

ระบบตรวจระดับความสุกของกล้วยแบบสองมิติด้วยแสง

PHOTONICS-BASED TWO-DIMENSIONAL BANANA RIPENESS
INDICATION SYSTEM



T132486

ยุทธนา อินทรวันณี

YUTTANA INTARAVANNE

รพ.
๑๓๖๕๖
๑๕๕๖

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

132486

1.8.๒.๕57

b.12609915
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2556

KMITL-2013-NT-M-001-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTONICS-BASED TWO-DIMENSIONAL BANANA RIPENESS INDICATION SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2013-NT-M-001-012



COPYRIGHT 2013

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

นักศึกษา

รหัสประจำตัว

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ระบบตรวจระดับความสุกของกล้วยแบบสองมิติด้วยแสง

นายยุทธนา อินทรวันณี

51614262

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

2556

ศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว

ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อผลไม้ที่มีสีเขียวอย่างกล้วย และมะม่วง มีการเจริญเติบโตจาก ระยะที่ยังไม่สุกไปจนถึงระยะของการสุกเต็มที่ สีของผลไม้เหล่านี้จะเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง อันเนื่องมาจากการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ อย่างไรก็ตามเมื่อผลไม้สุกมีสีเหลืองแล้วการประเมิน ความสุกด้วยสายตาหรือด้วยการใช้เครื่องมือตรวจสอบเพื่อแยกระหว่างผลที่สุกเต็มที่กับสุกห่อหมจะ เป็นไปด้วยความยากลำบากเนื่องจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวของผลไม้ยังคงมีสีเหลืองไม่มีการ เปลี่ยนแปลง และจะตรวจสอบได้อีกครั้งก็ต่อเมื่อมีจุดสีน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่าผลไม้สุกมากเกินไป หรือมีความเสียหายจากความสุกห่อหมเกิดขึ้นแล้ว นอกจากนี้วิธีการและระบบแบบดั้งเดิมยังไม่ สามารถทำการจำแนกและระบุบริเวณต่างๆ ของผลกล้วยออกเป็นระยะที่ยังไม่สุก สุกเต็มที่ และสุก ห่อหมได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นไปที่การวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการและระบบสำหรับการตรวจวัดแบบสอง มิติเพื่อประเมินความสุกของกล้วยแบบไม่ทำลาย ประเด็นสำคัญของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้คือการ วิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การส่องสว่างจากแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตไปพร้อม กันโดยใช้โทรศัพท์มือถือฉลาดที่มีหน่วยประมวลผล หน่วยความจำภายใน กล้องถ่ายรูป และ ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) เป็นตัวรับสัญญาณภาพสเปกตรัมและประมวลผลภาพ ใน งานวิจัยนี้ภาพสเปกตรัมทั้งสองจะถูกนำมาแยกองค์ประกอบของภาพสีออกมาเป็นระนาบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนสำหรับใช้ในการประเมินความสุกของกล้วย เมื่อ ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงขาวกล้วยที่สุกแล้วจะมีสีเหลือง ซึ่งลักษณะสีที่เป็นองค์ประกอบอย่างเด่นชัด คือระนาบของสีแดงและสีเขียว ด้วยเหตุนี้ระนาบสีทั้งสองจึงถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้หาอัตราส่วนของ แสงสีขาว (WLR) สำหรับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตกล้วยจะมีการเรืองแสงเกิดขึ้นในช่วงของ แสงสีน้ำเงิน-เขียว ด้วยลักษณะสีที่เด่นชัดนี้ระนาบของสีน้ำเงินและสีเขียวจึงถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้หา อัตราส่วนของการเรืองแสง (UVR) จากการทดสอบกับกล้วยทั้งหมด 10 ผล โดยทำการเก็บภาพของ กล้วยตั้งแต่ในระยะที่ยังไม่สุกจนถึงระยะที่สุกห่อหม ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด 9 วัน พบว่าในขณะที่กล้วยอยู่ ในระยะยังไม่สุกซึ่งจะมีสีเขียว อัตราส่วนของแสงขาวเฉลี่ยของกล้วยทั้งผล ($\overline{WLR}$) จะอยู่ที่ประมาณ 1.1 ± 0.06 เมื่อกล้วยเริ่มสุกเต็มที่ $\overline{WLR}$ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 1.5 ± 0.13 และจะอยู่ใน ช่วงนี้จนถึงระยะสุกห่อหม จากความสัมพันธ์ของ $\overline{WLR}$ กับระยะการสุกของกล้วยสามารถนำมา คำนวณหาค่าเริ่มต้นของการสุก (h) ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.35 ในทำนองเดียวกัน สำหรับอัตราส่วนของ การเรืองแสงเฉลี่ยของกล้วยทั้งผล ($\overline{UVR}$) ในระยะที่ยังไม่สุกจะอยู่ในช่วง 6.0-8.0 เมื่อกล้วยเริ่ม สุกเต็มที่ $\overline{UVR}$ จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงช่วง 3.5-5.0 และจะมีแนวโน้มกลับมาสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะ

