเกี่ยวกับปริมาณนั้น เพื่อส่งไปยัง ตัวตีความ (interpreter) หรือสมอง ซึ่งจะทำหน้าที่รับปริมาณจากจักษุประสาท (optic nerve) ถอดรหัสสัญญาณและทำให้ผู้มองรับรู้และเข้าใจว่าวัตถุที่เห็นนั้นคืออะไร

ปัจจัยต่อการมองเห็นมี 5 ประการ

(1) ขนาดของวัตถุหรือขนาดของชิ้นงาน (size)

ถ้าขนาดของวัตถุหรือชิ้นงานเพิ่มขึ้น จะทำให้มองเห็นได้ชัดเจนขึ้น

(2) ความเปรียบต่างของการส่องสว่าง (luminance contrast)

ความเปรียบต่างของการส่องสว่างคือ ความแตกต่างระหว่างการส่องสว่างของวัตถุที่มองเห็นกับการส่องสว่างของฉากที่รองรับ ถ้าความเปรียบต่างของการส่องสว่างเพิ่มขึ้น จะทำให้การมองเห็นชัดขึ้น ปริมาณแสงที่ตกกระทบวัตถุคือ ความเข้มแสงซึ่งมีหน่วยเป็น ฟุตแคนเดิล (fc) ส่วนการส่องสว่างของวัตถุที่มองเห็นและการส่องสว่างของฉากที่รองรับมีหน่วยเป็น ฟุตแลมเบิร์ต (fL) ความเปรียบต่างการส่องสว่าง มีสมการ *(2.1)* ดังนี้

$$\text{ความเปรียบต่างของการส่องสว่าง} = \frac{|L_f - L_b|}{L_b} \qquad \dots (2.1)$$

เมื่อ $L_f$ เป็นการส่องสว่างของวัตถุที่มองเห็น

$L_b$ เป็นการส่องสว่างของฉากที่รองรับ

ค่าความเปรียบต่างของการส่องสว่าง บอกให้ทราบว่า เราสามารถมองเห็นวัตถุได้ชัดเจนเพียงใด

(3) เวลาหรือความเร็วในการมองเห็น (time)

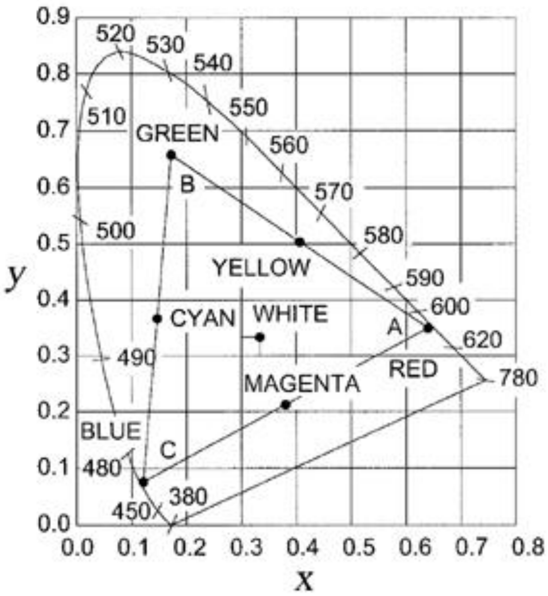
ถ้าใช้เวลามองวัตถุนานขึ้น จะทำให้มองเห็นวัตถุชัดเจนขึ้น เพราะกระบวนการมองเห็นวัตถุใดๆ มีลักษณะไม่ต่อเนื่องและต้องใช้เวลาในการปรับสภาพตาเพื่อให้ดวงตามองเห็นได้ทัน ทั้งนี้เวลายังแปรผันกับค่าการส่องสว่างด้วย หากวัตถุนั้นมีค่าการส่องสว่างมากจะใช้เวลามองน้อยลงหรือดวงตามองเห็นได้เร็ว แต่ถ้าวัตถุสะท้อนมีค่าการส่องสว่างน้อยจะต้องใช้เวลามากในการเพ่งมองวัตถุ จึงจะสามารถมองเห็นวัตถุได้อย่างชัดเจน

(4) การส่องสว่างของวัตถุ (luminance)

การส่องสว่างของวัตถุคือ ความสามารถของวัตถุในการสะท้อนแสงเข้าสู่ดวงตาขณะวัตถุนั้นกระทบแสง ถ้าการส่องสว่างของวัตถุเพิ่มขึ้น จะทำให้มองเห็นวัตถุชัดขึ้นด้วย

(5) สี (color)

สีที่ดวงตามองเห็นขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง และวัตถุที่สะท้อนหรือส่งผ่านมายังดวงตา ดังนั้น ในการออกแบบระบบแสงสว่างให้มีคุณภาพจึงควรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสีด้วย ระบบมาตรฐานสากลของการส่องสว่าง (International Commission on Illumination System: CIE System) เป็นระบบที่มีการกำหนดรายละเอียดสีในพิกัด x,y ของไดอะแกรมสี ดังภาพที่ 2.2




ภาพที่ 2.2 แผนภูมิ CIE โครมาติซิตี (CIE Chromaticity diagram) ที่มีการกำหนดพิกัดสี x,y [5]

พิกัด x,y นี้คำนวณได้โดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของหลอดไฟและการตอบสนองจากการสังเกตการเปรียบเทียบความเข้มของสีตามมาตรฐานของ CIE ต่อแม่สีของแสงหรือสีปฐมภูมิ (primary color) 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบสีของแหล่งกำเนิดแสงแบบหนึ่ง คือ วัตถุดำ (black body) ที่ได้รับพลังงานไฟฟ้า กล่าวคือ ถ้าป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับวัตถุดำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อุณหภูมิของวัตถุดำจะเปลี่ยนแปลง ทำให้สีของวัตถุดำเปลี่ยนเป็นสีส้ม สีเหลือง สีเหลืองอ่อน และสีขาว ที่อุณหภูมิต่างกัน เราเรียกอุณหภูมิสี (color temperature) มีหน่วยเป็นเคลวิน K (Kelvin: เมื่อ K = $^{o}$C+273) อุณหภูมิสีนี้ใช้เป็นตัวกำหนดสีของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ซึ่งใกล้เคียงกัน เช่น ที่อุณหภูมิ 2500 K วัตถุดำจะมีสีเหลืองเทียบกับสีของหลอดโซเดียมความดันสูงหรือที่อุณหภูมิ 2800 K วัตถุดำตะมีสีเหลืองอ่อนเมื่อเทียบกับสีของหลอดอินแคนเดสเซนต์ เป็นต้น

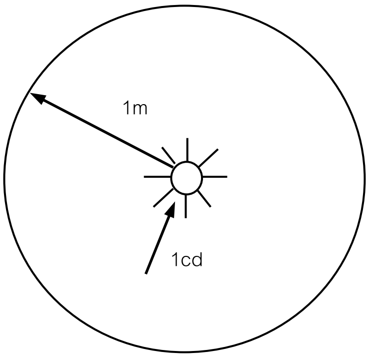
(6) คำศัพท์ของแสงสว่าง (lighting terms)

คำศัพท์ของแสงสว่าง สัญลักษณ์และหน่วยแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 หน่วยและสัญลักษณ์คำศัพท์ของแสงสว่าง

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วยอังกฤษ | หน่วยเมตริก |
|---|---|---|---|
| $I$ | ความเข้มส่องสว่าง | แคนเดลา | แคนเดลา |
| $\Phi$ | ฟลักซ์ส่องสว่าง | ลูเมน | ลูเมน |
| $E$ | ความเข้มแสง | ลูเมน/ตารางฟุต (ฟุตแคนเดิล) | ลูเมน/ตารางเมตร (ลักซ์) |
| $M$ | ความหนาแน่นส่องสว่าง | ลูเมน/ตารางฟุต | ลูเมน/ตารางเมตร |
| | | แคนเดลา/ตารางฟุต | แคนเดลา/ตารางเมตร |
| $L$ | ความส่องสว่าง | ลูเมน-วินาที | ลูเมน-วินาที |
| $Q$ | ปริมาณแสง | | |

หน่วยพื้นฐาน คือ แคนเดลา (candela;cd) ซึ่งเป็นหน่วยของความเข้มส่องสว่าง (luminous intensity; $I$) หรือ แรงเทียน (candlepower) พิจารณาภาพที่ 2.3




ภาพที่ 2.3 ลักษณะการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงอย่างสม่ำเสมอ

จากภาพที่ 2.3 แสดงแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดสม่ำเสมอขนาด 1 cd ที่ศูนย์กลางของทรงกลมรัศมี 1 m เมื่อความสม่ำเสมอ (uniform) หมายถึง แหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มส่องสว่างเท่ากันหมดในทุกทิศทางและ จุด (point) หมายถึง แหล่งกำเนิดแสงทีมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับมิติของทรงกลมที่ใช้พิจารณา แหล่งกำเนิดแสงนี้สามารถปล่อยหรือให้ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง (luminous flux: $\Phi$ ) ออกมาอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง

ฟลักซ์ส่องสว่างมีหน่วยเป็นลูเมน (lumen: lm) ปริมาณฟลักซ์ส่องสว่าง 1 lm หมายถึง อัตราของพลังงานการส่องสว่างตกกระทบลงบนพื้นผิวขนาด 1 ตารางเมตร ซึ่งวางตัวห่างจากแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดสม่ำเสมอขนาด 1 cd เป็นระยะ 1m เนื่องจากพื้นที่ผิวของทรงกลมคือ $4\pi r^2$ ดังนั้น ฟลักซ์ส่องสว่างทั้งหมดที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงในภาพที่ 2.3 คือ $4\pi$ lm อีกนัยหนึ่ง แหล่งกำเนิดแสงแบบจุดสม่ำเสมอขนาด 1cd ให้ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง $4\pi$ lm

เมื่อฟลักซ์ส่องสว่างเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง แล้วตกลงบนวัตถุที่สะท้อน ความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกลงบนพื้นผิวนั้น เรียกว่า ความเข้มแสง (illuminance: E) เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังนี้

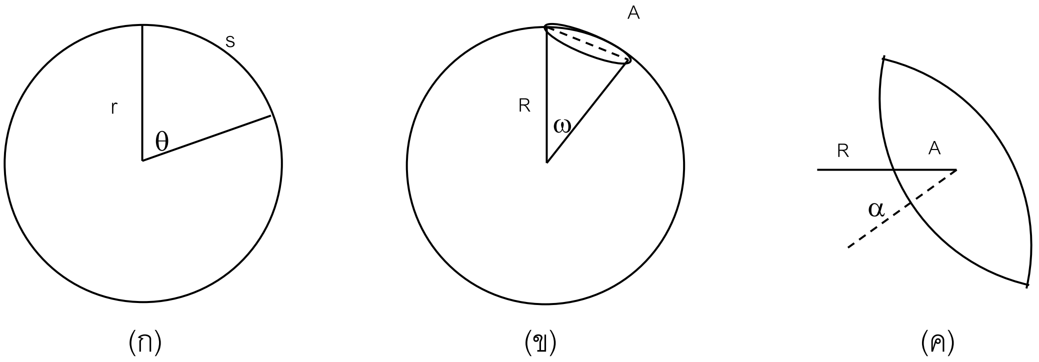
$$E = \frac{\Phi}{A} \qquad \ldots (2.2)$$

เมื่อ *A* เป็นพื้นที่ผิว และเทอมของแสงสว่างอีกเทอมหนึ่ง คือ ปริมาณแสง (quantity of light: *Q*) ปริมาณแสง เป็นพลังงานการส่องสว่างในช่วงเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็น ลูเมน – วินาที (lm.s)

แต่ในทางปฏิบัติ แหล่งกำเนิดแสงส่วนมากไม่เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดและมีการแผ่กระจายแสงไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ พื้นผิวตัวรับจะไม่ตั้งฉากกับลำแสงหรือเส้นรังสี (ray) ที่ตกกระทบนพื้นผิวนั้น ทำให้แหล่งกำเนิดแสงไม่ได้ปล่อยเส้นรังสีในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวอย่างเดียว ดังนั้น จึงต้องหานิยามและสมการทั่วไปของเทอมแสงสว่างที่เหมาะสม กรณี

แหล่งกำเนิดแสงแบบไม่เป็นจุดและให้เส้นรังสีอย่างไม่สม่ำเสมอ จะพิจารณาเป็นองค์ประกอบเชิงอนุพันธ์ขนาดเล็กหรือแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด โดยการสังเกตแหล่งกำเนิดแสงที่ระยะห่างมากเมื่อเทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดแสง จะเห็นว่า ฟลักซ์ส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง เป็นการแผ่รังสีออกจากจุดที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยที่แผ่รังสีออกจากจุด และอธิบายได้จากมุมตัน

มุมตัน คือ มุมที่เกิดจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่โยงไปยังพื้นที่ส่วนตัดบนผิวทรงกลม มุมตันนี้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของส่วนตัดบนพื้นผิวทรงกลมยกกำลังสอง มีหน่วยเป็นสตีเรเดียน (steradiant;sr) อธิบายได้จากภาพที่ 2.4

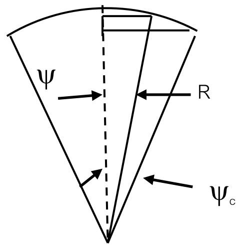



ภาพที่ 2.4 การวัดค่าเรเดียน

ภาพที่ 2.4 แสดงการวัดค่าเรเดียน (Radian;rad) ของมุม 2 มิติ เมื่อ $s$ เท่ากับ $r$ และมุม $\theta$ เป็น 1 rad เนื่องจากเส้นรอบวงกลมคือ $2\pi r$ ทำให้ระนาบที่ล้อมรอบจุดจุดหนึ่งมีค่า $2\pi$ rad

จากภาพที่ 2.4 เมื่อพิจารณาในลักษณะ 3 มิติ จะได้ภาพที่ 2.4 (ค) เมื่อ $A$ พื้นที่ของส่วนตัดบนพื้นผิวทรงกลมเท่ากับ $R^2$ และ $\omega$ เป็นมุมตัน 1 สตีเรเดียน เนื่องจากพื้นที่ผิวของทรงกลมคือ $4\pi R^2$ ทำให้ระนาบที่ล้อมจุดจุดหนึ่งในปริภูมิมีค่า $4\pi$ sr ถ้าพื้นที่ $A$ เอียงทำมุม $\alpha$ กับเวคเตอร์รัศมีที่ผ่านศูนย์กลางของ $A$ ดังภาพ พื้นที่นี้เป็นพื้นที่ที่ฉายของ $A$ มีค่าเป็น $A \cos\alpha$

ค่ามุมตัน ($\omega$) หาได้จากมุมของกรวย ($\psi_c$) ที่มียอดอยู่ที่ศูนย์กลางของทรงกลมในภาพที่ 2.5




ภาพที่ 2.5 แสดงการพิจารณาพื้นที่เชิงอนุพันธ์บนพื้นผิวทรงกลม

จากภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า พื้นที่เชิงอนุพันธ์หรือพื้นที่ย่อยของส่วนตัดบนพื้นผิวทรงกลม คือ

$$dA = 2\pi R \sin \psi \, R \, d\psi \qquad ...(2.3)$$

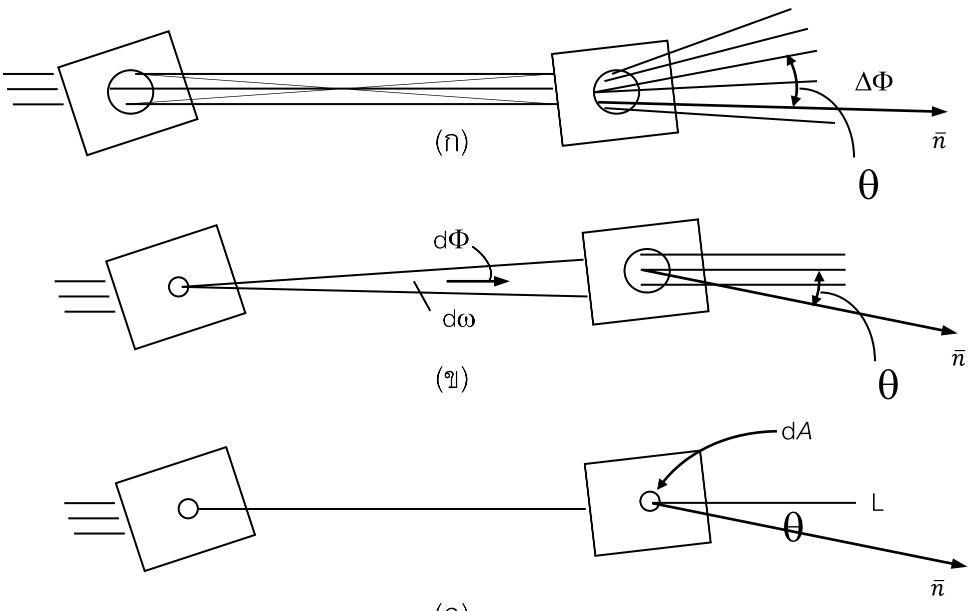
เมื่ออินทิเกรตสมการ *(2.3)* จาก 0 ถึง $\psi_c$ จะได้

$$A = 2\pi R^2 (1-\cos \psi_c) \qquad ...\ (2.4)$$

ทำให้ได้

$$\omega = \frac{A}{R^2} = 2\pi (1-\cos \psi_c) \qquad ...\ (2.5)$$

สำหรับนิยามการส่องสว่างพิจารณาได้จากภาพที่ 2.6 กล่าวคือ เมื่อฟลักซ์ส่องสว่างเดินทางจากทางด้านซ้ายมายังด้านขวาและผ่านช่องทาง 2 ช่อง ถ้าเส้นแนวฉากหรือเส้นตั้งฉาก ($\bar{n}$) เท่ากับช่องทางด้านขวาเอียงทำมุม $\theta$ กับทิศทางของการแพร่กระจายแสงทำให้ปริมาณของฟลักซ์ $\Delta\Phi$ กระจายออกจากช่องทางด้านขวาดังภาพที่ 2.6




ภาพที่ 2.6 ลักษณะการเดินทางของฟลักซ์ส่องสว่าง

เมื่อลดขนาดของช่องทางด้านซ้ายจนเกือบปิดสนิท ดังภาพที่ 2.6 ปริมาณเชิงอนุพันธ์ของฟลักซ์ $d\Phi$ ที่ออกจากช่องทางด้านซ้ายในมุมตันเชิงอนุพันธ์ $d\omega$ ทำให้กลุ่มของเส้นรังสีขนาดเล็กเบนตรงไปยังช่องทางด้านขวา เมื่อลดขนาดช่องลงจนเกือบปิดสนิท ทำให้เส้นรังสีเส้นหนึ่งจากกลุ่มผ่านไปได้ พื้นที่ที่ฉายของช่องทางด้านขวาในทิศทางเส้นรังสี คือ

$$dA_p = dA\cos\theta \qquad \text{… (2.6)}$$

นิยามของความส่องสว่างของเส้นรังสี คือ

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA\cos\theta} \qquad \text{… (2.7)}$$

สมการ *(2.7)* ทำให้ทราบว่า ความส่องสว่าง คือผลหารของฟลักซ์ส่องสว่างเชิงอนุพันธ์ที่ส่วนย่อยของพื้นผิวซึ่งล้อมรอบจุดที่ใช้พิจารณาต่อการแพร่กระจายเชิงอนุพันธ์ของกรวยในทิศทางที่กำหนด การแพร่กระจายนี้ เกิดจากผลคูณของมุมตันเชิงอนุพันธ์ของกรวยกับภาพฉายเชิงอนุพันธ์บนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางที่กำหนด ดังนั้นจากสมการข้างต้นนี้ จะได้สมการความสัมพันธ์ของ ความเข้มส่องสว่าง

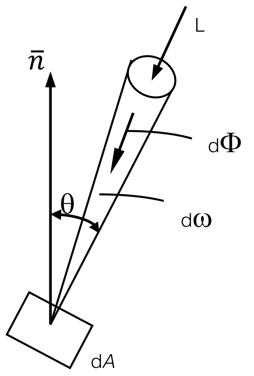
$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \qquad \text{… (2.8)}$$

จากสมการ *(2.8)* ความเข้มส่องสว่าง คือ อัตราส่วนของฟลักซ์ส่องสว่างเชิงอนุพันธ์ต่อมุมตันเชิงอนุพันธ์

ในเงื่อนไขของความส่องสว่างเฉลี่ยของพื้นที่แหล่งกำเนิดแสงที่ฉายต้องมีค่าคงที่ เมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลง หรือมุมตันที่ตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสงที่จุดรับจะแปรผันกับระยะทางยกกำลังสอง ดังนั้น $\omega$ มีการแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง เมื่อแหล่งกำเนิดแสงนั้น เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด ทำให้หาความเข้มส่องสว่างได้ และจากความสัมพันธ์ทั้งหมด จะได้สมการความเข้มแสง ดังนี้

$$L = \frac{d\left(\frac{d\Phi}{dA}\right)}{d\omega\, cos\theta} = \frac{dE}{d\omega\, cos\theta} \qquad \text{... (2.9)}$$

จากสมการ *(2.9)* จะได้ว่า ความเข้มแสง (*E*) คือ ความหนาแน่นของพื้นที่เชิงอนุพันธ์ของฟลักซ์ส่องสว่าง ขณะที่ฟลักซ์ส่องสว่างเข้าสู่ *dA* และความส่องสว่างเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงภายนอก




ภาพที่ 2.7 ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบกับผิววัตถุของตัวรับที่มุมมุมหนึ่ง

จากภาพที่ 2.7 ฟลักซ์ส่องสว่างจะตกกระทบกับผิววัตถุของตัวรับที่มุมมุมหนึ่ง ถ้าหมุน *dA* ให้ตั้งฉากกับทิศทางของ $L$ ฟลักซ์ส่องสว่างที่ส่วนตัดจะมีค่ามากขึ้น ทำให้ *E* เพิ่มขึ้น สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$E = E_n cos\theta \qquad \text{... (2.10)}$$