สุขห่อ้ม จากความสัมพันธ์ของ $\overline{UVR}$ กับระยะการสุขของกล้วยสามารถนำมาคำนวณหาค่าเริ่มต้นของการสุขห่อ้ม (k) ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.15 เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของกล้วยด้วยโทรศัพท์มือถือฉลาด WLR และ UVR ในแต่ละจุดภาพที่ตำแหน่ง (x,y) ($WLR(x,y)$ และ $UVR(x,y)$) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น h และ k โดยที่จุดภาพ (x,y) จะอยู่ในระยะที่ยังไม่สุขเมื่อ $WLR(x,y)$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ h สำหรับในระยะสุขเต็มที่ $UVR(x,y)$ และ $WLR(x,y)$ มีค่าน้อยกว่า k และมากกว่า h ตามลำดับ และเมื่อ $WLR(x,y)$ มีค่ามากกว่า h และ $UVR(x,y)$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ k จุดภาพ (x,y) จะอยู่ในระยะที่สุขห่อ้ม จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าการใช้โทรศัพท์มือถือฉลาดผสมผสานกับหลักการทางด้านการวิเคราะห์สเปกตรัมแบบสองมิติ สามารถนำมาใช้จำแนกกล้วยในระยะที่ยังไม่สุข สุขเต็มที่ และสุขห่อ้มได้ และนอกจากนี้ยังสามารถระบุพื้นที่ในแต่ละบริเวณต่างๆ ของกล้วยตามระยะของความสุกได้ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: การประเมินความสุข, การตรวจวัดแบบไม่ทำลาย, การตรวจวัดแบบสองมิติ, การวิเคราะห์ภาพสเปกตรัม, โทรศัพท์มือถือฉลาด, กล้วย



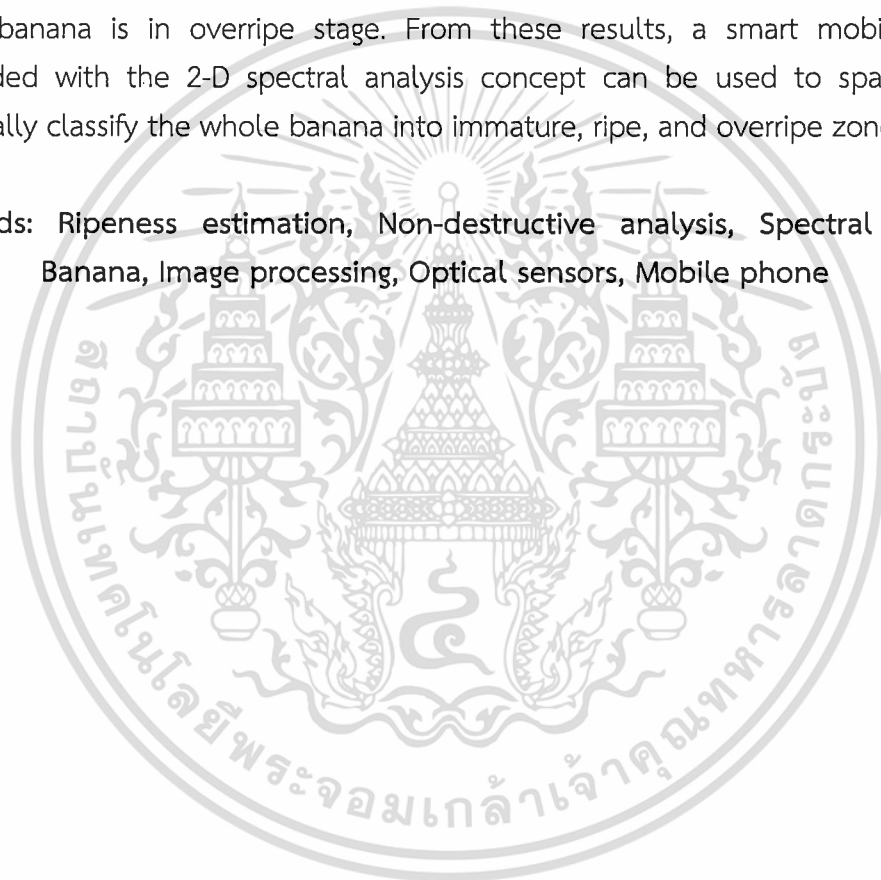
Thesis Title	Photonics-based Two-Dimensional Banana Ripeness Indication System
Student	Mr.Yuttana Intaravanne
Student ID	51614262
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2013
Thesis Advisor	Prof.Dr. Jiti Nukeaw
Thesis Coadvisor	Dr. Sarun Sumriddetchkajorn

ABSTRACT

It is known that when green fruits such as bananas and mangoes grow from the immature to the ripe stages, their color changes from green to yellow due to the degradation of the chlorophyll. However, once the green fruits are yellow, it is difficult to classify them into the ripe and the overripe stages by using human eyes or other available instruments. This is because the fruit color is unchanged until undesired brown spots appear. In this scenario, the banana is already in the unwanted overripe stage or has been damaged. In addition, the previous methods cannot spatially classify the banana into immature, ripe and overripe zones. With this issue, this thesis focuses on the development of a non-destructive method and its related system for two-dimensional bananas ripeness estimation. Our key idea is to simultaneously analyze two broad-spectral images under white light and ultraviolet illuminations by using smart mobile phone that has a central processor unit, an internal memory, a digital color camera, and an Android operating system for acquiring and processing an image. In this thesis, these two broad-spectral images are separated into red, green, and blue color components. When the ripe banana is excited by white light illumination, it appears as yellow whose dominant colors are red and green. In this case, the red and green color values of the image are used to calculate the white light ratio (WLR). For ultraviolet illumination, the banana under excitation emits blue-green luminescence. In this case, the blue and green color values of the image are used to calculate the ultraviolet light ratio (UVR). In this thesis, ten bananas are studied and the ripeness level of each banana starts from its immature stage to the overripe stage, which takes about 9 days. The green banana in the immature stage shows the result of the average WLR of the whole banana image ($\overline{WLR}$) around 1.1 ± 0.06 . When the banana begins to reach the ripe stage, $\overline{WLR}$ will suddenly increase to around 1.5 ± 0.13 . It stays in this range until it is overripe. From the relationship between $\overline{WLR}$ and ripening stages of the banana, the threshold

value h of 1.35 is determined. For blue-green luminescence, an average UVR of 6.0-8.0 in the immature stage is found. When the banana begins to reach the ripe stage, $\overline{UVR}$ will suddenly decrease to around 3.5-5.0. It then trends to increase when the banana becomes overripe. From the relationship between $\overline{UVR}$ and ripening stages of the banana, the threshold value k of 4.15 is determined. Under the analysis of these two broad-spectral images via a smart mobile phone, WLR and UVR at the pixel (x,y) are compared to the threshold values h and k , respectively. The pixel (x,y) of the banana image is in the immature stage when $WLR(x,y)$ is equal or less than h . In the ripe stage, $UVR(x,y)$ and $WLR(x,y)$ are less than k and greater than h , respectively. When $WLR(x,y)$ is greater than h and $UVR(x,y)$ is equal to or greater than k , the banana is in overripe stage. From these results, a smart mobile phone embedded with the 2-D spectral analysis concept can be used to spatially and specifically classify the whole banana into immature, ripe, and overripe zones.

Keywords: Ripeness estimation, Non-destructive analysis, Spectral analysis, Banana, Image processing, Optical sensors, Mobile phone



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.จิตติ หนูแก้ว ที่ได้กรุณาให้การช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร ซึ่งเป็นทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและผู้บังคับบัญชา ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ในการปฏิบัติงานที่ดี พร้อมกับให้การช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหาต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ดร. ศุภนิจ พรธีระภัทร หัวหน้าห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ (PTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้การช่วยเหลือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังเป็นหนึ่งในคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง ดร.อัชฌา กอบวิทยา คุณอาโมทย์ สมบูรณ์แก้ว คุณสถาพร จันทน์หอม คุณโกษม ไขยถาวร คุณรัฐศาสตร์ อัมฤทธิ์ คุณอุเทน บุญเยี่ยม และสมาชิก PTL ทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.สิรพัฒน์ ประโทนเทพ และ ดร.หุติยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะและช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่วัยเยาว์มาจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องที่ศึกษาอยู่ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้าได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณของบิดามารดาที่ทำให้ข้าพเจ้าได้มีแรงและกำลังใจในการต่อสู้กับปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่ผ่านเข้ามา รวมถึงญาติพี่น้องและคนใกล้ชิดทุกคนที่ให้ความรัก และความเข้าใจแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ท่านผู้อ่านไม่มากนักน้อย