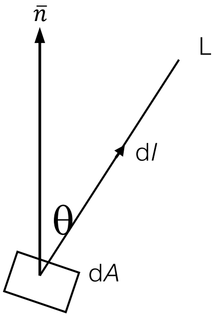
เมื่อ $E_n$ เป็นความเข้มแสงขณะพื้นผิวของตัวรับตั้งฉากกับฟลักซ์ส่องสว่างที่เกิดขึ้น เรียกสมการนี้ว่า กฎโคไซน์ของแลมเบิร์ต (Lambert’s Cosine Law)

ถ้าใส่อินทิกรัลตลอดพื้นที่ของแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมดจะได้ว่า

$$E = \int_{s} \; Lcos\theta \; d\omega \qquad \text{... (2.11)}$$

$$L = \frac{dI}{dAcos\theta} \qquad \text{... (2.12)}$$

พิจารณาจากภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มส่องสว่าง คือ ความส่องสว่างคูณด้วยพื้นที่ที่ฉายของแหล่งกำเนิดแสงเชิงอนุพันธ์




ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและพื้นที่ที่ฉายของแหล่งกำเนิดแสงเชิงอนุพันธ์

พิจารณาค่า ความหนาแน่นส่องสว่าง ทำได้โดยกำหนดความเข้มแสงใหม่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ ความหนาแน่นส่องสว่างมีสมการดังต่อไปนี้

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \qquad \text{... (2.13)}$$

ปริมาณแสง หาค่าได้จาก

$$Q = \int_{S}^{T} \Phi(t)dt \qquad \text{... (2.14)}$$

ปริมาณแสงจะให้พลังงานความส่องสว่างออกมาหรือรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงในคาบเวลา T โดยมีค่าส่งกลับของฟลักซ์ส่องสว่างแปรผันกับเวลา [5]

### 2.1.2 การวัดแสง

ในการวัดแสงแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้

#### 2.1.2.1 การวัดการแผ่รังสี (Radiometry)

แสงในลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น กำลัง ปริมาณ ความเข้ม สมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแสงเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นนี้ การวัดนี้เรียกว่า การวัดการแผ่รังสี การวัดสมบัติเหล่านี้จะต้องมีส่วนประกอบของแสง เวลา พื้นที่ และทิศทาง ทั้งนี้เพราะสมบัติของแสงที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ต้องพิจารณาดูแสงว่ามีพฤติกรรมอย่างไรในที่ว่าง (space) สมบัติพื้นฐานของแสงที่ควรรู้จักคือ กำลังการแผ่รังสี หรือฟลักซ์ (radiant power, *P*) ของแหล่งแสงใดๆ มีหน่วยเป็นวัตต์ (watts, *W*) บอกถึงปริมาณพลังแสงต่อหน่วยเวลา วัตต์มาจากจูลต่อวินาที

เมื่อพิจารณาว่าแหล่งแสงมีขนาดเล็กมาก เป็นจุด (point light source) ที่เปล่งแสงออกไปในทุกทิศทางรอบจุด เราจะเห็นความสว่างโดยรอบเป็นรูปทรงกลม เมื่อต้องการทราบความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (radiant intensity, $I_e$) จากจุดกำเนิดในทิศทางที่กำหนด ณ พื้นที่ใดๆ ของผิวทรงกลม ค่านี้มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อสตีเรเดียน (Watt/steredian, W/sr) สตีเรเดียนหมายถึง มุมของรูปทรงกรวยของแสงในทรงกลมเรียกว่ามุมตัน (solid angle) อีกกรณีหนึ่งคือปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ (irradiance, $E_e$) ใช้หน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (Watt/m$^2$, W/ m$^2$) หน่วยนี้ไม่กำหนดทิศทางและมุม ในบางครั้งหมายถึง Exitance คือ พื้นที่ที่สามารถเปล่งแสงออกมาอาจจะเป็นการสะท้อน กระเจิง หรือเรืองแสง หน่วยสุดท้ายคือการแผ่รังสี (radiance, $L_e$) เป็นการรวมสมบัติความเข้มและปริมาณกำลังต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น วัตต์/สตีเรเดียน/ตารางเมตร

#### 2.1.2.2 การวัดแสง (Photometry)

การวัดแสงที่สัมพันธ์กับการมองเห็นหรือการรับรู้ของคน ความยาวคลื่นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแสงที่ความยาวคลื่น 550 nm และ 700nm มีกำลังแผ่รังสีเท่ากัน เช่น 10 W พบว่าการรับรู้ของคนเราจะรู้สึกว่า ที่ 550 nm มีความสว่างมากกว่า ถึง 240 เท่า ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นวิธีหาหน่วยใหม่ที่สามารถบอกค่าแสงที่มีความสัมพันธ์หรือ

มีความหมายตรงกับการรับรู้ในระบบการมองเห็นของคน สมบัติทางแสงที่รวมเอาการมองเห็นของคนเข้าไปด้วยนี้มีหน่วยที่คู่ขนานกับหน่วยทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สมบัติของแสงกำลังการแผ่รังสี ตรงกับหน่วยทางจิตวิทยาฟิสิกส์ (psychophysical unit) คือ ลูเมน เป็นหน่วยสำหรับลูมินัสฟลักซ์ (luminous flux, *F*) *F* คือ ค่าที่มาจาก *P* คูณด้วย $V(\lambda)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงกับการรับรู้ของคน และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = K_m \int P(\lambda)V(\lambda)d(\lambda) \qquad \text{... (2.15)}$$

เมื่อ $K_m$ คือ ผลการส่องสว่างของการแผ่รังสีและมีค่าเท่ากับ 638 lm/W

สำหรับการเห็นแบบโฟโทปิก จากสมการนี้ ค่าลูมินัสฟลักซ์ สามารถคำนวณได้จาก *P* และมีหน่วยเป็น ลูเมน ตัวอย่างเช่น ลูมินัสฟลักซ์ของเรเดียนฟลักซ์ ของ 1 W ที่ 555nm คือ 638 lm เมื่อ *V*(555)=1

ตารางที่ 2.2 การวัดแสงและการวัดการแผ่รังสี

| **หัวข้อ** | **การวัดการแผ่รังสี** | (Radiometry) | **การวัดแสง** | (Photometry) |
|---|---|---|---|---|
| ปริมาณแสง | พลังงานการแผ่รังสี (radiant energy) | *J* | พลังงานการส่องสว่าง (luminous energy) | lm.s |
| ปริมาณแสง/หน่วยเวลา | กำลังการแผ่รังสี หรือฟลักซ์ (radiant flux) | *P* J/s, W | กำลังการส่องสว่าง (luminous flux) | *F*, lm |
| ปริมาณแสง/หน่วยเวลา/หน่วยมุมตัน | ความเข้มการแผ่รังสี (radiant intensity) | $I_e$ W/sr | ความเข้มแสง (luminous intensity) | *I* Lm/sr (cd) |
| ปริมาณ/หน่วยเวลา/หน่วยพื้นที่ | อิราเดียน (irradiance) | $E_e$ W/m$^2$ | ความสว่าง (illuminance) | *E* Lm/m$^2$, lux, (lx) |
| ปริมาณ/หน่วยเวลา/หน่วยมุมตัน/หน่วยพื้นที่ | การแผ่รังสี (radiance) | $L_e$ W/sr/m$^2$ | ความส่องสว่าง (luminance) | *L* Lm/sr/m$^2$, cd/m$^2$ |

### 2.1.2.3 **ความสัมพันธ์ระหว่างการวัดการแผ่รังสีและการวัดแสง**

กำลังการแผ่รังสี จิตนาการได้ว่าเป็นลำแสงที่ส่องออกมาเป็นเส้น ส่วนฟลักซ์ จินตนาการว่าเป็นกลุ่มของเส้นลำแสงที่กำหนดในหนึ่งหน่วยเวลา ตรงกับกำลังส่องสว่างในเรื่องของการวัดแสง

ความสว่างปริมาณฟลักซ์ของแสงเป็นจำนวนลูเมนบนพื้นที่ 1 หน่วยตารางเมตร มีหน่วยเป็น lx ถ้าปริมาณแสง 10 lm ตกลงบนพื้นที่ 1 $m^2$ ความสว่างคือ 10 lx ซึ่งตรงกับคำจำกัดความทางกายภาพของการแผ่รังสี คือ อิราเดียน

ความเข้มแสง หมายถึง ปริมาณฟลักซ์ในช่วง 1 มุมตัน 1 มุมตัน หมายถึง พื้นที่หารด้วยกำลังสองของระยะทางจากแหล่งแสงความเข้มของแสงมีหน่วยเป็นกำลังเทียน ซึ่งตรงกับคำจำกัดความทางกายภาพ ความเข้มการแผ่รังสี

ความส่องสว่างเป็นค่าที่บอกปริมาณแสงที่มาจากวัตถุ 1 หน่วยพื้นที่ของวัตถุ ภายใน 1 มุมตันรูปกรวยของ 1 sr ไปยังผู้สังเกต ซึ่งตรงกับคำจำกัดความทางกายภาพของการแผ่รังสี [6]

### 2.1.3 Signal-to-noise Ratio (SNR)

SNR คือ ค่าสัดส่วนของสัญญาณค่อสัญญาณรบกวน ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{SNR} = \frac{Signal}{Noise} \qquad \text{... (2.16)}$$

ค่าสัดส่วนนี้สามารถอธิบายถึงข้อมูลของสัญญาณและสัญญาณรบกวน รวมถึงบ่งบอกคุณภาพในการมองเห็นอีกด้วย จากสมการกล่าวได้ว่า ถ้า SNR มีค่ามากกว่า 1 นั่นคือสัญญาณมีค่ามากกว่าสัญญาณรบกวนนั่นเอง

เมื่อนำ SNR มาเขียนในรูปของลอการิทึมจะได้ว่า

$$\text{SNR} = 10log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right) = 20log_{10}\left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}}\right) \qquad \text{... (2.17)}$$

เมื่อ *P* คือ ค่าเฉลี่ยของกำลัง

*A* คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS)

SNR มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการให้นิยามของช่วงพลวัต ในทางภาพ SNR คืออัตราส่วนของค่าเฉลี่ยพิกเซลต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการ *(2.18)*

$$\text{SNR} = \mu / \sigma \qquad \text{... (2.18)}$$

เมื่อ $\mu$ คือค่าเฉลี่ยพิกเซล และ $\sigma$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
หรือเรียกว่า อัตราส่วนความเปรียบต่าง [7]

2.1.4 **การฉายแสง** (exposure)

การฉายแสงเป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและเวลา มีหน่วยเป็นฟุตแคนเดลลาวินาที ซึ่งมาจากการฉายแสงเทียนมาตรฐานที่ระยะ 1 เมตร ในเวลา 1 วินาที สำหรับกล้องถ่ายภาพ เวลาการฉายแสงจะควบคุมด้วยความเร็วชัตเตอร์ เมื่อนำมาคำนวณผ่านอุปกรณ์ และประมวลผลพบว่า ค่าการฉายแสงอยู่ในเทอมความสัมพันธ์ของรูรับแสงของเลนส์และเวลาชัตเตอร์ [8] เมื่อมีการเปิดรูรับแสงกว้าง ปริมาณแสงที่เข้ามาสู่ฉากรับก็จะเพิ่มขึ้น หมายถึงเป็นการเพิ่มการฉายแสงนั่นเอง ในทำนองเดียวกัน สำหรับเวลาการลั่นชัตเตอร์ หากใช้เวลาการลั่นชัตเตอร์นานก็ส่งผลให้การฉายแสงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน [9] สำหรับการคำนวณค่าการฉายแสงได้แบ่งไว้ในระบบการวัดแผ่รังสี และระบบการวัดแสงเช่นเดียวกัน ดังนี้

ในระบบการวัดแผ่รังสี ค่าการฉายแสงเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$H_e = E_e \cdot t \qquad \text{... (2.19)}$$

เมื่อ

$H_e$ คือ ค่าการฉายรังสี (radiant exposure)

$E_e$ คือ ค่าการส่องสว่าง (radiance)

$t$ คือ เวลาการฉายแสง (exposure time)

ในระบบการวัดแสง นิยามตามสมการดังต่อไปนี้

$$H_v = E_v \cdot t \qquad \text{... (2.20)}$$

$H_v$ คือ ค่าการฉายแสง (luminous exposure)

$E_v$ คือ ค่าความสว่าง (Illuminance)

$t$ คือ เวลาการฉายแสง (exposure time)

ค่าการฉายแสงนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แสดงผลต่อไป

### 2.1.5 ช่วงพลวัต

กล้องถ่ายภาพถือเป็นอุปกรณ์บันทึกแสงชนิดหนึ่ง โดยแสงที่เดินทางผ่านเลนส์กล้องจะถูกบันทึกลงในตัวรับภาพ (image sensor) ซึ่งตัวรับภาพนี้ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ากล้องจะสามารถบันทึกแสงได้มากน้อยเพียงใด ตัวรับภาพแบบดิจิทัลนั้นจะมีอุปกรณ์เช่น CCD, CMOS ทำหน้าที่ในการรับแสง เมื่อพิจารณาแสงในลักษณะของอนุภาคแล้วเรียกว่า โฟตอน เมื่อโฟตอนเดินทางเข้ามาตัวรับภาพจะทำหน้าที่ในการเก็บบันทึกโฟตอนไว้ และอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่สามารถเก็บบันทึกได้สูงสุดกับจำนวนโฟตอนต่ำที่สุดนี้เองที่เป็นตัวบ่งชี้ช่วงพลวัต แต่ในทางภาพจะคำนวณอัตราส่วนของความเข้มแสงแทน

การประเมินช่วงพลวัต ทำได้โดยการถ่ายภาพกระดาษสีเทากลาง 18% ด้วยค่าการเปิดรับแสงที่แตกต่างกันทีละ 1 สตอป อย่างน้อย 16 ภาพ จากนั้นนำภาพทั้งหมดมาหาค่าพิกเซลแล้วเขียนกราฟระหว่างค่าการเปิดรับแสง และค่าความสว่างของแต่ละพิกเซลในภาพถ่าย กราฟที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่าช่วงพลวัต [10,11]

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 การใช้กล้องถ่ายภาพแทนเครื่องมือวัดความสว่าง

ในการวัดค่าความส่องสว่าง โดยทั่วไปแล้วจะวัดด้วยอุปกรณ์แบบจุดต่อจุด แต่การวัดตรงด้วยอุปกรณ์นี้ใช้เวลานาน มีแนวโน้มว่าจะเกิดการคลาดเคลื่อนระหว่างทำการวัด และการจัดเก็บข้อมูลอาจไม่ละเอียดพอสำหรับใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของแสง ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าเพื่อให้ได้วิธีที่จะสามารถบันทึกค่าแสงในบริเวณกว้าง ๆ มีความละเอียดสูง ใช้ระยะเวลาสั้น และราคาอุปกรณ์ไม่แพง ซึ่งภาพถ่ายมีศักยภาพที่จะเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียด นักวิจัยจึงใช้ประโยชน์จากภาพถ่ายนำมาประยุกต์เพื่อวัดค่าความสว่าง โดยค่าสี RGB จะถูกแปลงไปอยู่ในรูปค่าสี CIE ไตรสติมูลัส (CIE tristimulus) โดยผ่านฟังก์ชันการเทียบค่าพิกเซลของกล้องกับค่าความสว่าง การค้นคว้าก่อนหน้านี้ได้มีการถ่ายภาพเดี่ยว (single photograph) แล้วนำมาแปลงผลเป็นค่าความสว่าง แต่เนื่องจากการถ่ายภาพเดี่ยวมีช่วงพลวัตที่จำกัด ส่งผลให้การไล่น้ำหนักของแสงไม่สามารถแสดงออกมาได้อย่างละเอียด

ภาพช่วงพลวัตสูง (high dynamic range image) คือ ภาพที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพหลายๆ ค่าการเปิดรับแสง แล้วนำมารวมกันด้วยซอฟต์แวร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการบันทึกลำดับค่าความสว่างในภาพนั้น ๆ เมื่อมีช่วงน้ำหนักสีกว้างขึ้น จึงส่งผลให้มีรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคดังกล่าวมาแปลงค่าข้อมูลภาพให้กลายเป็นค่าความสว่างเพื่อวัดความสว่างของวัตถุ ผู้วิจัยได้วิจัยในสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกเหนือจากห้องมืด คือ ห้องสำนักงาน ฉากภายนอกที่มีเมฆและไม่มีเมฆ ในการทำภาพช่วงพลวัตสูงและการแปลงข้อมูลเป็นค่าความสว่างจะใช้โปรแกรมโฟโทสเฟียร์ (Photosphere) จากนั้นทำการประเมินผลด้วยวิธีเปรียบเทียบค่าความสว่างที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องลูมิแนนซ์มิเตอร์ (luminance meter) ผลการทดลองพบว่าภาพช่วงพลวัตสูงที่ถูกทำขึ้นด้วยโปรแกรมโฟโทสเฟียร์ มีค่าความสัมพันธ์กับการวัดด้วยอุปกรณ์เท่ากับ 98.8% ซึ่งสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวัดค่าความสว่างแทนการวัดด้วยอุปกรณ์ได้ในกรณีที่มีจุดที่ต้องการวัดในปริมาณมาก ๆ [12]

### 2.2.2 ISO15739:2003

เอกสารได้บันทึกมาตรฐานวิธีการวัดและรายงานผลเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณรับเข้า และช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพ ภายในเอกสารได้ระบุถึงรายละเอียดของเงื่อนไข และขั้นตอนในการวัดช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพ ดังนี้

### 2.2.2.1 เงื่อนไขการทดสอบ

ความสว่าง (illuminant) ที่ใช้อ้างอิงในการวัดสัญญาณรบกวนจะใช้จากแหล่งกำเนิดแสงแบบแสงกลางวัน (daylight) หรือ หลอดไส้ (tungsten) แบบแสงกลางวันนั้นกำหนดอุณหภูมิหลอดไว้ที่ 5,500 K และหลอดไส้ที่ 3,050 K

ในการวัดสัญญาณรับกวนและช่วงพลวัตจำเป็นต้องถ่ายภาพแผนภูมิทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดองศาการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบลงบนวัตถุ โดยแกนรังสีตกกระทบสูงสุดกำหนดไว้ไม่เกิน 45$^{\circ}$ ส่วนรังสีสะท้อนจะอยู่ในช่วง 40$^{\circ}$ $\leq 0 \leq$ 50$^{\circ}$ ค่าสมดุลขาวปรับตามแหล่งกำเนิดแสง ควรให้เวลาตัวรับแสงเก็บโฟตอนเป็นเวลาไม่เกิน 1/30 วินาที และควรทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิห้องที่ 23$^{\circ}$C $\pm$ 2$^{\circ}$C และที่ความชื้น 50% $\pm$ 20% การวัดอุณหภูมิห้องควรวัดในระยะที่ห่างจากกล้องที่จะทดสอบระหว่าง 0.1 m และ 0.2 m

การชั่งน้ำหนักสีของสัญญาณรบกวน (color noise weighting) ในที่นี้ใช้คำนวณค่าการส่องสว่าง เพราะค่ารับเข้าเมื่อแปลงสัญญาณแล้วจะมีทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณคือ R, G และ B ดังนั้น ค่าการส่องสว่างสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

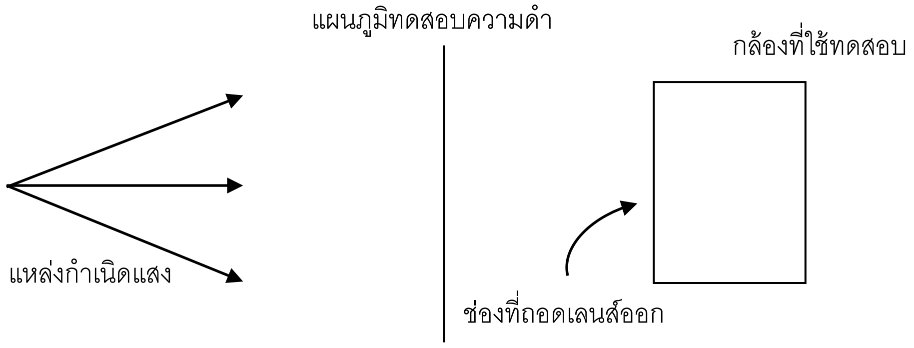
$$Y = 0.2125R + 0.7154G + 0.0721B \qquad \text{... (2.21)}$$

นอกจากนี้ ในขณะทดสอบต้องปิดระบบการปิดอัดภาพ (image compression) เนื่องจากการบีบอัดนั้นมีผลต่อสัญญาณรบกวนจริงที่รับเข้ามา

### 2.2.2.2 ขั้นตอนการวัดสัญญาณรบกวน

การวัดสัญญาณรบกวนในกล้องถ่ายภาพนั้น จะใช้ค่า signal-to-noise ratio (SNR) เป็นตัวชี้วัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคือกล้องถ่ายภาพที่สามารถถอดชุดเลนส์ ควบคุมขนาดการเปิดรูรับแสง และความเร็วชัตเตอร์ได้ รวมถึงกล้องทั่วไป วิธีการทดสอบมีดังนี้

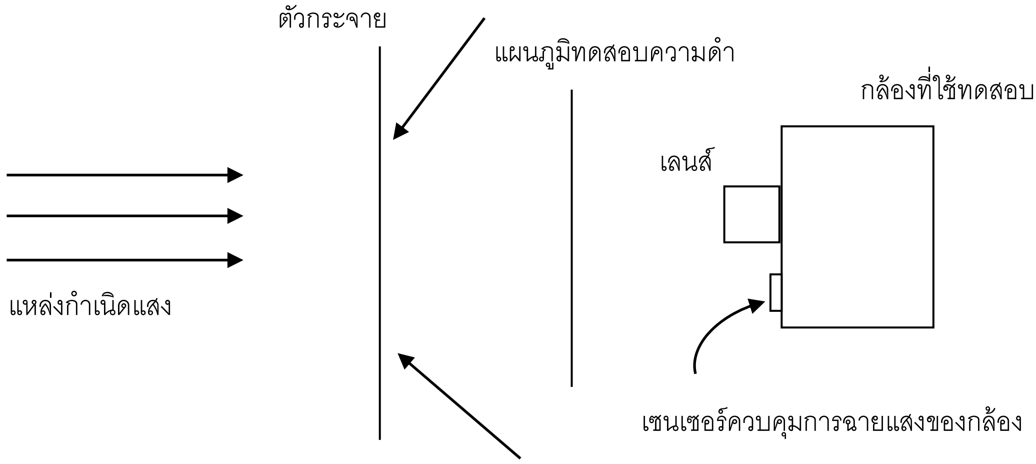
1) กล้องถ่ายภาพแบบถอดชุดเลนส์ได้ การทดสอบด้วยอุปกรณ์นี้ ทำได้โดยการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีลักษณะดังที่ระบุไว้ในเงื่อนไขการทดสอบ และระยะทางการฉายแสงจะต้องมีขนาดที่เป็นอัตราส่วนต่าง เช่น ขนาดไกลที่สุดของแหล่งกำเนิดแสงและเซนเซอร์จะต้องไม่ไกลเกิน 1:12 ของระยะทางทั้งหมด ดังที่แสดงในภาพที่ 2.9




ภาพที่ 2.9 ความสว่างที่ฉายเข้าหากล้องถ่ายภาพแบบถอดชุดเลนส์ได้

แหล่งกำเนิดแสงควรมีค่าความแปรปรวนของแอมพลิจูดไม่ควรเกิน ± 2 % แผนภูมิทดสอบควรมีขนาดใหญ่พอที่จะบังช่องรับแสงที่ถอดเลนส์ออกของกล้องถ่ายภาพ

2) กล้องทั่วไป ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับกล้องแบบถอดเลนส์ได้ ปรับเลนส์โฟกัสไว้ที่ไม่จำกัด (infinity) ในการทดสอบนี้มีการเพิ่มตัวกระจายเข้ามากั้นระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแผนภูมิทดสอบเพื่อควบคุมให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงสม่ำเสมอก่อนที่จะเดินทางถึงแผนภูมิทดสอบ โดยระยะทางต้องมีอัตราส่วนต่ำกว่า 1/10 ของระยะโฟกัสต่ำสุดของกล้อง จัดตำแหน่งดังภาพที่ 2.10




ภาพที่ 2.10 การวัดสัญญาณรบกวนจากแสงที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

แผนภูมิทดสอบควรบังแค่ส่วนของเลนส์แต่ไม่บังส่วนเซนเซอร์ควบคุมการฉายแสงของกล้อง

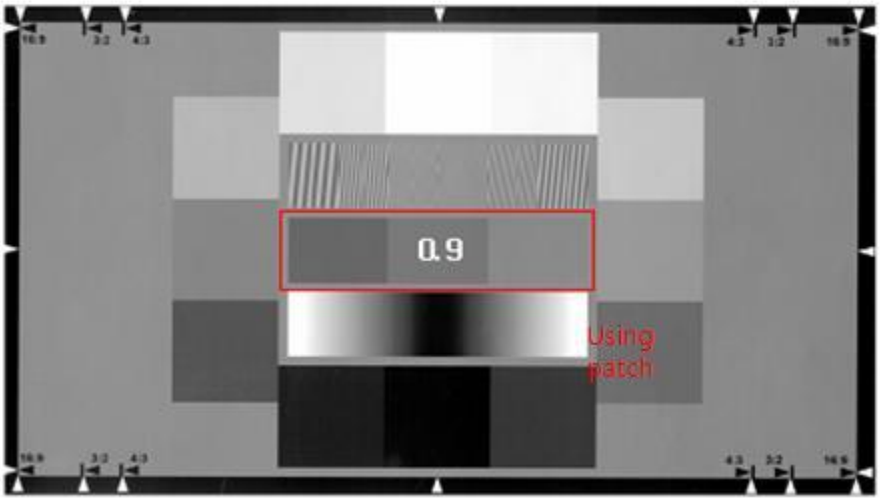
### 2.2.2.3 การวัดค่าความดำแผนภูมิทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบ

แผ่นทดสอบในแผนภูมิที่มีค่าความดำ 0.9 (ค่าการสะท้อน 13%) ควรใช้เป็นสีเทาค่าการสะท้อน 18% อ้างอิง โดยกำหนดว่าค่าสัญญาณที่รับเข้าจะเท่ากับ 18% ของสัญญาณทั้งหมดที่กล้องรับเข้า ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 140%

สำหรับแผ่นทดสอบที่มีค่าความดำ 2.0 (ค่าการสะท้อน 1%) ควรใช้เป็น สีดำอ้างอิง สำหรับสัญญาณรับเข้าที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงพลวัตของกล้องถ่ายภาพ

### 2.2.2.4 การวัดสัญญาณรบกวนของแผนภูมิทดสอบ

ในการวัดสัญญาณรบกวนของแผนภูมิทดสอบกระทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับกล้องถ่ายภาพ แต่จะตั้งค่าการเปิดรับแสงของกล้องเป็นแบบอัตโนมัติ แหล่งกำเนิดแสงเปิดให้มีค่าความสว่างสูงสุด ใช้ทดสอบแผนภูมิทดสอบได้ทั้งแบบโปร่งแสงและทึบแสง ตัวอย่างแผนภูมิทดสอบ แสดงดังภาพที่ 2.11




ภาพที่ 2.11 แผนภูมิทดสอบการวัดสัญญาณรบกวน

### 2.2.2.5 การคำนวณและการรายงานผลการทดสอบ

การทดสอบวัดสัญญาณรบกวนของแผนภูมิทดสอบควรทำในพื้นที่ที่มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในพื้นที่ที่กำหนดไม่ต่ำกว่า 64x64 พิกเซล วัดจากกึ่งกลางของรูปที่ต้องการทดสอบ

สัญญาณรบกวนจะรายงานผลด้วยค่า SNR ซึ่งถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับค่าแผ่นทดสอบที่มีค่าการสะท้อน 18% เมื่อมีสัญญาณรับเข้า จะทำการคำนวณตามสมการดังนี้

$$\mathrm{SNR} = \frac{L_{sat} \times 0.18 \times incremental\ gain}{\sigma_{total}} \quad \text{... (2.22)}$$

เมื่อ $L_{sat}$ คือ ค่าการส่องสว่างของแผ่นทดสอบเป้าหมายที่ได้จากค่าการฉายแสงสูงสุดจากแหล่งกำเนิดแสง สำหรับในระบบภาพ 8 บิต กล่าวได้ว่ามีค่าเท่ากับ 255

0.18 คือ ค่าการสะท้อน 18% ของแผ่นทดสอบที่มีค่าความดำ 0.9

incremental gain คือ อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ OECF

$\sigma_{total}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมของสัญญาณรบกวนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ *n* ตัวอย่าง คำนวณจากสมการ

$$\sigma_{\mathrm{total}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \sigma_{total,j}^{2}} \quad \text{... (2.23)}$$

2.2.2.6 **ช่วงพลวัต** ISO DSC

ช่วงพลวัต ISO DSC คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อต่ำสุดของความสว่างที่ไม่มีตัวกระจายกั้น ซึ่งจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 1 ในการหาช่วงพลวัตนี้ใช้แผ่นทดสอบที่มีค่าความดำ 2.0 หรือ สีดำอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบค่าสัญญาณรับเข้ากับสัญญาณรบกวน คำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\mathrm{SNR} = \frac{L_{sat} \times 0.014 \times incremental\ gain \times 100}{average\ black\ temporal\ noise} \quad \text{... (2.24)}$$

เมื่อ 0.014 คือ ค่าการสะท้อน 1.4% ของแผ่นทดสอบที่มีค่าความดำเท่ากับ 2.0

X 100 คือ อัตราส่วนของค่าการสะท้อนของแผ่นทดสอบที่เป็นเป้าหมายเมื่อเทียบกับการสะท้อนแสงสูงสุดที่ 100%

Black temporal noise คือ ค่าสัญญาณรบกวนชั่วคราวของแผ่นทดสอบสีดำอ้างอิง [1]

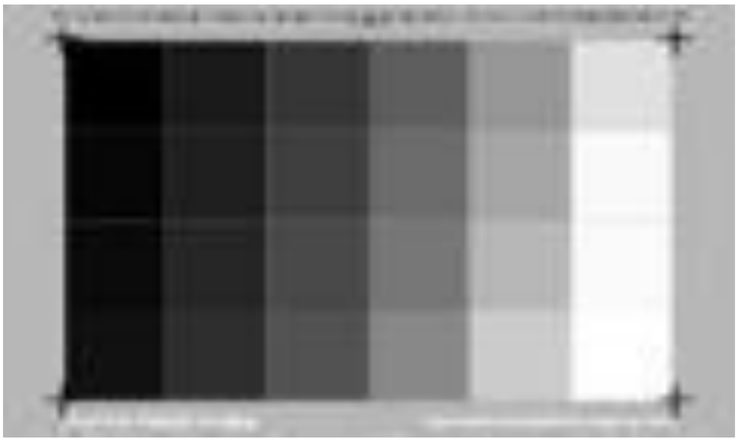
2.2.3 21550:2004

เอกสารนี้ได้บันทึกมาตรฐานวิธีการวัดความสามารถในการบันทึกน้ำหนักสีหรือช่วงพลวัตของสแกนเนอร์ โดยเฉพาะในบริเวณมืด ในการวัดช่วงพลวัตของสแกนเนอร์ทำได้จาก

การวัดแผนภูมิทดสอบที่ออกแบบมาเพื่อประเมินน้ำหนักสีของฟิล์ม และสแกนเนอร์โดยเฉพาะ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำมาเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ โดยส่วนโค้งนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป ทั้งนี้ภายในเอกสารยังได้ระบุรายละเอียดของวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงกระบวนการวัดช่วงพลวัตไว้ ดังนี้

**2.2.3.1 แผนภูมิทดสอบ**

แผนภูมิทดสอบนี้สามารถทำออกมาในหลายๆ ขนาดได้ สำหรับวัสดุที่ใช้วัดแบบสะท้อนจะใช้ขนาด 100x150 ตารางมิลลิเมตร และวัสดุที่ใช้วัดแบบส่องผ่านจะใช้ขนาด 24x26 ตารางมิลลิเมตร เนื่องจากงานที่ใช้กับสแกนเนอร์มีทั้งแบบสะท้อน และส่องผ่าน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบด้วยแผนภูมิทดสอบทั้งสองชนิด ตัวอย่างของแผนภูมิทดสอบแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ตัวอย่างแผนภูมิทดสอบ

1) แผนภูมิทดสอบแบบสะท้อน

มาตรฐานในการทำแผนภูมิทดสอบนั้นมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

ลักษณะเฉพาะทั่วไปของแผนภูมิทดสอบ จะต้องเป็นวัสดุพิมพ์ภาพขาวดำ และวัสดุจะต้องเป็นไปตามที่ระบุใน ISO 14524 และไม่ลบเลือนง่าย ความสูงและความกว้างของแผนภูมิทดสอบรวมทั่วทุกบริเวณแล้วไม่ควรเล็กว่า 100 มิลลิเมตร และรูปแบบของสเกลสีเทาที่ปรากฏบนแผนภูมิ จะมีรูปแบบสีเทารวมไม่ต่ำกว่า 15 รูปแบบ ค่าความดำต่ำสุดของแผ่นสีเทาควรสูงกว่า 0.15 และค่าความดำสูงสุดไม่ควรน้อยกว่า 2.0 รูปแบบของแผนภูมิทดสอบควรมี

จำนวนระดับสีเทาไม่ต่ำกว่า 15 ระดับ และค่าความดำควรมีค่าตั้งแต่ 0.15 ถึง 2.0 และควรมีเครื่องหมายกำหนดขอบเขตของรูปแบบระดับสีเทาทั้งหมด เพื่ออำนวยความสะดวกในการนำไปวิเคราะห์หลังจากทำการสแกนแผนภูมิทดสอบแล้ว และควรมีข้อมูลสำคัญระบุอยู่บนแผนภูมิทดสอบ เช่น ชื่อผู้ผลิต วันที่ผลิต หรือบาร์โค้ดที่ช่วยระบุถึงข้อมูลเบื้องต้นได้

2) แผนภูมิทดสอบแบบส่องผ่าน

มาตรฐานในการทำแผนภูมิทดสอบนั้นมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

แผนภูมิทดสอบแบบส่องผ่านมีลักษณะเป็นผ่นฟิล์มขาวดำ และวัสดุจะต้องเป็นไปตามที่ระบุใน ISO 14524 และไม่ลบเลือนง่าย ความสูงและความกว้างของแผนภูมิทดสอบไม่ควรต่ำกว่า 16.7 มิลลิเมตร ควรมีค่า Callier Q ของวัสดุกำกับอยู่ โดยค่า Callier Q ได้จากผลหารของความหนาแน่นของการกระจายกับความหนาแน่นของการฉาย หากค่า Callier Q มากกว่า 1.05 จะรายงานคู่กับค่าช่วงพลวัต

แผนภูมิทดสอบไม่ควรมีระดับสีเทาต่ำกว่า 25 ระดับ และค่าความดำควรมีค่าตั้งแต่ 0.15 ถึง 3.6 สิ่งที่ควรระบุลงในแผนภูมิทดสอบคือ ค่าความต่างระหว่างระดับที่มืดที่สุดและระดับที่สว่างมากที่สุด ควรมีเครื่องหมายกำหนดขอบเขตบริเวณมุมของระดับสีเทา และควรมีข้อมูลสำคัญระบุอยู่บนแผนภูมิทดสอบ เช่น ชื่อผู้ผลิต วันที่ผลิต หรือบาร์โค้ดที่ช่วยระบุถึงข้อมูลเบื้องต้นได้

#### 2.2.3.2 เงื่อนไขในการทดสอบ

ตามมาตฐานเงื่อนไขการวัดควรทำการวัดภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ วัดภายใต้อุณหภูมิที่ 23±2 องศาเซียลเซียส และความชื้นที่ 50±20%

#### 2.2.3.3 การวัดสแกนเนอร์ OECF

เครื่องสแกนเนอร์จะทำการสแกนแผนภูมิทดสอบ ในการกำหนดการตั้งค่าเครื่องสแกนเนอร์ OECF

การตั้งเครื่องสแกนเนอร์ OECF สามารถตั้งให้เป็นโหมด RGB หรือสเกลสีเทาก็ได้ โดยสามารถกำหนดความละเอียดได้ดังต่อไปนี้

$$R = R_{max}/k \qquad \text{... (2.25)}$$

ที่ R คือ ความละเอียดของสแกนเนอร์

$R_{max}$ คือ ความละเอียดสูงสุดของสแกนเนอร์

$k$ คือ จำนวนเต็ม

### 2.2.3.4 การคำนวณช่วงพลวัตของสแกนเนอร์

ค่าความสว่างจะคำนวณจากค่าสีปฐมภูมิ แดง เขียว และน้ำเงิน ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Y_i = 0.2126R_i + 0.7152G_i + 0.0722B_i \qquad \text{... (2.26)}$$

ที่ i คือ จำนวนของแผ่นทดสอบสีเทา และ

Y คือ ค่าความสว่าง

ช่วงพลวัตของสแกนเนอร์จะคำนวณ ดังนี้

$$d_r = d_{max} - d_{min} \qquad \text{... (2.27)}$$

เมื่อ $d_r$ คือช่วงพลวัตของสแกนเนอร์

$d_{max}$ คือค่าความดำที่ signal to noise ratio เท่ากับ 1 และ

$d_{min}$ คือค่าความดำต่ำสุดที่สัญญาณขาออกของความสว่าง OECF appears to be unclipped.

การกำหนด signal to noise ratio จะกำหนดตาม ISO 12232:1998 ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{S}{N}(X_i) = \left(\frac{T_i g_i}{\sigma_i}\right) \qquad \text{... (2.28)}$$

ที่ $\sigma_i$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดำของแผ่นระดับสีเทาในแผนทดสอบ

$g_i$ คือ ค่าความดำที่เพิ่มขึ้นจากแผ่นระดับสีเทา $i$

$T_i$ คือ ระดับการส่องผ่านของแผ่นระดับสีเทา $i$

$i$ คือ จำนวนแผ่นระดับสีเทา ที่ $i_{min}$คือ ค่าความสว่างสูงสุด และ $i_{max}$ เป็นค่าความสว่างต่ำสุดของแผ่นระดับสีเทา

โดยการคำนวณหาระดับการส่องผ่าน ทำได้ดังนี้

$$T_i = 10^{-di} \qquad \text{... (2.29)}$$

สำหรับสแกนเนอร์สี กับความสว่าง และค่าความต่างของสี ที่จะบอกถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความดำของแผ่นระดับสีเทานั้น อาจคำนวณได้จาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสว่าง ค่าเบียงเบนมาตรฐานของผลต่างระหว่างสีแดงกับความสว่าง และค่าเบียงเบนมาตรฐานของผลต่างระหว่างสีน้ำเงินกับความสว่าง ตามสมการที่ได้ระบุไว้ใน ISO 12232:1998 ดังนี้

$$\sigma(i) = [\sigma(Y)^2 + 0.64\sigma(R-Y)^2 + 0.16\sigma(B-Y)^2]^{\frac{1}{2}} \quad \text{... (2.30)}$$

ค่าความดำที่เพิ่มขึ้นถูกกำหนดค่าดังนี้

$$g_i = \frac{\left(\frac{Y_i - Y(i+1)}{T_i - T(i+1)} + \frac{Y(i-1) - Y_i}{T(i-1) - T_i}\right)}{2} \quad ; i_{min} < i < i_{max} \quad \text{... (2.31)}$$

ที่ $g_i$ คือ ค่าความดำที่เพิ่มขึ้นจากแผ่นระดับสีเทา

$Y_i$ คือ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสีของแต่ละระดับที่สามารถมองเห็นได้

$T_i$ คือ ค่าการส่องผ่านของแผ่นระดับสีเทา

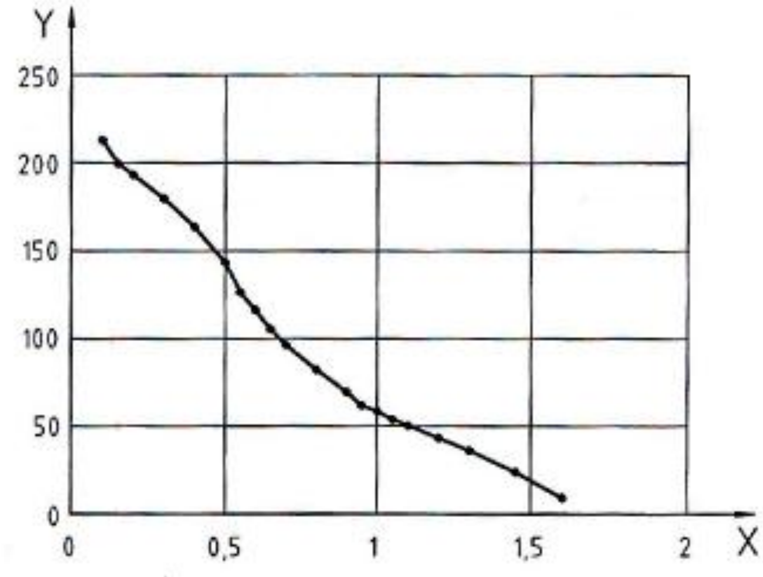
$i$ คือ จำนวนของแผ่นระดับสีเทา ที่ $i_{\min}$ คือ ค่าความสว่างสูงสุด และ $i_{max}$เป็นค่าความสว่างต่ำสุดของแผ่นระดับสีเทา

**2.2.3.5 การนำเสนอผล**

จะมีทั้งรูปแบบตารางข้อมูล และเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดำ และค่าความส่องสว่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ทั้งนี้ ค่าความเปรียบต่างของสแกนเนอร์แทนด้วย

$$10^{dr} : 1 \quad \text{... (2.32)}$$

เช่น ถ้า $d_r$ = 3 ค่าความเปรียบต่างจะเท่ากับ 1000:1 [13]




ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของอิเล็กโทรนิกส์สแกนเนอร์

ที่ X คือค่าความดำและY เป็นค่าความส่องสว่าง [13]

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่สามารถประเมินช่วงพลวัตได้ด้วยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียวด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ สำหรับกล่องจำลองฉากธรรมชาติได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภาย ซึ่งจำลองสภาวะฉากที่อยู่ในห้องซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องผ่านหน้าต่างเข้ามาด้วยความเข้มแสงสูง ทำให้เกิดความเปรียบต่างของแสงสูงตามไปด้วย และกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก ซึ่งจำลองสภาวะฉากร่มเงาไม้ที่มักพบทั่วไปในฉากเมื่อถ่ายรูปกลางแจ้ง

การออกแบบกล่องจำลองแบบภายในจึงจำเป็นต้องมีวัสดุและอุปกรณ์สำคัญคือแหล่งกำเนิดแสงประเภทแสงกลางวัน 2 แหล่ง เพื่อสร้างสภาวะความเปรียบต่างของแสงให้มีค่าสูงมาก และแผ่นสเกลสีเทา 2 ชนิด คือ แบบโปร่งแสงและแบบทึบแสง ออกแบบให้มีค่าความดำต่างกันระดับละ 1/3 สตอป และควบคุมให้ค่าความส่องสว่างของแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองชนิดต่อเนื่องกันด้วยการปรับความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง และเมื่อความส่องสว่างของแผ่นสเกลสีเทามีค่าต่อเนื่องกัน แผ่นสเกลสีเทานี้จะทำหน้าที่เป็นวัสดุประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลเมื่อถ่ายภาพ เพียงแค่ครั้งเดียว