ยุทธนา อินทวันณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การสุกและการเปลี่ยนสีของกล้วย.....	4
2.2 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยแบบทำลาย.....	6
2.2.1 การตรวจสอบความแข็งของเนื้อ.....	6
2.2.2 การตรวจหาปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด.....	7
2.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกลิ่นหอม.....	8
2.3 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยแบบไม่ทำลาย.....	10
2.3.1 การตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีน.....	10
2.3.2 การใช้ตัวตรวจรับกลิ่นหรือจมูกอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.3.3 การวิเคราะห์ความถี่สั่นพ้องทางเสียง.....	12
2.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของความจุไฟฟ้า.....	14
2.3.5 การใช้คลื่นสนามแม่เหล็กนิวเคลียร์.....	15
2.3.6 การวิเคราะห์ความมันวาว.....	16
2.3.7 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นแสงใน 1 มิติ.....	18
2.3.7.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของสองความยาวคลื่นแสง.....	18
2.3.7.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมการสะท้อนแสงในย่านที่ตามองเห็นถึงย่านอินฟราเรด.....	19
2.3.8 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นแสงใน 2 มิติ.....	21
2.3.8.1 การประมวลผลภาพหลายความยาวคลื่น.....	21
2.3.8.2 การวิเคราะห์สีจากเปลือก.....	24
2.3.8.3 การวิเคราะห์สีด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	27
2.3.8.4 การวิเคราะห์สีด้วยโปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์พกพา.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.8.5 การวิเคราะห์ลักษณะการเรืองแสง.....	30
2.4 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยด้วยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์.....	33
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์สำหรับติดตั้งระบบ	37
3.1.1 ตัวอย่างกล้วย.....	37
3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงขาว.....	38
3.1.3 แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	39
3.1.4 โพรศัพท์มือถือนฉลาด.....	40
3.1.5 วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐาน.....	41
3.1.6 พื้นหลังสำหรับวางตัวอย่างภายใต้การตรวจสอบ.....	42
3.2 การติดตั้งระบบตรวจวัดระดับความสุกกล้วยสำหรับห้องปฏิบัติการ.....	42
3.3 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	47
4.1 ภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสง.....	47
4.2 ภาพสเปกตรัมการเรืองแสง.....	50
4.3 การวิเคราะห์ค่าขีดเริ่มต้น.....	53
4.4 การบ่งชี้ความสุกกล้วยแบบ 2 มิติ.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
5.3 งานในอนาคต.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในระหว่างการสุกของผลไม้.....	5
2.2 ตัวตรวจรับแบบ Metal oxide ที่ใช้ในระบบตรวจรับกลิ่นจากกล้วย.....	12
2.3 เวลาของ Proton transverse relaxation และร้อยละของสัญญาณของ 3 องค์ประกอบในช่วงเวลา 7 วัน.....	15
2.4 ค่าเฉลี่ยของ Water self-diffusion coefficient ที่ได้จากกล้วยในช่วงเวลา 7 วัน.....	16