กล่องจำลองแบบภายนอกถูกออกแบบให้แบ่งเป็นส่วนที่ได้รับแสง และส่วนที่เป็นร่มเงาด้วยฟิล์มกรองแสง วัสดุสำคัญคือ แผ่นสเกลสีเทาแบบทึบแสงที่เหมือนกัน 2 ชุด ชุดแรกวางในส่วนที่ได้รับแสง และชุดที่สองวางในฝั่งที่เป็นร่ม และทำการควบคุมให้ความส่องสว่างของแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองฝั่งต่อเนื่องกันด้วยการปรับระดับร้อยละการกรองแสงของฟิล์มกรองแสง เพื่อให้ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียวได้

วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมี และวิธีการทดลองได้แสดงไว้ในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. กล่องไม้ขนาด 80x80x100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. กล่องไม้ขนาด 55x55x75 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. หลอดไฟแอลอีดี (LED) ประเภทแสงกลางวัน
3. หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ประเภทแสงกลางวัน รุ่น T5
4. ชุดแผงวงจรปรับหรี่ไฟ (dimmer)

5. ชุดแหล่งจ่ายไฟ (power supply)
6. ชุดรางหลอดอิเล็กทรอนิกส์
7. สายไฟแบบอ่อน
8. สายไฟแบบคู่
9. สารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ (Silver Halide: AgX)
10. ฟิล์มดูราแทรน (Duratran)
11. ฟิล์มแบคลิต (Backlit)
12. กล้องถ่ายภาพดิจิทัลแบบสะท้อนเลนส์เดี่ยว
13. ขาตั้งกล้อง
14. สีทาภายในแบบด้านโจตัน เบอร์ NCS-S 2500 N
15. ลูกกลิ้งทาสี
16. แผ่นสเกลสีเทา ในระบบ NCS
17. ฟิล์มกรองแสงรุ่น G 40 กรองแสง 50% และรุ่น G 60 กรองแสง 70%
18. แผนภูมิทดสอบสไปเดอร์ (Spyder checker chart)
19. อุปกรณ์ประกอบฉาก
20. กระดาษชาร์ตแข็งสีเทา
21. กระดาษชาร์ตแข็งสีดำ
22. กระดาษชาญอ้อย
23. ถุงมือ
24. กาวสองหน้า
25. กาวดินน้ำมัน
26. ถาดพลาสติกสำหรับล้างฟิล์ม

### 3.1.2 เครื่องมือ

1. มาตรความสว่าง (luxmeter) Minolta CL-200 Chroma Meter / Light Meter
2. มาตรความดำ (densitometer) Ihara R730 Densitometer
3. Spectrometer Ocean Optic USB4000 (วัดในช่วงความยาวคลื่น 200-850 nm)
4. ไขควง
5. คัตเตอร์
6. กรรไกร

### 3.1.3 สารเคมี

1. น้ำยาคงสภาพ F5
2. น้ำยาสร้างภาพ D76

## 3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินช่วงพลวัตของกล้องเมื่อนำไปถ่ายภาพฉากสองลักษณะคือ ภายใน และภายนอก ผ่านการสร้างกล่องจำลองฉากธรรมชาติจะทำให้สามารถประเมินช่วงพลวัตได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

### 3.2.1 สร้างอุปกรณ์สำหรับจำลองฉากภายใน

อุปกรณ์สำหรับการสร้างฉากจำลองภายใน ได้แก่ กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในจำลองสภาวะฉากที่มีค่าความเปรียบต่างของแสงสูงเป็นเงื่อนไข และนำสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ ฟิล์มดูราแทรน และฟิล์มแบคลิต เพื่อนำมาสร้างแผ่นสเกลสีเทาชนิดโปร่งแสง (transmittance) ให้มีขั้นแต่ละขั้นมีค่าความต่างของความส่องสว่างเท่ากับ 1/3 สตอป หรือค่าความดำต่างกัน 0.1 เมื่อคำนวณตามสมการที่ *(2.32)* ซึ่งขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์มีดังนี้

#### 3.2.1.1 ทดสอบสร้างแผ่นสเกลสีเทาชนิดโปร่งแสงโดยใช้สารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์

1) เตรียมน้ำยาสร้างภาพ D76 โดยผสม D76 กับน้ำเป็นอัตราส่วน 1:1ปริมาณ 100 ml แล้วเทน้ำยาสร้างภาพลงในถาดพลาสติก

2) เตรียมน้ำยาคงสภาพ F-5 ปริมาณ 150 ml แล้วเทน้ำยาคงสภาพลงในถาดพลาสติก

3) เตรียมน้ำสะอาดล้นถาดพลาสติก

4) ตั้งเครื่องฉายแสงที่ความต่างศักย์ 5 V และเปิดไฟ 1 หลอด ใช้กระดาษบังแสงปิดบนหลอดไฟ เพื่อทอนแสงให้ส่งผ่านได้น้อยลง

5) ตัดสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์เป็นแผ่นยาวขนาด 2x14 $cm^2$

6) ฉายแสงบนซิลเวอร์แฮไลด์เป็นเวลา 1s, 2s, 3s, 4s, ..., 20s ตามลำดับ

7) นำสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ที่ฉายแสงไปขึ้นรูปด้วยน้ำยาสร้างภาพ

8) เขย่าสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ให้น้ำยาสร้างภาพสัมผัสกับสารไวแสงอย่างทั่วถึงเป็นเวลา 7 นาที

9) นำสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์แช่น้ำสะอาดเพื่อล้างน้ำยาสร้างภาพเป็นเวลา 2 นาที

10) เขย่าสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ในน้ำยาคงสภาพเป็นเวลา 5 นาที

11) ล้างน้ำยาคงสภาพด้วยการแช่สารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ลงในถาดที่มีน้ำไหลผ่านตลอดเวลาเป็นเวลา 20 นาที

12) เช็ดน้ำออกจากสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์ด้วยฟองน้ำสะอาด

13) ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม

14) วัดค่าความดำด้วยมาตรความดำ

15) บันทึกผลแล้วเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงกับค่าความดำของสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์

16) ปรับเวลาฉายแสงตามความสัมพันธ์ของเส้นโค้งลักษณะเฉพาะเพื่อให้ได้ค่าความดำห่างกัน 0.1

17) ทำการทดลองซ้ำ

#### 3.2.1.2 **ทดสอบสร้างแผ่นสเกลสีเทาชนิดโปร่งแสงโดยใช้ฟิล์มดูราแทรน**

1) ทำไฟล์แผ่นสเกลสีเทาที่มีค่าความสว่าง (RGB pixel value) ต่างกัน 5 ระดับ ไล่จาก 0-255 ด้วยโปรแกรมโฟโต้ชอป (Photoshop)

2) พิมพ์ไฟล์ลงบนดูราแทรนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต (inkjet)

3) วัดค่าความดำในแต่ละระดับขั้นของดูราแทรนด้วยมาตรความดำ

4) นำข้อมูลที่ได้เขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างของพิกเซลกับค่าความดำของดูราแทรน

5) ปรับค่าพิกเซลตามความสัมพันธ์ของเส้นโค้งลักษณะเฉพาะเพื่อสร้างแผ่นสเกลสีเทาที่มีความดำต่างกัน 0.1

6) ทำการทดลองซ้ำ

#### 3.2.1.3 **ทดสอบสร้างแผ่นสเกลสีเทาชนิดโปร่งแสงโดยใช้ฟิล์มแบคลิต**

1) ทำไฟล์แผ่นสเกลสีเทาที่มีค่าความสว่างต่างกัน 5 ระดับ ไล่จาก 0-255 ด้วยโปรแกรมโฟโต้ชอป

2) พิมพ์ไฟล์ลงบนแบคลิตด้วยเครื่องพิมพ์อิเล็กโทรโฟโตกราฟี (electrophotography)

3) วัดค่าความดำในแต่ละระดับขั้นของแบคลิตด้วยมาตรความดำ

4) นำข้อมูลที่ได้เขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างของพิกเซลกับค่าความดำของแบคลิต

5) ปรับค่าพิกเซลตามความสัมพันธ์ของเส้นโค้งลักษณะเฉพาะเพื่อสร้างแผ่นสเกลสีเทาที่มีความดำต่างกัน 0.1

6) ทำการทดลองซ้ำ

### 3.2.1.4 กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

1) ตัดไม้อัดความหนา 10 mm ขนาด 80x80 $cm^2$ 2 แผ่น ขนาด 100x80 $cm^2$ 3 แผ่น ฉลุแผ่นไม้อัดที่ทำเป็นฝาหลังของกล่องจำลองให้เป็นช่องขนาด 30x30 $cm^2$

2) ขัดไม้ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 0

3) ทาสีภายในแบบด้านรหัส NCS 2500 N บนไม้ทุกแผ่น

4) ประกอบแผ่นไม้อัดที่ขัดกระดาษทรายและทาสีแล้วขึ้นเป็นกล่องจำลอง

5) ต่อวงจรสำหรับชุดแหล่งจ่ายไฟเข้ากับชุดวงจรหลอดแอลอีดี

6) ต่อวงจรชุดแผงวงจรปรับหรี่ไฟเข้ากับแผงหลอดแอลอีดี

7) เดินสายไฟจากชุดรางหลอดอีเล็กทรอนิกส์

8) ติดตั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์กับรางหลอดอีเล็กทรอนิกส์

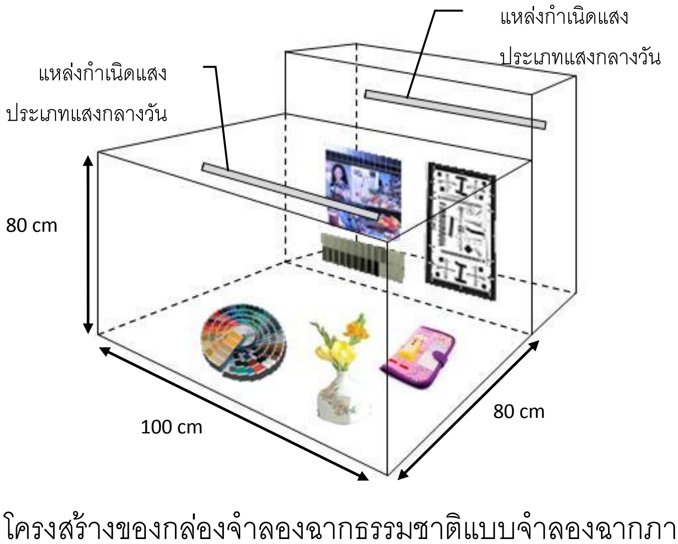
9) ติดหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์บนเพดานกล่องจำลอง

10) ติดแผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสงบนแผ่นไม้อัดบริเวณที่ฉลุเป็นช่องไว้

11) ติดแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS บนแผ่นไม้ฝาหลังกล่อง ใต้แผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสง

12) จัดฉากด้วยอุปกรณ์ประกอบฉากอื่น ๆ

รูปแบบโครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติภายในแสดงดังภาพที่ 3.1



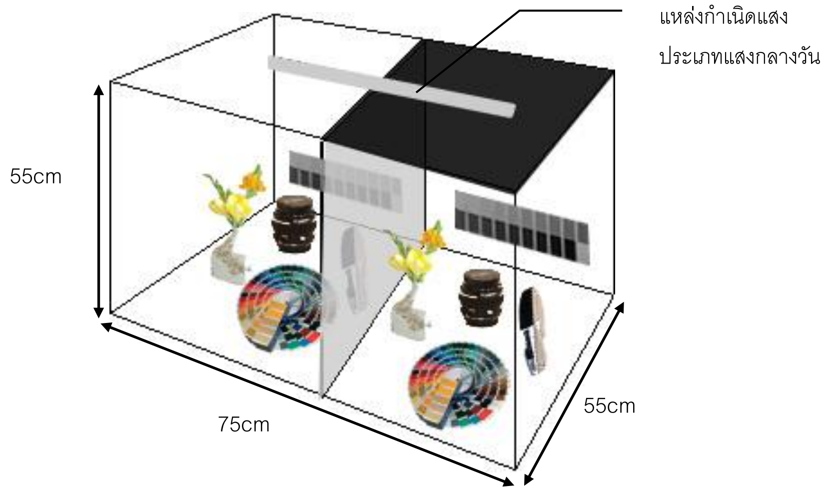

ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบจำลองฉากภายใน

### 3.2.2 สร้างอุปกรณ์และวัสดุสำหรับจำลองฉากภายนอก

อุปกรณ์สำหรับการสร้างฉากจำลองภายนอก ได้แก่ กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบฉากภายนอกจำลองสภาวะฉากที่มีร่มเงาซึ่งส่งผลให้มีความเปรียบต่างของแสงมากในฉากเดียวกัน ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์มีดังนี้

1) ตัดไม้อัดความหนา 10 mm ขนาด 55x55 $cm^2$ 2 แผ่น ขนาด 57x55 $cm^2$ 3 แผ่น
2) ขัดไม้ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 0
3) ทาสีภายในแบบด้านรหัส NCS 2500 N บนไม้ทุกแผ่น
4) ประกอบแผ่นไม้อัดที่ขัดและทาสีแล้วขึ้นเป็นกล่องจำลอง
5) ติดตั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์กับรางหลอดอิเล็กทรอนิกส์
6) ติดหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์บนเพดานกล่องจำลอง
7) แบ่งครึ่งบริเวณภายในกล่องด้วยฟิล์มกรองแสงเพื่อสร้างบริเวณเงาขึ้น
8) นำกระดาษชาร์ตสีดำกั้นแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ฝั่งหนึ่งไว้ เพื่อไม่ให้แสงส่องลงมาในฝั่งที่จัดฉากให้เป็นเงา
9) ติดแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS บนแผ่นไม้อัดผนังด้านใน ทั้งส่วนที่สว่างและส่วนที่เป็นเงา
10) จัดฉากด้วยอุปกรณ์ประกอบฉากอื่น ๆ ให้เหมือนกันทั้งสองฝั่ง

รูปแบบโครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบจำลองฉากภายในแสดงดังภาพที่ 3.2




ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบจำลองฉากภายนอก

### 3.2.3 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยวิธีทั่วไป

1) ตั้งกล่องจำลองในห้องมืด

2) เปิดไฟฟลูออเรสเซนต์และแอลอีดี

3) วัดค่าความสว่างของแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS รหัส 5500N ด้วย Spectrometer Ocean Optic USB4000 และบันทึกผล

4) ตั้งกล้องให้ห่างจากกล่องระยะ 1 m

5) ตั้งค่าการถ่ายภาพดังนี้ ตั้งค่าความไวแสงต่ำสุดตามความสามารถของกล้องดิจิทัลนั้นๆ (บางรุ่นตั้งค่าที่ 100 บางรุ่นตั้งค่าที่ 200) และเปิดรูรับแสงที่ 5.6

6) ถ่ายภาพแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS รหัส 5500N ด้วยค่าความเร็วชัตเตอร์ที่ต่างกัน ตั้งแต่ 6 วินาที ถึง 1/800 วินาที

7) วัดค่าความสว่าง (luminosity pixel value) ของแต่ละระดับขั้นของแผ่นสเกลสีเทาด้วยโปรแกรมโฟโตชอป

8) บันทึกผล

9) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเขียนส่วนโค้งลักษณะเฉพาะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าการฉายแสง (log H) กับค่าความสว่างของพิกเซล (luminosity pixel value)

### 3.2.4 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

1) ตั้งกล่องจำลองในห้องมืด

2) เปิดไฟฟลูออเรสเซนต์และแอลอีดี

3) วัดจำนวนโฟตอนที่เวลา 100 msec ของแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองแบบด้วย Spectrometer Ocean Optic USB4000 เพื่อนำจำนวนโฟตอนมาคำนวณหาฟลักซ์ส่องสว่าง ดังสมการที่ *(3.1)* และแปลงค่าเข้าสู่ระบบวัดแสงตามสมการที่ *(2.15)*

$$\Phi = \frac{number\ of\ Photons}{t \cdot A} \quad \text{... (3.1)}$$

เมื่อ $\Phi$ คือ ฟลักซ์ส่องสว่าง (ลูเมน)

t คือ เวลา (วินาที) และ

A คือ พื้นที่ (ตารางเมตร) [14]

4) บันทึกผล

5) ตั้งค่าการถ่ายภาพที่ค่าความไวแสงต่ำสุดตามความสามารถของกล้องดิจิทัลนั้นๆ เปิดรูรับแสงที่ 5.6

6) ตั้งกล้องให้ห่างจากกล่องระยะ 1 m

7) ถ่ายภาพแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองแบบด้วยค่าความเร็วชัตเตอร์ที่ต่างกันตั้งแต่ 6 วินาทีถึง 1/800 วินาที

8) วัดค่าความสว่างของพิกเซลของภาพแผ่นสเกลสีเทาในแต่ละลำดับขั้นด้วยโปรแกรมโฟโตชอป

9) เลือกภาพที่ความเร็วชัตเตอร์ที่ให้ค่าความสว่างครอบคลุมตั้งแต่ 0-255

10) บันทึกผลค่าความสว่างของพิกเซลที่ได้จากภาพที่เลือก

11) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเขียนส่วนโค้งลักษณะเฉพาะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของการฉายแสงกับค่าความสว่างของพิกเซล

### 3.2.5 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก

1) ตั้งกล่องจำลองในห้องมืด

2) เปิดไฟฟลูออเรสเซนต์

3) วัดจำนวนโฟตอนที่เวลา 100 msec ของแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองแบบด้วย Spectrometer Ocean Optic USB4000 เพื่อนำจำนวนโฟตอนมาคำนวณหาฟลักซ์ส่องสว่าง ดังสมการที่ *(3.1)* และแปลงค่าเข้าสู่ระบบวัดแสงตามสมการที่ *(2.15)*

4) บันทึกผล

5) ถ่ายภาพแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS ด้วยค่าความเร็วชัตเตอร์ที่ต่างกันตั้งแต่ 6 วินาทีถึง 1/800 วินาที

6) วัดค่าความสว่างของภาพแผ่นสเกลสีเทาในแต่ละภาพด้วยโปรแกรมโฟโตชอป

7) เลือกภาพที่ให้ค่าความสว่างของพิกเซลครอบคลุมตั้งแต่ 0-255

8) บันทึกผลค่าพิกเซลที่ได้จากภาพที่เลือก

9) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเขียนส่วนโค้งลักษณะเฉพาะ

### 3.2.6 ประเมินช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัลด้วยผู้สังเกต

การทดลองนี้เป็นการทดลองเสริมที่ทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการแสดงผลของจอแสดงผลของกล้องดิจิทัลแต่ละรุ่นว่าสามารถแสดงภาพได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่รับมาโดยตรงก่อนประมวลผลได้มากเพียงใด โดยในการทดลองได้จัดผู้สังเกตทั้งหมด 20 คน เพื่อสังเกต

จำนวนลำดับของแผ่นสเกลสีเทาว่าค่าที่ได้สัมพันธ์กับตัวเลขจากการวิเคราะห์เส้นโค้งลักษณะเฉพาะหรือไม่ มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1) ให้ผู้สังเกตดูภาพที่ถ่ายได้จากจอแสดงผลของกล้องแต่ละรุ่นในห้องมืด แล้วบอกขอบเขตลำดับขั้นของแผ่นสเกลสีเทาที่ตาของผู้สังเกตสามารถแยกความแตกต่างได้

2) บันทึกจำนวนลำดับของแผ่นสเกลสีเทาที่ตาของผู้สังเกตสามารถแยกได้

3) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับช่วงพลวัตที่ได้จากส่วนโค้งลักษณะเฉพาะ

## 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการเปรียบเทียบชุดข้อมูลตามทฤษฎีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

ในการนำเสนอข้อมูลช่วงพลวัตนั้นจะนำเสนอในหน่วยของแสงเป็นสตอป (stop) [15] ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ *(2.27)* ข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เปรียบเทียบข้อมูล 2 ชุด ระหว่างข้อมูลช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป กับชุดข้อมูลช่วงพลวัตที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติด้วยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามทฤษฎีของเพียร์สัน

2) หาค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงพลวัตที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติเทียบกับช่วงพลวัตที่ได้จากวิธีทั่วไป

3) หาค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงพลวัตที่ได้จากผู้สังเกตเทียบกับช่วงพลวัตที่ได้จากวิธีทั่วไป

4) สรุปผลการทดลอง

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

## 4.1 ผลการทดลองการผลิตแผ่นสเกลสีเทา

ในการสร้างอุปกรณ์เพื่อประเมินช่วงพลวัตนี้ จำเป็นต้องมีแผ่นสเกลสีเทาเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ แผ่นสเกลสีเทายังต้องแสดงน้ำหนักสีเรียงลำดับความดำจากมากถึงน้อยด้วยความเข้มที่สม่ำเสมอ และมีจำนวนลำดับขั้นเพียงพอในการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว เพื่อที่จะนำไปเขียนส่วนโค้งลักษณะเฉพาะ และใช้ในการประเมินช่วงพลวัต

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นสเกลสีเทา 2 ประเภท คือแบบโปร่งแสง และทึบแสง สำหรับแผ่นสเกลสีเทาประเภททึบแสงใช้แผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS และประเภทโปร่งแสง มีวัสดุทั้งหมด 3 ชนิดที่เลือกมาเพื่อทดลองผลิตแผ่นสเกลสีเทา ได้แก่ ซิลเวอร์แฮไลด์ ดูราแทรน และแบคลิต

เนื่องจากซิลเวอร์แฮไลด์เป็นสารไวแสงที่มีความไวแสงมาก ประกอบกับเครื่องฉายแสงมีข้อจำกัดในการฉายแสงความเข้มแสงน้อย ดังนั้น วัสดุประเภทสารไวแสงซิลเวอร์แฮไลด์จึงไม่สามารถผลิตความดำที่ต้องการได้ เนื่องจากไม่สามารถผลิตความดำน้อยในช่วงแรกของลำดับขั้นของแผ่นสเกลสีเทาได้อย่างสม่ำเสมอ

ดูราแทรนเป็นฟิล์มสังเคราะห์ที่สามารถพิมพ์หมึกลงบนวัสดุได้ สามารถให้ความดำในแต่ละลำดับขั้นอย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากลักษณะของดูราแทรนเป็นฟิล์มขุ่น ดังนั้น ในช่วงแรกของแผ่นสเกลสีเทาจึงไม่สามารถให้ค่าความดำที่น้อยตามความต้องการได้

แบคลิตเป็นฟิล์มสังเคราะห์ที่สามารถพิมพ์หมึกลงบนวัสดุได้เช่นเดียวกันกับดูราแทรน แต่มีลักษณะโปร่งแสงมากกว่า และเมื่อทำการผลิตแผ่นสเกลสีเทา พบว่าฟิล์มแบคลิตให้ค่าความดำในช่วงที่ต้องการในการทดลองได้ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้วัสดุแบคลิตในการผลิตแผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสง

ตารางที่ 4.1 ค่าความดำของแบคลิตฟิล์ม

| ลำดับขั้นแบคลิตฟิล์ม | ความดำ | ลำดับขั้นแบคลิตฟิล์ม | ความดำ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.49 | 15 | 2.08 |
| 2 | 0.56 | 16 | 2.11 |
| 3 | 0.65 | 17 | 2.14 |
| 4 | 0.76 | 18 | 2.17 |
| 5 | 1.09 | 19 | 2.18 |
| 6 | 1.30 | 20 | 2.22 |
| 7 | 1.43 | 21 | 2.23 |
| 8 | 1.56 | 22 | 2.25 |
| 9 | 1.67 | 23 | 2.29 |
| 10 | 1.73 | 24 | 2.32 |
| 11 | 1.90 | 25 | 2.35 |
| 12 | 1.94 | 26 | 2.38 |
| 13 | 1.99 | 27 | 2.38 |
| 14 | 2.04 | 28 | 2.41 |

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการไล่น้ำหนักสีของหมึกพิมพ์บนแบคลิตจะเสียข้อมูลช่วงกลางไป เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของฟิล์มแบคลิต แต่ค่าความดำยังต่อเนื่องกับแผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสง และค่าความแตกต่างของความดำแต่ละขั้นเฉลี่ยเป็นไปตามความต้องการ

เมื่อนำแผ่นสเกลสีเทาทั้งสองไปติดที่กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในเพื่อให้ค่าความสว่างที่สะท้อนออกมาระหว่างลำดับขั้นที่มืดที่สุดของแผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสงต่อเนื่องกับค่าความสว่างของลำดับขั้นที่สว่างที่สุดของแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS จำเป็นต้องปรับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงประเภทแสงกลางวันทั้งสองให้มีความแตกต่างกันมากเพียงพอ โดยในการวัดค่าความสว่างนี้จะใช้เครื่องมือวัด Spectrometer Ocean Optic USB4000 วัดความเข้มของโฟตอน (intensity of Photons) และนำค่าที่ได้มาคำนวณในระบบการวัดแสงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มของโฟตอนและความสว่างของฟิล์มแบคลิต

| **ลำดับขั้นแบคลิตฟิล์ม** | **ความเข้มของโฟตอน** (**จำนวนโฟตอน**/100 msec) | **อิราเดียน** ($W/m^2$) | **ลำดับขั้นแบคลิตฟิล์ม** | **ความเข้มของโฟตอน** (**จำนวนโฟตอน**/100 msec) | **อิราเดียน** ($W/m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $15.42 \times 10^6$ | $14.81 \times 10^{10}$ | 15 | $1.39 \times 10^6$ | $0.77 \times 10^{10}$ |
| 2 | $15.31 \times 10^6$ | $14.70 \times 10^{10}$ | 16 | $1.43 \times 10^6$ | $0.81 \times 10^{10}$ |
| 3 | $14.07 \times 10^6$ | $13.45 \times 10^{10}$ | 17 | $1.46 \times 10^6$ | $0.84 \times 10^{10}$ |
| 4 | $13.11 \times 10^6$ | $12.49 \times 10^{10}$ | 18 | $1.44 \times 10^6$ | $0.82 \times 10^{10}$ |
| 5 | $8.72 \times 10^6$ | $8.11 \times 10^{10}$ | 19 | $1.47 \times 10^6$ | $0.85 \times 10^{10}$ |
| 6 | $6.73 \times 10^6$ | $6.11 \times 10^{10}$ | 20 | $1.50 \times 10^6$ | $0.89 \times 10^{10}$ |
| 7 | $5.29 \times 10^6$ | $4.68 \times 10^{10}$ | 21 | $1.47 \times 10^6$ | $0.85 \times 10^{10}$ |
| 8 | $4.32 \times 10^6$ | $3.71 \times 10^{10}$ | 22 | $1.41 \times 10^6$ | $0.80 \times 10^{10}$ |
| 9 | $3.35 \times 10^6$ | $2.74 \times 10^{10}$ | 23 | $1.27 \times 10^6$ | $0.66 \times 10^{10}$ |
| 10 | $2.74 \times 10^6$ | $2.12 \times 10^{10}$ | 24 | $1.20 \times 10^6$ | $0.59 \times 10^{10}$ |
| 11 | $2.03 \times 10^6$ | $1.42 \times 10^{10}$ | 25 | $1.07 \times 10^6$ | $0.46 \times 10^{10}$ |
| 12 | $1.79 \times 10^6$ | $1.18 \times 10^{10}$ | 26 | $1.03 \times 10^6$ | $0.42 \times 10^{10}$ |
| 13 | $1.54 \times 10^6$ | $0.92 \times 10^{10}$ | 27 | $1.01 \times 10^6$ | $0.39 \times 10^{10}$ |
| 14 | $1.30 \times 10^6$ | $0.68 \times 10^{10}$ | 28 | $0.90 \times 10^6$ | $0.29 \times 10^{10}$ |

ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มของโฟตอนและความสว่างของแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS

| **รหัส** NCS | **ความเข้มของโฟตอน** (**จำนวนโฟตอน**/100 msec) | **อิราเดียน** (W/$m^2$) | **รหัส** NCS | **ความเข้มของโฟตอน** (**จำนวนโฟตอน**/100 msec) | **อิราเดียน** (W/$m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0300 | $1.12 \times 10^6$ | $0.51 \times 10^{10}$ | 5000 | $0.72 \times 10^6$ | $0.10 \times 10^{10}$ |
| 0500 | $1.10 \times 10^6$ | $0.49 \times 10^{10}$ | 5500 | $0.70 \times 10^6$ | $0.08 \times 10^{10}$ |
| 1000 | $1.04 \times 10^6$ | $0.42 \times 10^{10}$ | 6000 | $0.69 \times 10^6$ | $0.07 \times 10^{10}$ |
| 1500 | $0.98 \times 10^6$ | $0.36 \times 10^{10}$ | 6500 | $0.68 \times 10^6$ | $0.06 \times 10^{10}$ |
| 2000 | $0.93 \times 10^6$ | $0.32 \times 10^{10}$ | 7000 | $0.66 \times 10^6$ | $0.05 \times 10^{10}$ |
| 2500 | $0.89 \times 10^6$ | $0.28 \times 10^{10}$ | 7500 | $0.65 \times 10^6$ | $0.04 \times 10^{10}$ |
| 3000 | $0.86 \times 10^6$ | $0.25 \times 10^{10}$ | 8000 | $0.64 \times 10^6$ | $0.02 \times 10^{10}$ |
| 3500 | $0.83 \times 10^6$ | $0.21 \times 10^{10}$ | 8500 | $0.63 \times 10^6$ | $0.01 \times 10^{10}$ |
| 4000 | $0.80 \times 10^6$ | $0.18 \times 10^{10}$ | 9000 | $0.62 \times 10^6$ | $0.08 \times 10^9$ |
| 4500 | $0.77 \times 10^6$ | $0.15 \times 10^{10}$ | | | |

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าลำดับขั้นที่ 26 ของฟิล์มแบคลิตและลำดับขั้นที่ 3 รหัส 1000 ของแผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS มีความเข้มของโฟตอนใกล้เคียงกันมากที่สุด และเมื่อนำมาคำนวณค่าอิราเดียนที่เลขนัยสำคัญตำแหน่งที่สองมีค่าเท่ากัน ซึ่งอัตราความเปรียบต่างของแสงที่ให้ค่าอิราเดียนที่ต่อเนื่องนี้คือ 3011:1 เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของโฟตอนจากหลอดแอลอีดีกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ นั่นคือจะสามารถวัดความแตกต่างของค่าการเปิดรับแสงได้ประมาณ 11.5 สตอป [15] ซึ่งเพียงพอกับการใช้ในการประเมินช่วงพลวัตในงานวิจัยนี้

## 4.2 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

การทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกรายงานถึงผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน ส่วนที่สองรายงานถึงผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต และส่วนสุดท้ายแสดงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวิธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในและการทดสอบด้วยตาเปล่าเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป

สำหรับการทดลองนี้ใช้กล้องดิจิทัลทั้งหมด 5 ชนิด ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกายภาพของกล้องแต่ละรุ่น

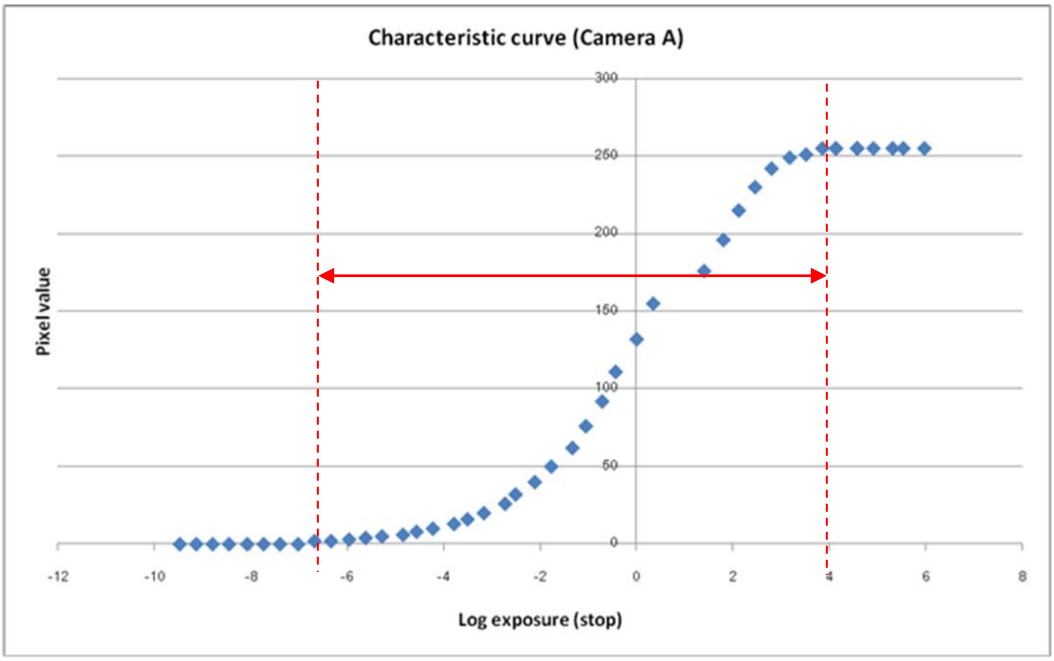
| กล้อง | ความละเอียด | ขนาดเซนเซอร์ |
|---|---|---|
| A | 12.2 million effective pixels | 22.2x14.8 mm CMOS sensor |
| B | 8.0 million effective pixels | 22.2x14.8 mm CMOS sensor |
| C | 6.3 million effective pixels | 22.7x15.1 mm CMOS sensor |
| D | 12.3 million effective pixels | 23.6x15.8 mm CMOS sensor |
| E | 12.3 million effective pixels | 23.5x15.6 mm CMOS Exmor Sensor APS-C Type |

### 4.2.1 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

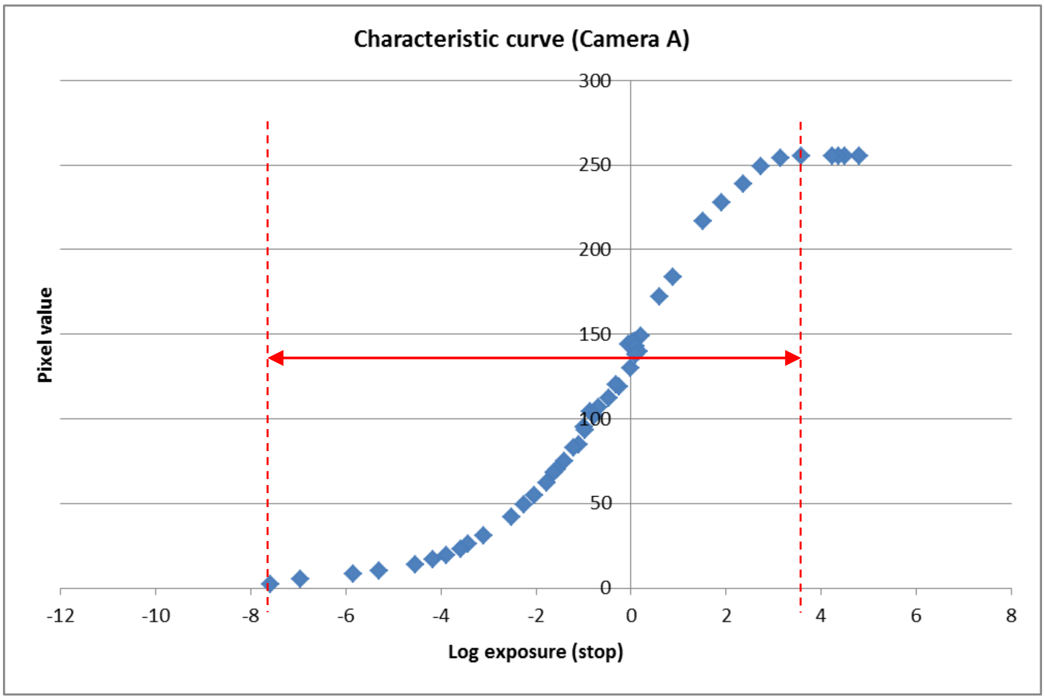
การประเมินผลช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไปนั้นทำได้โดยการถ่ายภาพกระดาษสีเทากลางด้วยค่าการเปิดรับแสง (exposure value) ที่แตกต่างกันตั้งแต่น้อยไปหามาก และจากภาพที่ได้จะนำไปหาค่าความสว่างเฉลี่ยของพิกเซลในบริเวณที่สุ่มด้วยโปรแกรมโฟโตชอป แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าการฉายแสง (log H) กับค่าความสว่างของพิกเซล (luminosity pixel value)

สำหรับการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในนั้น เมื่อปรับความเปรียบต่างของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองให้ ค่าการส่องสว่างของแผ่นสเกลสีเทาแบบโปร่งแสงกับทึบแสงต่อเนื่องกันได้แล้ว ทำการถ่ายภาพกล่องที่ความเร็วชัตเตอร์ 1/30 วินาที ซึ่งเป็นความเร็วชัตเตอร์ที่ให้ค่าความสว่างของพิกเซลของแผ่นสเกลสีเทาในแต่ละระดับขั้นครอบคลุมจาก 0-255 นำภาพที่ถ่ายเพียงครั้งเดียวนี้มาเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมจองค่าการฉายแสงกับค่าความสว่างของพิกเซล

ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.1 – 4.5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีทั่วไปกับวิธีถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน ข้อมูลของการทดลองแสดงในตารางที่ ก1 – ก10 ในภาคผนวก ก.

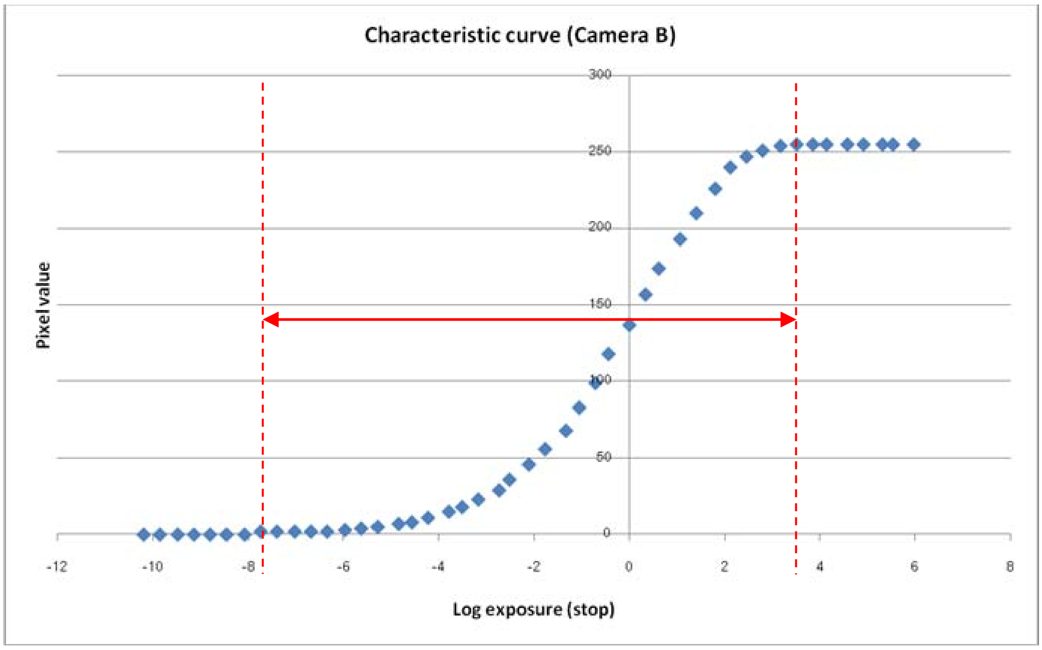



(ก)

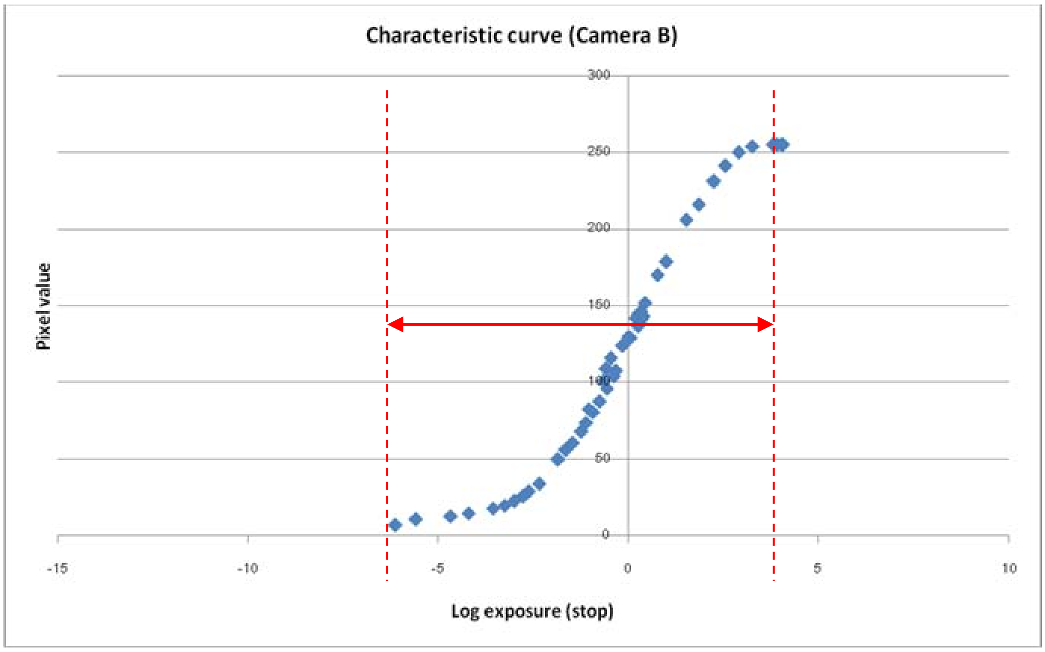



(ข)

ภาพที่ 4.1 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น A เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

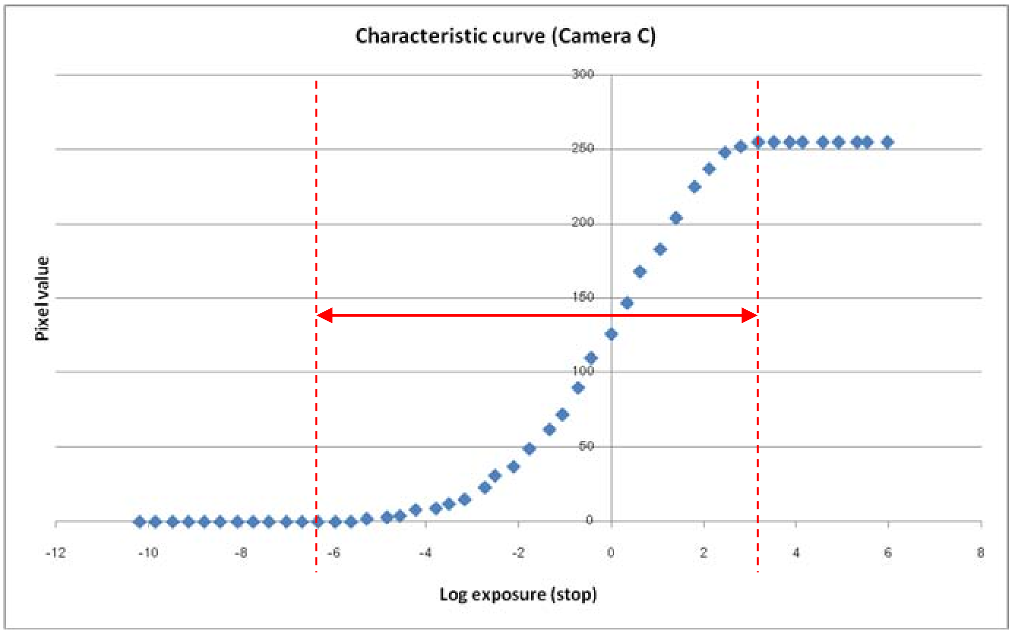



(ก)

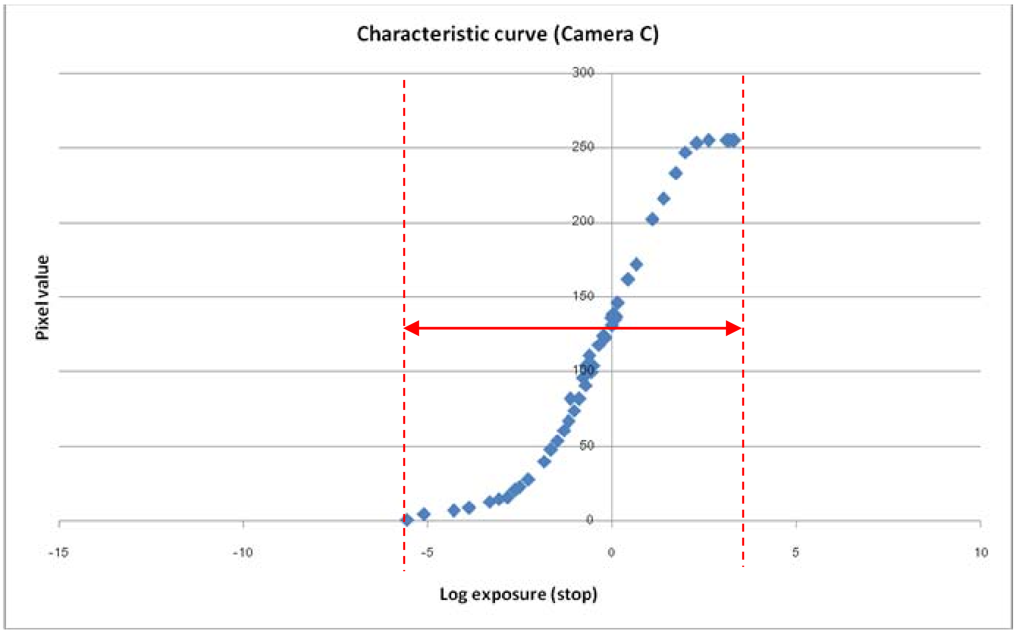



(ข)

ภาพที่ 4.2 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น B เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

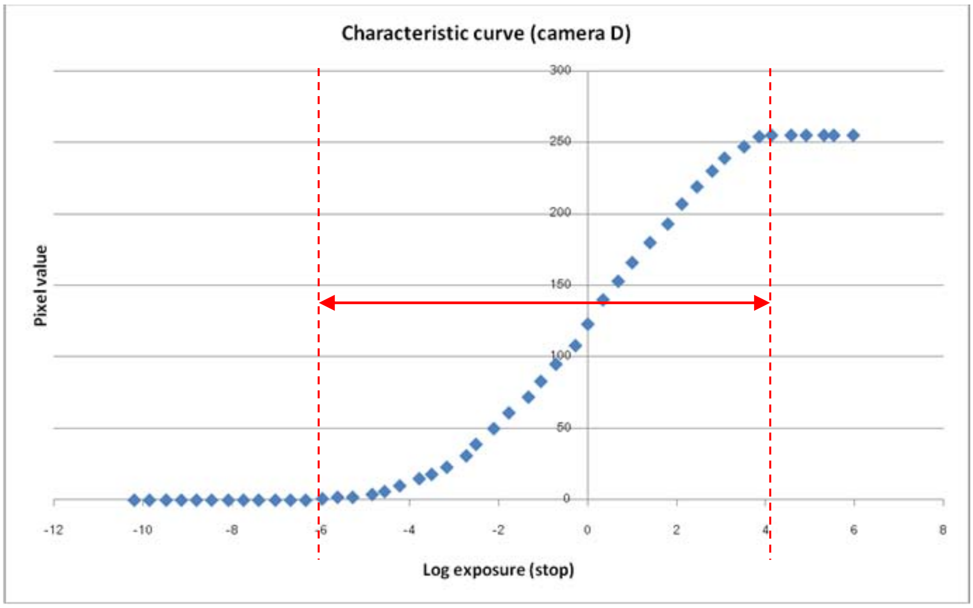



(ก)

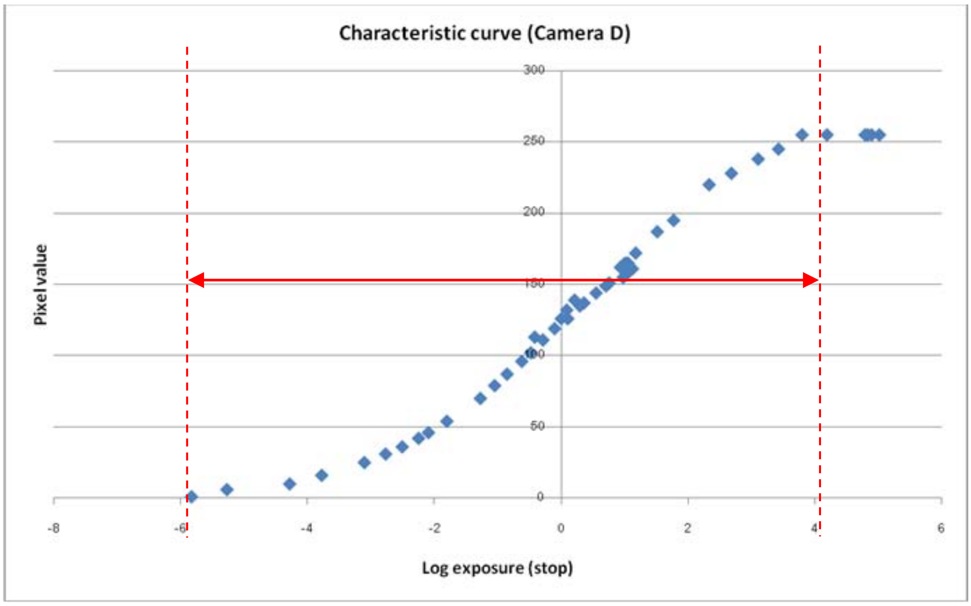



(ข)

ภาพที่ 4.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น C เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

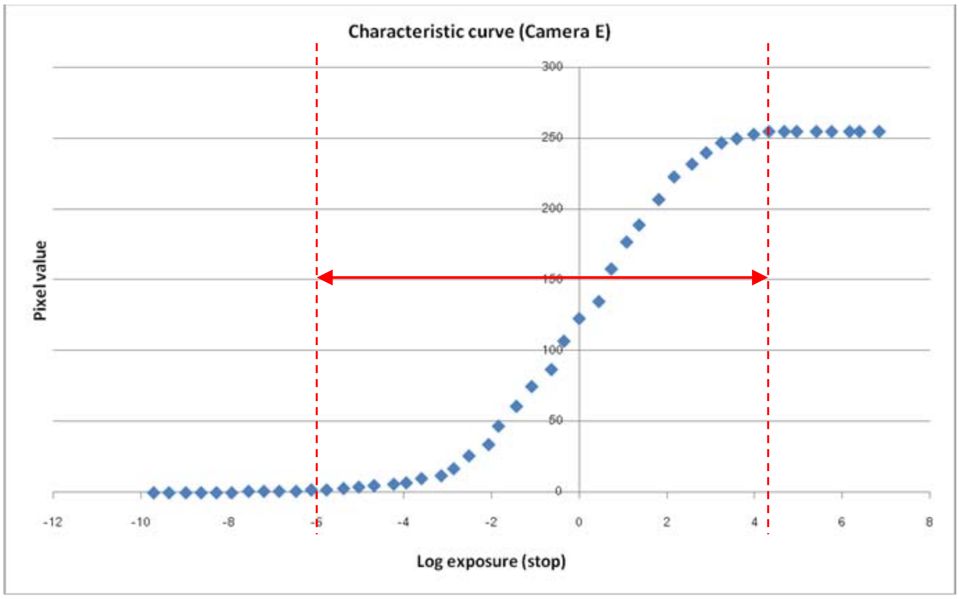



(ก)

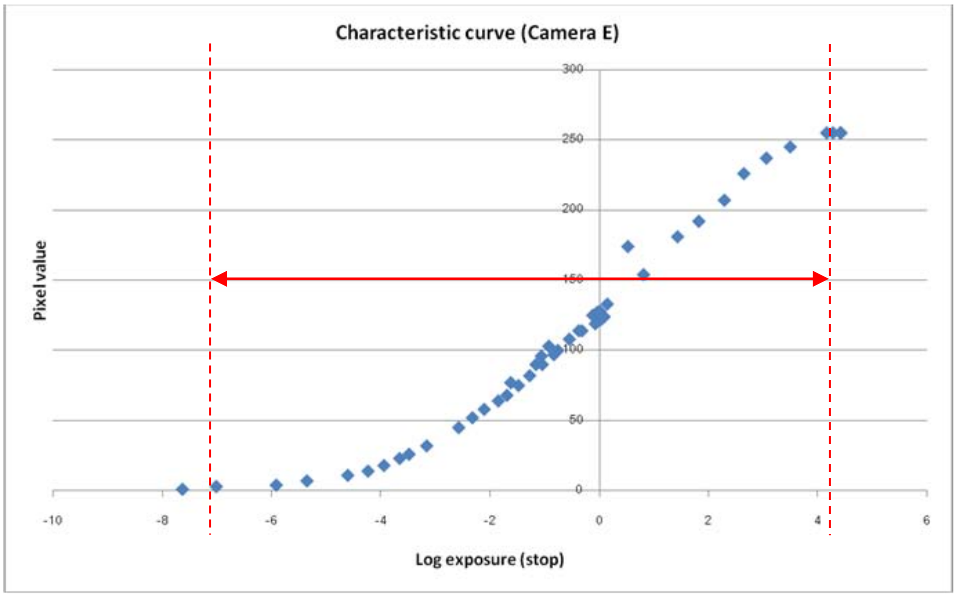



(ข)

ภาพที่ 4.4 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น D เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน




(ก)




(ข)

ภาพที่ 4.5 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น E เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

จากภาพที่ 4.1 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น A ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 10.19 ภาพที่ 4.1 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 11.14 ภาพที่ 4.2 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น B ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 9.85 ภาพที่ 4.2 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 9.94 ภาพที่ 4.3 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น C ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.45 ภาพที่ 4.3 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.17 ภาพที่ 4.4 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น D ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 9.41 ภาพที่ 4.4 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 9.63 ภาพที่ 4.5 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น E ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 10.09 ภาพที่ 4.5 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 11.18 สำหรับการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูลจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2.3

### 4.2.2 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต

การประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกตนั้นให้ผู้สังเกตดูภาพที่ได้จากจอแสดงผลของกล้องดิจิทัลแต่ละรุ่นที่ถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติเป็นที่เรียบร้อยแล้วดังภาพที่ 4.6 และให้ผู้สังเกตบอกขั้นแรกและขั้นสุดท้ายของลำดับขั้นในแผ่นสเกลสีเทาที่ตาของผู้สังเกตสามารถแยกรายละเอียดได้ ซึ่งแต่ละลำดับขั้นจะมีค่าเปรียบต่างที่ 1/3 สตอป แต่ในลำดับขั้นที่ 23-28 เนื่องจากมีค่าความดำต่างกันไม่ถึง 0.1 ดังนั้นจะไม่นับลำดับรวมเมื่อผู้สังเกตทำการทดลอง

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลของกล้องรุ่น A

ผลการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต 20 คนที่ทดสอบการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในโดยการมองภาพจากจอแสดงผลของกล้องดิจิทัล 5 รุ่น รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD) ของชุดข้อมูลที่บ่งบอกว่ากลุ่มผู้สังเกตมีระดับการมองเห็นและแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ใกล้เคียงกันหรือไม่ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ช่วงพลวัตเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต 20 คน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลของกล้องดิจิทัลทั้ง 5 รุ่น

| กล้อง | ช่วงพลวัตเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---|---|---|
| A | 8.83 | 0.33 |
| B | 9.43 | 0.28 |
| C | 8.92 | 0.25 |
| D | 8.95 | 0.15 |
| E | 10.18 | 0.19 |

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกตมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 0.5 นั้นคือ การกระจายตัวของข้อมูลเทียบกับค่าเฉลี่ยมีค่าน้อย คือผู้สังเกตทั้ง 20 คน มีระดับความสามารถในการมองเห็นและแยกแยะลำดับขั้นของแผ่นสเกลสีเทาในระดับที่ใกล้เคียงกัน

### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวิธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในและการทดสอบด้วยตาเปล่าเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีทั่วไปกับช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ

| กล้อง | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยวิธีทั่วไป | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ | ค่าคลาดเคลื่อน | ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) |
|---|---|---|---|---|
| A | 10.19 | 11.14 | 0.95 | 0.9953 |
| B | 9.85 | 9.94 | 0.09 | 0.9987 |
| C | 8.45 | 8.17 | 0.28 | 0.9981 |
| D | 9.41 | 9.63 | 0.22 | 0.9914 |
| E | 10.09 | 11.18 | 0.89 | 0.9926 |

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับวิธีที่ใช้กล่องจำลองฉากธรรมชาติพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 1 สตอป ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกันมาก

ทฤษฎีของเพียร์สันใช้ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความสอดคล้องของข้อมูลสองชนิดว่ามีความสอดคล้องกันมากเพียงใด ในที่นี้คือการเปรียบเทียบส่วนโค้งที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีทั่วไปและวิธีถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน ค่าความสอดคล้องตามทฤษฎีของเพียร์สันคือ ถ้าค่าความสอดคล้องมีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือข้อมูลทั้งสองชุดมีความสอดคล้อง จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสอดคล้องของข้อมูลเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของทั้งสองชุด จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างเกิดขึ้นตั้งแต่ทศนิยมตำแหน่งที่สาม ซึ่งค่า 0.99 นี้ถือว่ามีความสอดคล้องของข้อมูลสองชุดสูงมากนั่นเอง

จากตาราง 4.5-4.14 ค่าพิกเซลที่ได้นั้นมาจากซอฟท์แวร์โฟโต้ชอปช่วยประมวลผล ดังนั้น ระบบจะสามารถแยกความแตกต่างของค่าความสว่างได้โดยง่าย อย่างไรก็

ตาม ในทางปฏิบัตินั้น สายตามนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่างค่าความสว่างที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยได้ เช่น ที่ค่าพิกเซล 255 และ 253 ซอฟท์แวร์สามารถรู้ได้ถึงความแตกต่าง แต่สายตามนุษย์นั้นไม่ใช่ทุกคนที่สามารถแยกความแตกต่างนี้ออกได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดขอบเขตการมองเห็นไว้ที่ -10% ของข้อมูลจริง

ตารางที่ 4.7 ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างช่วงพลวัตที่ได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่จำกัดขอบเขตการมองเห็นของสายตามนุษย์กับช่วงพลวัตที่ได้จากการประเมินด้วยตาเปล่าของผู้สังเกต

| กล้อง | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยส่วนโค้งลักษณะเฉพาะ | ช่วงพลวัตที่สายตามนุษย์สามารถยอมรับได้ | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยตาเปล่า | ค่าความคลาดเคลื่อน |
|---|---|---|---|---|
| A | 11.14 | 10.026 | 8.83 | 1.196 |
| B | 9.94 | 8.946 | 9.43 | 0.484 |
| C | 8.17 | 7.353 | 8.92 | 1.567 |
| D | 9.63 | 8.667 | 8.95 | 0.283 |
| E | 11.18 | 10.062 | 10.18 | 0.118 |

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0-1.6 ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการประเมินด้วยตาเปล่านั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากว่าในระบบการประมวลผลภาพ เมื่อสัญญาณดิจิทัลที่เข้ามาอยู่ในรูปของฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้น จะถูกประมวลผลผ่านฟังก์ชันแกมมาก่อน แล้วจึงแสดงผลออกมาทางจอแสดงผล ซึ่งทำให้ส่งผลกระทบเรื่องค่าความเปรียบต่างที่จะเพิ่มขึ้นมากกว่าความเป็นจริงของสัญญาณ อีกทั้งระบบประมวลผลภาพและจอแสดงผลของกล้องแต่ละรุ่นไม่เหมือนกัน จึงส่งผลกับการมองเห็นของผู้สังเกตการณ์อย่างมาก ดังนั้น การประเมินช่วงพลวัตด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่าจึงไม่สามารถใช้แทนการประเมินจากข้อมูลที่ได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะได้

### 4.3 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก

การทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกรายงานถึงผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก และส่วนที่สองรายงานถึงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวิธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกเปล่าเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป

สำหรับการทดลองนี้ใช้กล้องดิจิทัลทั้งหมด 3 ชนิด ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติทางกายภาพของกล้องแต่ละรุ่น

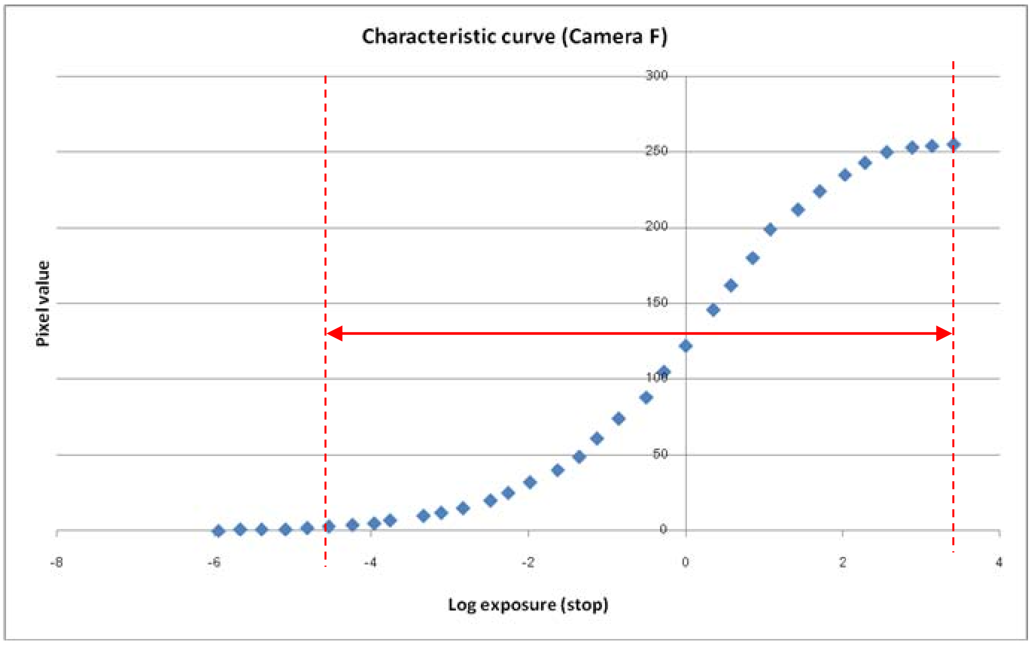
| ชื่อกล้อง | ความละเอียด | ขนาดเซนเซอร์ |
|---|---|---|
| F | 12.8 million effective pixels | 35.8x23.9 mm CMOS sensor |
| G | 12.3 million effective pixels | 23.6x15.8 mm CMOS sensor |
| H | 12.3 million effective pixels | 23.6x15.8 mm CMOS sensor |

### 4.3.1 ผลการทดลองการประเมินช่วงพลวัตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก

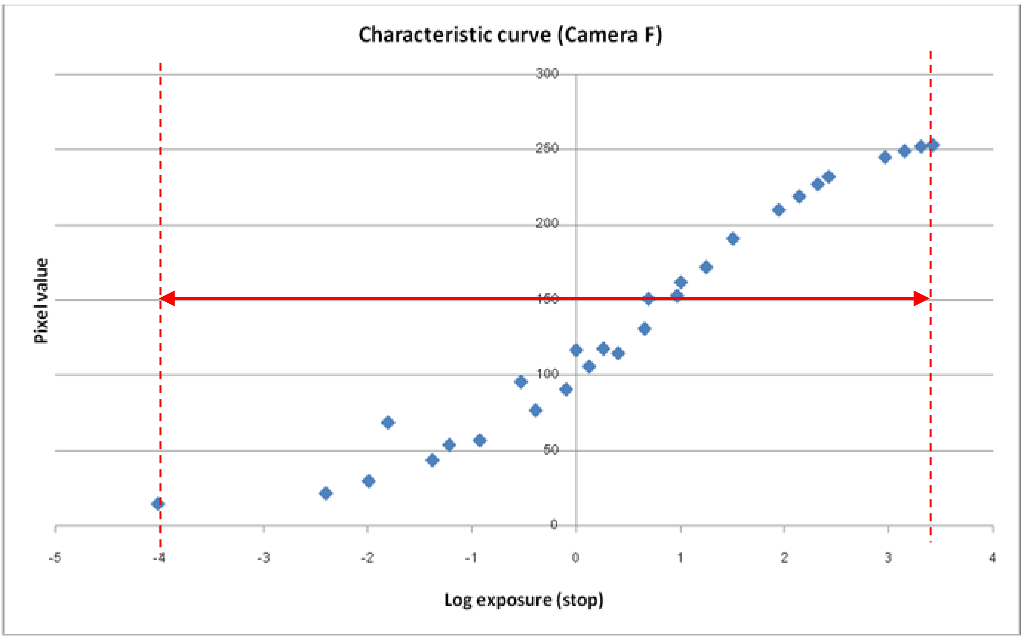
การประเมินผลช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไปนั้นทำได้โดยการถ่ายภาพกระดาษสีเทากลางด้วยค่าการเปิดรับแสงที่แตกต่างกันตั้งแต่น้อยไปหามาก และจากภาพที่ได้จะนำไปหาค่าความสว่างเฉลี่ยของพิกเซลในบริเวณที่สุ่มด้วยโปรแกรมโฟโตชอป แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าการฉายแสงกับค่าความสว่างของพิกเซล

สำหรับการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกนั้น เมื่อปรับร้อยละการกรองแสงของฟิล์มให้ค่าการส่องสว่างในแผ่นสเกลสีเทาทั้งฝั่งที่โดนแสงกับฝั่งที่เป็นร่มเงาต่อเนื่องกันได้แล้ว ทำการถ่ายภาพกล่องที่ความเร็วชัตเตอร์ 1/30 วินาที ซึ่งเป็นความเร็วชัตเตอร์ที่ให้ค่าความสว่างของพิกเซลของแผ่นสเกลสีเทาในแต่ละระดับขั้นครอบคลุมจาก 0-255 นำภาพที่ถ่ายเพียงครั้งเดียวนี้มาเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมจองค่าการฉายแสงกับค่าความสว่างของพิกเซล

ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.7 – 4.9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีทั่วไปกับวิธีถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน ข้อมูลของการทดลองแสดงในตารางที่ ค1 – ค6 ในภาคผนวก ก.

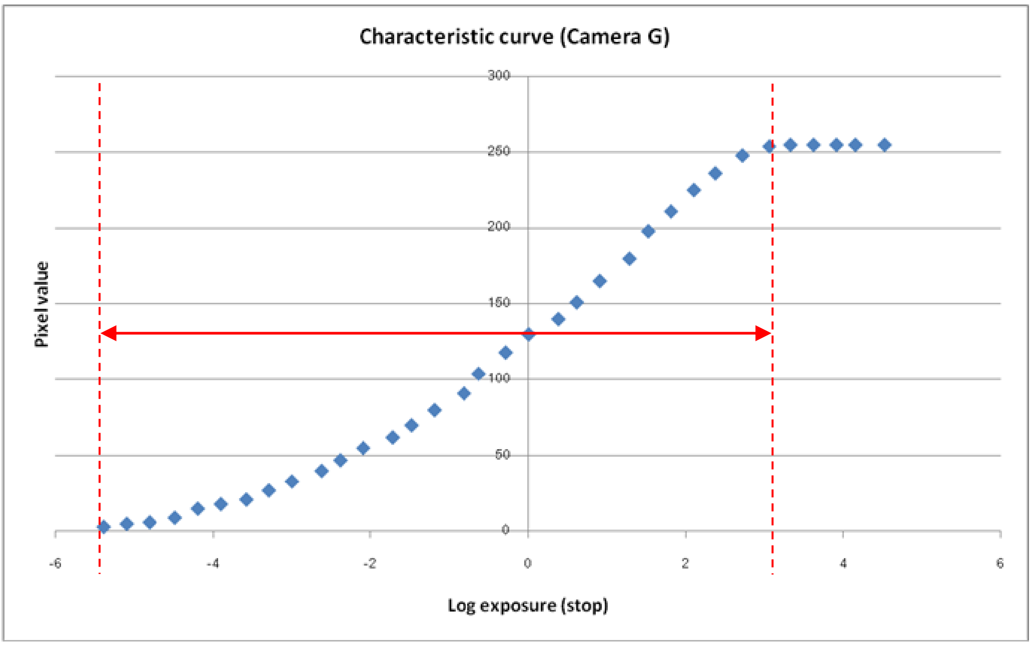



(ก)

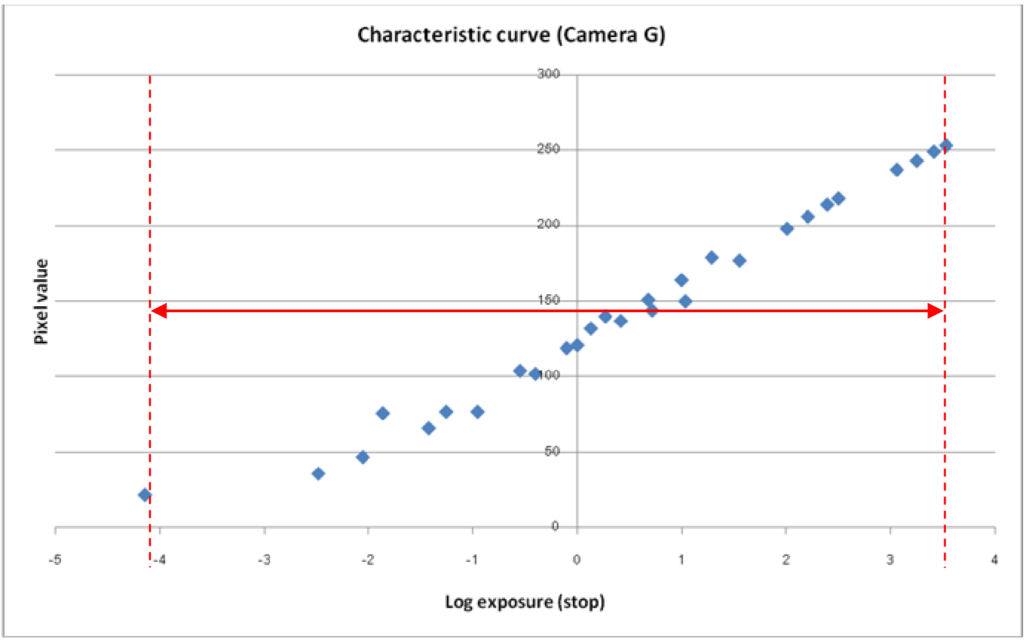



(ข)

ภาพที่ 4.7 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น F เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก

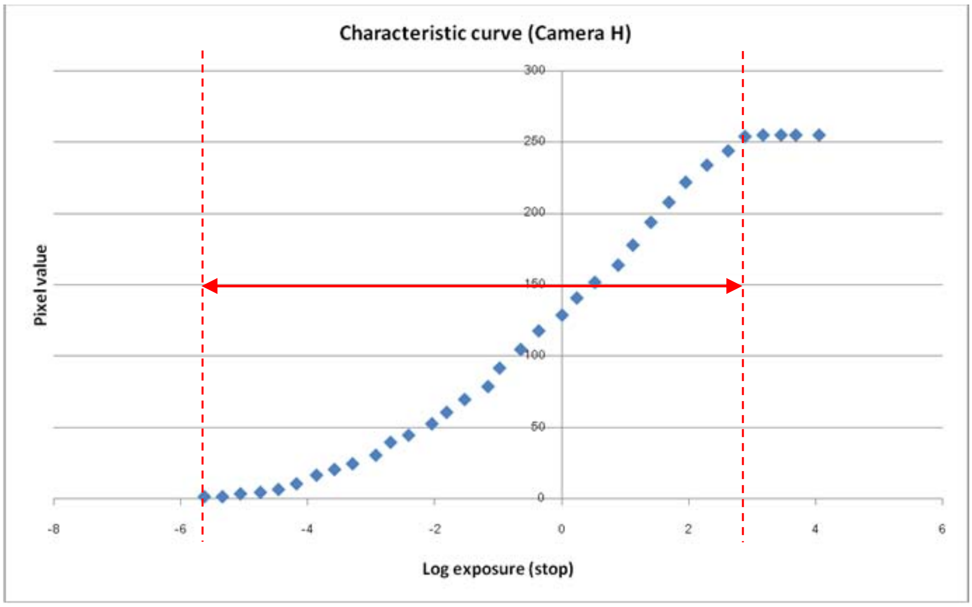



(ก)

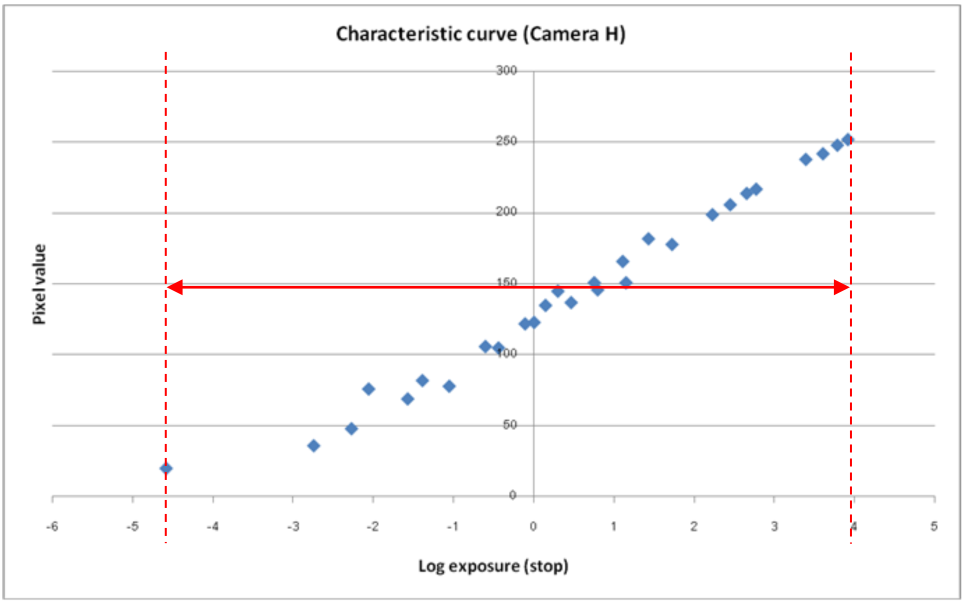



(ข)

ภาพที่ 4.8 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น G เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก




(ก)




(ข)

ภาพที่ 4.9 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น H เส้นประบอกถึงช่วงพลวัตที่อ่านได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (ก) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไป (ข) เส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอก

จากภาพที่ 4.7 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น F ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.22 ภาพที่ 4.7 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 7.44 ภาพที่ 4.8 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น G ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.43 ภาพที่ 4.8 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 7.68 ภาพที่ 4.9 (ก) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกล้องดิจิทัลรุ่น H ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.79 ภาพที่ 4.9 (ข) แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ได้จากการถ่ายภาพกล่องจำลองฉากธรรมชาติประเมินช่วงพลวัตได้เท่ากับ 8.49 สำหรับการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูลจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.3.2

### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของวิธีการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกเปล่าเทียบกับการประเมินช่วงพลวัตด้วยวิธีทั่วไป

ตารางที่ 4.9 ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงพลวัต

| กล้อง | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยวิธีทั่วไป | ช่วงพลวัตจากการประเมินด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ | ค่าคลาดเคลื่อน | ค่าความสอดคล้อง |
|---|---|---|---|---|
| F | 8.22 | 7.44 | 0.78 | 0.81 |
| G | 8.43 | 7.68 | 0.75 | 0.74 |
| H | 8.79 | 8.49 | 0.30 | 0.72 |

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีที่ทดสอบด้วยวิธีทั่วไปกับวิธีที่ใช้กล่องจำลองฉากธรรมชาติพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 1 สตอป ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกัน

ในการทดลองประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายนอกนี้จะใช้แผ่นสเกลสีเทาในระบบ NCS ติดไว้ในกล่องจำลองฉากธรรมชาติ ดังรูป 3.2 ดังนั้น การจะทำให้ค่าความสว่างของลำดับขั้นที่มืดที่สุดของฝั่งที่ได้รับแสงของกล่องมีความสว่างต่อเนื่องกับลำดับขั้นที่สว่างที่สุดของฝั่งที่ได้รับแสงน้อยได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับฟิล์มกรองแสงที่นำมากรองแสงให้ความเข้มแสงลดลงซึ่งไม่สามารถปรับระดับการกรองแสงได้อย่างละเอียด อีกทั้งจำนวนลำดับขั้นของ

แผ่นสเกลสีเทามีจำนวนจำกัด จึงเป็นการยากที่จะทำให้ลำดับขั้นทั้งสองต่อเนื่องกันอย่างดีได้เหมือนในการทดลองที่ผ่านมา เห็นได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะที่ชุดข้อมูลไม่ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำชุดข้อมูลมาเปรียบเทียบความสอดคล้องกันตามทฤษฎีความสอดคล้องของเพียร์สันแล้วพบว่า ชุดข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องกันอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากข้อจำกัดด้านการควบคุมความเข้มแสงจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองการประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติ โดยกล่องจำลองแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน และแบบภายนอก จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออ้างอิงตามทฤษฎีความสอดคล้องของเพียร์สันแล้ว กล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในและภายนอกสามารถใช้ประเมินช่วงพลวัตแทนการประเมินด้วยวิธีทั่วไปได้ และมีค่าความสอดคล้องเฉลี่ยระหว่างสองวิธีนี้เท่ากับ 0.999 และ 0.757 ตามลำดับ และจากผลการทดสอบการประเมินด้วยตาเปล่าด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายในให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 0-1.6 จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าวิธีที่ใช้ประเมินช่วงพลวัตที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการประเมินด้วยวิธีทั่วไปมากที่สุด คือ การประเมินช่วงพลวัตด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อช่วงพลวัต ได้แก่ ชนิดเซนเซอร์ จำนวนตัวรับภาพ ระบบประมวลผลของกล้องดิจิทัล ซอฟท์แวร์ที่บรรจุมาพร้อมระบบประมวลผล ค่าการชดเชยแสง เป็นต้น แต่ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อช่วงพลวัตอย่างแท้จริงนั้นคือ จำนวนตัวรับภาพ เนื่องจากตัวรับภาพเป็นหน่วยดักจับโฟตอน ดังนั้น การที่ตัวรับภาพมีจำนวนมาก จะทำให้ดักจับโฟตอนได้มากขึ้น ทั้งนี้คุณภาพของตัวรับภาพเป็นสิ่งสำคัญด้วยเช่นกัน เซนเซอร์ที่ดีไม่ควรมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป ซึ่งการตรวจสอบสัญญาณรบกวนได้มีกล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้ว ดังนั้น ในกล้องดิจิทัลที่มีจำนวนตัวรับภาพมากจึงมักมีราคาสูงตามมาด้วย

นอกจากนี้ จากการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนในส่วนของการแสดงผลข้อมูลนั้นเกิดขึ้นจากขั้นตอนการทำแผ่นสเกลสีเทาด้วยฟิล์มแบคลิต เนื่องจากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของฟิล์มไม่ได้มีคุณสมบัติเชิงเส้น ดังนั้น แนวโน้มของการคาดคะเนค่าความสว่างในหน่วยของพิกเซล เมื่อนำไปพิมพ์จึงส่งผลให้ไม่ได้ค่าความดำตามที่ต้องการ โดยจะเห็นได้ว่าข้อมูลบริเวณระดับกลางหายไปบางส่วน และส่วนใหญ่ปรากฏในช่วงระดับเงามืด แต่ผลกระทบนี้ไม่ได้ส่งผลต่อการประเมินช่วงพลวัตมากนักเนื่องจากแผ่นสเกลสีเทาโดยรวมแล้วยังสามารถไล่โทนให้ต่อเนื่องกับแผ่นลิ่มสเกลสีเทาในระบบ NCS ได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

กล่องจำลองฉากธรรมชาติทั้งสองประเภทนี้ยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการประเมินช่วงพลวัตได้ โดยเฉพาะกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน แผ่นลิ่มแสงสเกลสีเทาที่อยู่ภายในกล่องสามารถเพิ่มระดับให้กับการประเมินช่วงพลวัตได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเปรียบต่างของแหล่งกำเนิดแสง หากสามารถเพิ่มความเปรียบต่างให้อยู่ในระดับที่สูงมากๆ ได้ จะส่งผลให้แผ่นสเกลสีเทาสามารถเพิ่มขอบเขตการวัดค่าแสงไปด้วย ดังนั้น ในอนาคตที่กล้องดิจิทัลจะพัฒนาช่วงพลวัตได้กว้างขึ้นเรื่อยๆ กล่องจำลองฉากธรรมชาตินี้ก็จะสามารถประเมินช่วงพลวัตได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุดเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถเขียนซอฟท์แวร์ระบบช่วยประมวลผลภาพเพื่อให้ได้เส้นโค้งลักษณะเฉพาะรวดเร็วขึ้น ทำให้การประเมินช่วงพลวัตใช้เวลาน้อยลง และเพิ่มความสะดวกต่อผู้ที่ต้องการประเมินช่วงพลวัตมากขึ้นด้วย

# รายการอ้างอิง


[1] ISO 15739:2003 Photography–Electronic still-picture imaging–Noise measurements.

[2] Hsien-Che Lee. 2005. Introduction to Color Imaging Science. UK : University Press.

[3] R. Butler and S. Joinson. 2009. Photography test (DR)[Online].แหล่งที่มา: www.dpreview.com [2010, Dec 2]

[4] อำนาจ วังจีน และพรรณี บุญสุยา. 2552. สถิติทั่วไป (General Statistics). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

[5] มงคล ทองสงคราม. 2536. วิศวกรรมการส่องสว่าง (Illumination Engineering). กรุงเทพมหานคร: รามาการพิมพ์.

[6] พรทวี พึ่งรัศมี และมิตซูโอะ อิเคดะ. 2551. สีและการมองเห็นสี (Color and Color Vision). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[7] Peter M. Atkinson and Nicholas J. Tate. 1999. Advance in Remote Sensing and GIS Analysis. GB: Biddles Ltd, Guild ford and King’s Lynn.

[8] C.B. Neblette, F.R.P.S., F.S.P.S.E., Hon.P.S.A. 1962. Photography. India: Affiliated East-West Press PVT. LTD,.

[9] Ron Bigelow. 2010. Comprehensive Guide to Mastering Digital Photography [Online]. แหล่งที่มา: www.ronbigelow.com [2010, Oct 12]

[10] Paul E. Debevec, and Jitendra Malik. 2008. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. SIGGRAPH Article No. 31.

[11] Shen Feng et al. 2009. Recovering high dynamic range by Multi-Exposure Retinex. J. Vis. Commun. Image R. 20: 521–531.

[12] M.N. Inanici. 2006. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. Lighting Res. Technol. 38,2: 123-136.

[13] ISO 21550:2004 Photography—Electronic scanners for photographic images--Dynamic range measurements.

[14] Raymond A. Serway. 2004. Physics for Scientists and Engineers. the United States of America: Quebecor World.

[15] Viriya Pornkunvilai. 2004. Comparison of Digital Image Quality Obtained from Different Image Sensors. Master Dissertation Imaging Technology Faculty of Science Chulalongkorn University.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

ตาราง ก1 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล A ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 5.96 | 255 | -2.51 | 32 |
| 5.52 | 255 | -2.73 | 26 |
| 5.30 | 255 | -3.16 | 20 |
| 4.90 | 255 | -3.51 | 16 |
| 4.56 | 255 | -3.78 | 13 |
| 4.12 | 255 | -4.22 | 10 |
| 4.56 | 255 | -4.56 | 8 |
| 4.12 | 255 | -4.84 | 6 |
| 3.85 | 255 | -5.28 | 5 |
| 3.51 | 251 | -5.62 | 4 |
| 3.16 | 249 | -5.96 | 3 |
| 2.79 | 242 | -6.33 | 2 |
| 2.45 | 230 | -6.67 | 2 |
| 2.11 | 215 | -7.02 | 0 |
| 1.79 | 196 | -7.39 | 0 |
| 1.39 | 176 | -7.73 | 0 |
| 0.34 | 155 | -8.07 | 0 |
| 0.00 | 132 | -8.45 | 0 |
| -0.43 | 111 | -8.79 | 0 |
| -0.71 | 92 | -9.13 | 0 |
| -1.05 | 76 | -9.47 | 0 |
| -1.33 | 62 | -9.84 | 0 |
| -1.77 | 50 | -10.19 | 0 |
| -2.11 | 40 | | |

ตาราง ก2 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล B ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| **Log H (stop)** | **pixel value** | **Log H (stop)** | **pixel value** |
|---|---|---|---|
| 5.96 | 255 | -2.51 | 36 |
| 5.52 | 255 | -2.73 | 29 |
| 5.30 | 255 | -3.16 | 23 |
| 4.90 | 255 | -3.51 | 18 |
| 4.56 | 255 | -3.78 | 15 |
| 4.12 | 255 | -4.22 | 11 |
| 3.85 | 255 | -4.56 | 8 |
| 3.51 | 255 | -4.84 | 7 |
| 3.16 | 254 | -5.28 | 5 |
| 2.79 | 251 | -5.62 | 4 |
| 2.45 | 247 | -5.96 | 3 |
| 2.11 | 240 | -6.33 | 2 |
| 1.79 | 226 | -6.67 | 2 |
| 1.39 | 210 | -7.02 | 2 |
| 1.05 | 193 | -7.39 | 2 |
| 0.61 | 174 | -7.73 | 2 |
| 0.34 | 157 | -8.07 | 0 |
| 0.00 | 137 | -8.45 | 0 |
| -0.43 | 118 | -8.79 | 0 |
| -0.71 | 99 | -9.13 | 0 |
| -1.05 | 83 | -9.47 | 0 |
| -1.33 | 68 | -9.84 | 0 |
| -1.77 | 56 | -10.19 | 0 |
| -2.11 | 46 | | |

ตาราง ก3 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล C ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| **Log H (stop)** | **pixel value** | **Log H (stop)** | **pixel value** |
|---|---|---|---|
| 5.96 | 255 | -2.51 | 31 |
| 5.52 | 255 | -2.73 | 23 |
| 5.30 | 255 | -3.16 | 15 |
| 4.90 | 255 | -3.51 | 12 |
| 4.56 | 255 | -3.78 | 9 |
| 4.12 | 255 | -4.22 | 8 |
| 3.85 | 255 | -4.56 | 4 |
| 3.51 | 255 | -4.84 | 3 |
| 3.16 | 255 | -5.28 | 2 |
| 2.79 | 252 | -5.62 | 0 |
| 2.45 | 248 | -5.96 | 0 |
| 2.11 | 237 | -6.33 | 0 |
| 1.79 | 225 | -6.67 | 0 |
| 1.39 | 204 | -7.02 | 0 |
| 1.05 | 183 | -7.39 | 0 |
| 0.61 | 168 | -7.73 | 0 |
| 0.34 | 147 | -8.07 | 0 |
| 0.00 | 126 | -8.45 | 0 |
| -0.43 | 110 | -8.79 | 0 |
| -0.71 | 90 | -9.13 | 0 |
| -1.05 | 72 | -9.47 | 0 |
| -1.33 | 62 | -9.84 | 0 |
| -1.77 | 49 | -10.19 | 0 |
| -2.11 | 37 | | |

ตาราง ก4 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล D ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 5.96 | 255 | -2.51 | 39 |
| 5.52 | 255 | -2.73 | 31 |
| 5.30 | 255 | -3.16 | 23 |
| 4.90 | 255 | -3.51 | 18 |
| 4.56 | 255 | -3.78 | 15 |
| 4.12 | 255 | -4.22 | 10 |
| 3.85 | 254 | -4.56 | 6 |
| 3.51 | 247 | -4.84 | 4 |
| 3.07 | 239 | -5.28 | 2 |
| 2.79 | 230 | -5.62 | 2 |
| 2.45 | 219 | -5.96 | 1 |
| 2.11 | 207 | -6.33 | 0 |
| 1.79 | 193 | -6.67 | 0 |
| 1.39 | 180 | -7.02 | 0 |
| 0.99 | 166 | -7.39 | 0 |
| 0.68 | 153 | -7.73 | 0 |
| 0.34 | 140 | -8.07 | 0 |
| 0.00 | 123 | -8.45 | 0 |
| -0.27 | 108 | -8.79 | 0 |
| -0.71 | 95 | -9.13 | 0 |
| -1.05 | 83 | -9.47 | 0 |
| -1.33 | 72 | -9.84 | 0 |
| -1.77 | 61 | -10.19 | 0 |
| -2.11 | 50 | | |

ตาราง ก5 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล E ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 6.84 | 255 | -1.84 | 47 |
| 6.39 | 255 | -2.06 | 34 |
| 6.17 | 255 | -2.51 | 26 |
| 5.76 | 255 | -2.86 | 17 |
| 5.41 | 255 | -3.14 | 12 |
| 4.96 | 255 | -3.59 | 10 |
| 4.67 | 255 | -3.94 | 7 |
| 4.32 | 255 | -4.22 | 6 |
| 3.98 | 253 | -4.67 | 5 |
| 3.59 | 250 | -5.02 | 4 |
| 3.24 | 247 | -5.37 | 3 |
| 2.89 | 240 | -5.76 | 2 |
| 2.57 | 232 | -6.10 | 2 |
| 2.16 | 223 | -6.45 | 1 |
| 1.81 | 207 | -6.84 | 1 |
| 1.36 | 189 | -7.19 | 1 |
| 1.08 | 177 | -7.54 | 1 |
| 0.73 | 158 | -7.92 | 0 |
| 0.44 | 135 | -8.27 | 0 |
| 0 | 123 | -8.62 | 0 |
| -0.34 | 107 | -8.97 | 0 |
| -0.63 | 87 | -9.35 | 0 |
| -1.08 | 75 | -9.70 | 0 |
| -1.43 | 61 | | |

ตาราง ก6 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล A ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 4.80 | 255 | -0.85 | 104 |
| 4.49 | 255 | -0.98 | 95 |
| 4.35 | 255 | -1.08 | 85 |
| 4.24 | 255 | -1.55 | 70 |
| 3.57 | 255 | -0.68 | 107 |
| 3.13 | 254 | -0.76 | 102 |
| 2.72 | 249 | -0.97 | 93 |
| 2.36 | 239 | -1.20 | 83 |
| 1.89 | 228 | -1.40 | 75 |
| 1.50 | 217 | -1.62 | 68 |
| 0.88 | 184 | -1.77 | 62 |
| 0.59 | 172 | -2.03 | 55 |
| 0.21 | 149 | -2.25 | 49 |
| -0.24 | 119 | -2.50 | 42 |
| -0.04 | 144 | -3.09 | 31 |
| 0.03 | 145 | -3.41 | 26 |
| 0.08 | 146 | -3.58 | 23 |
| 0.04 | 145 | -3.87 | 19 |
| 0.10 | 143 | -4.16 | 17 |
| 0.16 | 140 | -4.54 | 14 |
| 0.10 | 138 | -5.28 | 10 |
| 0 | 130 | -5.85 | 8 |
| -0.30 | 120 | -6.95 | 5 |
| -0.47 | 112 | -7.57 | 2 |

ตาราง ก7 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล B ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| **Log H (stop)** | **pixel value** | **Log H (stop)** | **pixel value** |
|---|---|---|---|
| 4.04 | 255 | -0.46 | 116 |
| 4.03 | 255 | -0.57 | 109 |
| 3.92 | 255 | -0.65 | 101 |
| 3.82 | 255 | -1.05 | 83 |
| 3.26 | 254 | -0.32 | 108 |
| 2.89 | 250 | -0.38 | 104 |
| 2.54 | 241 | -0.56 | 96 |
| 2.24 | 231 | -0.75 | 88 |
| 1.85 | 216 | -0.93 | 81 |
| 1.52 | 206 | -1.10 | 74 |
| 0.99 | 179 | -1.24 | 68 |
| 0.75 | 170 | -1.46 | 61 |
| 0.43 | 152 | -1.64 | 56 |
| 0.04 | 129 | -1.85 | 50 |
| 0.21 | 142 | -2.34 | 34 |
| 0.28 | 144 | -2.62 | 29 |
| 0.32 | 146 | -2.76 | 26 |
| 0.28 | 145 | -3.00 | 23 |
| 0.34 | 144 | -3.25 | 20 |
| 0.39 | 143 | -3.56 | 18 |
| 0.34 | 141 | -4.19 | 15 |
| 0.25 | 137 | -4.67 | 13 |
| 0 | 130 | -5.59 | 11 |
| -0.14 | 124 | -6.12 | 7 |

ตาราง ก8 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล C ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 3.30 | 255 | -0.62 | 111 |
| 3.29 | 255 | -0.72 | 104 |
| 3.19 | 255 | -0.79 | 96 |
| 3.11 | 255 | -1.13 | 82 |
| 2.62 | 255 | -0.50 | 104 |
| 2.30 | 253 | -0.55 | 100 |
| 1.99 | 247 | -0.71 | 91 |
| 1.73 | 233 | -0.88 | 82 |
| 1.39 | 216 | -1.03 | 74 |
| 1.10 | 202 | -1.18 | 67 |
| 0.64 | 172 | -1.30 | 61 |
| 0.43 | 162 | -1.49 | 54 |
| 0.16 | 146 | -1.65 | 48 |
| -0.18 | 123 | -1.83 | 40 |
| -0.03 | 136 | -2.26 | 28 |
| 0.02 | 139 | -2.50 | 23 |
| 0.06 | 139 | -2.63 | 21 |
| 0.03 | 139 | -2.84 | 16 |
| 0.07 | 138 | -3.05 | 15 |
| 0.11 | 137 | -3.33 | 13 |
| 0.07 | 135 | -3.87 | 9 |
| 0 | 131 | -4.29 | 7 |
| -0.22 | 124 | -5.09 | 5 |
| -0.34 | 118 | -5.55 | 1 |

ตาราง ก9 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล D ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| **Log H (stop)** | **pixel value** | **Log H (stop)** | **pixel value** |
|---|---|---|---|
| 4.83 | 255 | 0.21 | 139 |
| 5.01 | 255 | 0.08 | 132 |
| 4.89 | 255 | 0 | 126 |
| 4.79 | 255 | -0.41 | 113 |
| 4.19 | 255 | 0.35 | 137 |
| 3.79 | 255 | 0.29 | 135 |
| 3.42 | 245 | 0.10 | 126 |
| 3.10 | 238 | -0.10 | 119 |
| 2.68 | 228 | -0.28 | 111 |
| 2.33 | 220 | -0.47 | 102 |
| 1.77 | 195 | -0.62 | 96 |
| 1.51 | 187 | -0.85 | 87 |
| 1.17 | 172 | -1.04 | 79 |
| 0.75 | 151 | -1.27 | 70 |
| 0.93 | 162 | -1.80 | 54 |
| 1.00 | 165 | -2.09 | 46 |
| 1.05 | 165 | -2.25 | 42 |
| 1.01 | 164 | -2.50 | 36 |
| 1.07 | 163 | -2.77 | 31 |
| 1.12 | 161 | -3.10 | 25 |
| 1.07 | 159 | -3.77 | 16 |
| 0.97 | 155 | -4.28 | 10 |
| 0.70 | 149 | -5.27 | 6 |
| 0.54 | 144 | -5.83 | 1 |

ตาราง ก10 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล E ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| **Log H (stop)** | **pixel value** | **Log H (stop)** | **pixel value** |
|---|---|---|---|
| 4.41 | 255 | -0.93 | 103 |
| 4.40 | 255 | -1.06 | 96 |
| 4.26 | 255 | -1.16 | 90 |
| 4.15 | 255 | -1.62 | 77 |
| 3.48 | 245 | -0.76 | 100 |
| 3.04 | 237 | -0.84 | 97 |
| 2.63 | 226 | -1.05 | 90 |
| 2.27 | 207 | -1.28 | 82 |
| 1.81 | 192 | -1.48 | 75 |
| 1.42 | 181 | -1.69 | 68 |
| 0.80 | 154 | -1.85 | 64 |
| 0.51 | 174 | -2.11 | 58 |
| 0.13 | 133 | -2.33 | 52 |
| -0.32 | 114 | -2.58 | 45 |
| -0.13 | 125 | -3.16 | 32 |
| -0.04 | 127 | -3.48 | 26 |
| 0 | 128 | -3.66 | 23 |
| -0.04 | 127 | -3.94 | 18 |
| 0.02 | 125 | -4.23 | 14 |
| 0.07 | 124 | -4.61 | 11 |
| 0.02 | 122 | -5.35 | 7 |
| -0.08 | 119 | -5.91 | 4 |
| -0.38 | 114 | -7.01 | 3 |
| -0.55 | 108 | -7.63 | 1 |

# ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล A ด้วยตาเปล่า

| ผู้สังเกต | ขั้นแรกที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ขั้นสุดท้ายที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ช่วงพลวัต |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 28 | 7.67 |
| 2 | 5 | 32 | 9.00 |
| 3 | 5 | 33 | 9.30 |
| 4 | 5 | 32 | 9.00 |
| 5 | 6 | 33 | 9.00 |
| 6 | 5 | 31 | 8.67 |
| 7 | 5 | 33 | 9.30 |
| 8 | 5 | 32 | 9.00 |
| 9 | 5 | 31 | 8.67 |
| 10 | 5 | 31 | 8.67 |
| 11 | 6 | 32 | 8.67 |
| 12 | 6 | 32 | 8.67 |
| 13 | 6 | 32 | 8.67 |
| 14 | 5 | 32 | 9.00 |
| 15 | 5 | 32 | 9.00 |
| 16 | 5 | 32 | 9.00 |
| 17 | 5 | 32 | 9.00 |
| 18 | 5 | 32 | 9.00 |
| 19 | 6 | 32 | 8.67 |
| 20 | 6 | 32 | 8.67 |
| $\bar{X}$ | | | 8.83 |

ตารางที่ ข2 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล B ด้วยตาเปล่า

| ผู้สังเกต | ขั้นแรกที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ขั้นสุดท้ายที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ช่วงพลวัต |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 33 | 9.33 |
| 2 | 5 | 34 | 9.67 |
| 3 | 5 | 32 | 9.00 |
| 4 | 5 | 32 | 9.00 |
| 5 | 5 | 32 | 9.00 |
| 6 | 5 | 33 | 9.33 |
| 7 | 5 | 33 | 9.33 |
| 8 | 5 | 33 | 9.33 |
| 9 | 5 | 33 | 9.33 |
| 10 | 5 | 32 | 9.00 |
| 11 | 4 | 33 | 9.67 |
| 12 | 4 | 32 | 9.33 |
| 13 | 4 | 33 | 9.67 |
| 14 | 4 | 34 | 10.00 |
| 15 | 4 | 33 | 9.67 |
| 16 | 4 | 33 | 9.67 |
| 17 | 4 | 33 | 9.67 |
| 18 | 4 | 33 | 9.67 |
| 19 | 4 | 33 | 9.67 |
| 20 | 5 | 33 | 9.33 |
| $\bar{X}$ | | | 9.43 |

ตารางที่ ข3 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล C ด้วยตาเปล่า

| ผู้สังเกต | ขั้นแรกที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ขั้นสุดท้ายที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ช่วงพลวัต |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 31 | 8.67 |
| 2 | 5 | 30 | 8.33 |
| 3 | 5 | 32 | 9.00 |
| 4 | 5 | 32 | 9.00 |
| 5 | 4 | 30 | 8.67 |
| 6 | 5 | 31 | 8.67 |
| 7 | 5 | 31 | 8.67 |
| 8 | 5 | 31 | 8.67 |
| 9 | 5 | 31 | 8.67 |
| 10 | 4 | 31 | 9.00 |
| 11 | 4 | 31 | 9.00 |
| 12 | 4 | 32 | 9.33 |
| 13 | 4 | 32 | 9.33 |
| 14 | 4 | 31 | 9.00 |
| 15 | 4 | 31 | 9.00 |
| 16 | 4 | 31 | 9.00 |
| 17 | 4 | 31 | 9.00 |
| 18 | 4 | 31 | 9.00 |
| 19 | 4 | 31 | 9.00 |
| 20 | 4 | 32 | 9.33 |
| $\bar{x}$ | | | 8.92 |

ตารางที่ ข4 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล D ด้วยตาเปล่า

| ผู้สังเกต | ขั้นแรกที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ขั้นสุดท้ายที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ช่วงพลวัต |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 32 | 9.33 |
| 2 | 5 | 32 | 9.00 |
| 3 | 5 | 32 | 9.00 |
| 4 | 5 | 32 | 9.00 |
| 5 | 5 | 32 | 9.00 |
| 6 | 5 | 32 | 9.00 |
| 7 | 5 | 31 | 8.67 |
| 8 | 5 | 31 | 8.67 |
| 9 | 5 | 32 | 9.00 |
| 10 | 5 | 32 | 9.00 |
| 11 | 5 | 32 | 9.00 |
| 12 | 5 | 32 | 9.00 |
| 13 | 5 | 32 | 9.00 |
| 14 | 5 | 31 | 8.67 |
| 15 | 5 | 31 | 8.67 |
| 16 | 5 | 32 | 9.00 |
| 17 | 5 | 32 | 9.00 |
| 18 | 5 | 32 | 9.00 |
| 19 | 5 | 32 | 9.00 |
| 20 | 5 | 32 | 9.00 |
| $\bar{X}$ | | | 8.95 |

ตารางที่ ข5 ผลการประเมินกล้องดิจิทัล E ด้วยตาเปล่า

| ผู้สังเกต | ขั้นแรกที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ขั้นสุดท้ายที่สามารถแยกความแตกต่างได้ | ช่วงพลวัต |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 34 | 10.00 |
| 2 | 4 | 35 | 10.33 |
| 3 | 4 | 34 | 10.00 |
| 4 | 4 | 35 | 10.33 |
| 5 | 4 | 35 | 10.33 |
| 6 | 4 | 35 | 10.33 |
| 7 | 4 | 35 | 10.33 |
| 8 | 4 | 35 | 10.33 |
| 9 | 4 | 35 | 10.33 |
| 10 | 4 | 33 | 9.67 |
| 11 | 4 | 34 | 10.00 |
| 12 | 4 | 34 | 10.00 |
| 13 | 4 | 35 | 10.33 |
| 14 | 4 | 35 | 10.33 |
| 15 | 4 | 35 | 10.33 |
| 16 | 5 | 35 | 10.00 |
| 17 | 5 | 35 | 10.00 |
| 18 | 4 | 34 | 10.00 |
| 19 | 4 | 35 | 10.33 |
| 20 | 4 | 35 | 10.33 |
| $\bar{x}$ | | | 10.18 |

# ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค1 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล F ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 3.41 | 255 | -1.35 | 49 |
| 3.13 | 254 | -1.62 | 40 |
| 2.88 | 253 | -1.98 | 32 |
| 2.55 | 250 | -2.25 | 25 |
| 2.28 | 243 | -2.47 | 20 |
| 2.02 | 235 | -2.83 | 15 |
| 1.70 | 224 | -3.10 | 12 |
| 1.43 | 212 | -3.33 | 10 |
| 1.07 | 199 | -3.76 | 7 |
| 0.85 | 180 | -3.96 | 5 |
| 0.57 | 162 | -4.23 | 4 |
| 0.35 | 146 | -4.53 | 3 |
| 0 | 122 | -4.81 | 2 |
| -0.27 | 105 | -5.08 | 1 |
| -0.49 | 88 | -5.39 | 1 |
| -0.85 | 74 | -5.66 | 1 |
| -1.12 | 61 | -5.94 | 0 |

ตารางที่ ค2 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล G ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 4.52 | 255 | -0.63 | 104 |
| 4.14 | 255 | -0.82 | 91 |
| 3.90 | 255 | -1.19 | 80 |
| 3.61 | 255 | -1.48 | 70 |
| 3.32 | 255 | -1.72 | 62 |
| 3.05 | 254 | -2.09 | 55 |
| 2.71 | 248 | -2.39 | 47 |
| 2.37 | 236 | -2.62 | 40 |
| 2.09 | 225 | -3.00 | 33 |
| 1.80 | 211 | -3.29 | 27 |
| 1.51 | 198 | -3.58 | 21 |
| 1.27 | 180 | -3.90 | 18 |
| 0.90 | 165 | -4.19 | 15 |
| 0.61 | 151 | -4.49 | 9 |
| 0.37 | 140 | -4.81 | 6 |
| 0 | 130 | -5.10 | 5 |
| -0.29 | 118 | -5.39 | 3 |

ตารางที่ ค3 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล H ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีทั่วไป

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 4.04 | 255 | -0.98 | 92 |
| 3.67 | 255 | -1.16 | 79 |
| 3.44 | 255 | -1.53 | 70 |
| 3.16 | 255 | -1.81 | 61 |
| 2.87 | 254 | -2.04 | 53 |
| 2.61 | 244 | -2.41 | 45 |
| 2.28 | 234 | -2.69 | 40 |
| 1.94 | 222 | -2.93 | 31 |
| 1.68 | 208 | -3.29 | 25 |
| 1.39 | 194 | -3.58 | 21 |
| 1.11 | 178 | -3.86 | 17 |
| 0.88 | 164 | -4.17 | 11 |
| 0.51 | 152 | -4.46 | 7 |
| 0.23 | 141 | -4.74 | 5 |
| 0 | 129 | -5.06 | 4 |
| -0.36 | 118 | -5.34 | 2 |
| -0.65 | 105 | -5.62 | 2 |

ตารางที่ ค4 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล F ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 3.42 | 253 | 1.24 | 172 |
| 3.31 | 252 | 0.96 | 153 |
| 3.15 | 249 | 0.65 | 131 |
| 2.96 | 245 | 0.40 | 115 |
| 2.42 | 232 | 0.25 | 118 |
| 2.32 | 227 | 0.12 | 106 |
| 2.14 | 219 | -0.09 | 91 |
| 1.94 | 210 | -0.38 | 77 |
| 1.50 | 191 | -0.92 | 57 |
| 1.00 | 162 | -1.21 | 54 |
| 0.69 | 151 | -1.37 | 44 |
| 0 | 117 | -1.99 | 30 |
| -0.53 | 96 | -2.40 | 22 |
| -1.80 | 69 | -4.01 | 15 |

ตารางที่ ค5 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล G ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 3.53 | 253 | 1.28 | 179 |
| 3.41 | 249 | 0.99 | 164 |
| 3.25 | 243 | 0.67 | 151 |
| 3.05 | 237 | 0.41 | 137 |
| 2.50 | 218 | 0.26 | 140 |
| 2.39 | 214 | 0.12 | 132 |
| 2.20 | 206 | -0.10 | 119 |
| 2.00 | 198 | -0.40 | 102 |
| 1.55 | 177 | -0.95 | 77 |
| 1.03 | 150 | -1.25 | 77 |
| 0.71 | 144 | -1.42 | 66 |
| 0 | 121 | -2.05 | 47 |
| -0.54 | 104 | -2.48 | 36 |
| -1.86 | 76 | -4.14 | 22 |

ตารางที่ ค6 ข้อมูลช่วงพลวัตของกล้องดิจิทัล H ที่ได้จากการทดสอบด้วยกล่องจำลองฉากธรรมชาติแบบภายใน

| Log H (stop) | pixel value | Log H (stop) | pixel value |
|---|---|---|---|
| 3.91 | 252 | 1.42 | 182 |
| 3.77 | 248 | 1.10 | 166 |
| 3.60 | 242 | 0.74 | 151 |
| 3.38 | 238 | 0.46 | 137 |
| 2.76 | 217 | 0.29 | 145 |
| 2.65 | 214 | 0.14 | 135 |
| 2.44 | 206 | -0.11 | 122 |
| 2.22 | 199 | -0.44 | 105 |
| 1.71 | 178 | -1.05 | 78 |
| 1.14 | 151 | -1.39 | 82 |
| 0.79 | 146 | -1.57 | 69 |
| 0 | 123 | -2.27 | 48 |
| -0.60 | 106 | -2.74 | 36 |
| -2.06 | 76 | -4.58 | 20 |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐิธิมานัน ศรีมงคล เกิดวันที่ 28 ธันวาคม 2529 จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากสาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้โครงการพัฒนากำลังคนทางด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ปีการศึกษา 2550 และได้เข้าศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551