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการหาความแข็งแรงของผลไม้โดยวิธีการเจาะเข้าไปในเนื้อของผลไม้ (ภาพดัดแปลงจากวิธีการหาความแข็งแรงของมะเขือเทศ.....	6
2.2 ผลของแรงเจาะ (ก) ตามแนวแกน (ข) ตามแนวรัศมีของกล้วยในแต่ละวันที่เก็บเอาไว้ในอุณหภูมิต่างๆ กัน.....	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง TSS และ ระดับความสุกของกล้วย.....	8
2.4 รูปแบบของกราฟจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี GC ของกล้วยในระยะที่ (ด้านบน) มีสีเขียวปนเหลือง (ด้านล่าง) มีสีเหลืองเต็มใบหรือสุกเกินไป.....	9
2.5 อัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนของกล้วยเมื่อปล่อยให้สุกแบบธรรมชาติ.....	10
2.6 การตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนด้วยอุปกรณ์ที่ใช้พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	11
2.7 ระบบสำหรับใช้ตรวจรับกลิ่นจากกล้วยเพื่อใช้บ่งชี้ระดับความสุก.....	12
2.8 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความสุกของผลกล้วยด้วยคลื่นเสียง.....	13
2.9 กราฟแสดงแอมพลิจูดการสั่นของผลกล้วยต่อความถี่ต่างๆ ที่ใส่เข้าไป.....	13
2.10 โครงสร้างของวงจรสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้วย.....	14
2.11 การเปลี่ยนแปลงของค่า Relative permittivity ของกล้วยที่ความถี่ต่างๆ ในขณะที่กล้วยมีการเปลี่ยนแปลงของระดับความสุก.....	15
2.12 โครงสร้างเครื่องวัดความชื้นวาวของพื้นผิวโค้ง.....	17
2.13 ลักษณะสัญญาณจากตัวรับแสงเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุที่มุม 45°.....	18
2.14 โครงสร้างของหัววัด.....	18
2.15 ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ (ด้านบน) a และ (ด้านล่าง) b ที่วัดได้จากระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรร่วมกับความยาวคลื่น 610 เมื่อเทียบกับปริมาณของคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่จริงในเปลือกกล้วย.....	19
2.16 แบบอย่างสเปกตรัมการสะท้อนแสงของกล้วยในย่านที่ตามองเห็นถึงย่านอินฟราเรด.....	20
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Red edge กับระดับความสุกของกล้วย.....	20
2.18 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการทางแสงกับปริมาณที่วัดได้จากเครื่อง HPLC.....	21
2.19 ระบบถ่ายภาพสเปกตรัมหลายความยาวคลื่น.....	22
2.20 สเปกตรัมหลายความยาวคลื่นที่ได้จากการสะท้อนแสงของกล้วยที่ระดับความสุกต่างๆ ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ (ก) 20 °C (ข) 25 °C และ (ค) 30 °C.....	23
2.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากกล้วยในระดับความสุกต่างๆ.....	24
2.22 โครงสร้างของระบบสำหรับตรวจวัดสีจากเปลือกกล้วย.....	25
2.23 ผลการคัดแยกกล้วยตามระดับความสุกด้วยวิธี SFS.....	26
2.24 โปรแกรมสำหรับจัดกลุ่มกล้วยตามระดับความสุก.....	26
2.25 การเปลี่ยนแปลงของค่า L*, C*, และ Hue ตามระยะเวลาที่กล้วยที่ถูกเอาไว้.....	27
2.26 ภาพกล้วยที่ถ่ายได้ภายใต้แสงขาว.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ลักษณะภาพสีภายหลังจากการวิเคราะห์แบบฮิสโตแกรมในระนาบของ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน.....	28
2.28 โปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์พกพาตลาดที่สามารถนำมาใช้วัดสีของผลไม้ได้.....	29
2.29 ภาพสเปกตรัม (ก) การสะท้อนแสงภายใต้แสงขาว และ (ข) การเรืองแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	30
2.30 (ก) สเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยในย่านของสีน้ำเงิน-เขียว และ (ข) ปริมาณการเรืองแสงของกล้วยในระดับความสุกต่างๆ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	32
2.31 โครงสร้างระบบตรวจวัดความสุกกล้วยโดยใช้โทรศัพท์มือถือ (ก) รุ่นสำหรับตั้งโต๊ะ และ (ข) รุ่นสำหรับพกพา.....	34
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.2 ตัวอย่างกล้วยหอมสำหรับการทดสอบ.....	37
3.3 แหล่งกำเนิดแสงขาว	38
3.4 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงขาว.....	38
3.5 แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	39
3.6 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	39
3.7 โทรศัพท์มือถือตลาดที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
3.8 วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐาน.....	41
3.9 ลักษณะการสะท้อนแสงในความยาวคลื่นต่างๆ ของวัสดุสะท้อนแสง.....	41
3.10 พื้นหลังสำหรับวางกล้วยขณะทำการทดสอบ.....	42
3.11 การติดตั้งการทดลองตามโครงสร้างในรูปที่ 2.28 (ก).....	43
3.12 ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาว.....	43
3.13 ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	44
3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมประยุกต์.....	45
3.15 โลโก้ของโปรแกรมประยุกต์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกกล้วย.....	45
3.16 โปรแกรมตรวจวัดระดับความสุกกล้วยบนโทรศัพท์มือถือตลาดที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์.....	46
4.1 ตัวอย่างภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงของกล้วยตั้งแต่ระยะที่ยังไม่สุกจนถึงสุกหอมภายใต้แสงขาว.....	47
4.2 การแยกองค์ประกอบของระนาบสีออกจากภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสง.....	48
4.3 ค่าเฉลี่ยสีของภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงของระนาบ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน.....	49
4.4 ตัวอย่างภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยตั้งแต่ระยะที่ยังไม่สุกจนถึงสุกหอมเมื่อถูกกระตุ้นภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	50
4.5 การแยกองค์ประกอบของระนาบสีออกจากภาพสเปกตรัมการเรืองแสง.....	51
4.6 ค่าเฉลี่ยสีของภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของระนาบ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า (ก) $\overline{WLR}$ และ (ข) $\overline{UVR}$ เมื่อกลั้วผ่านจากระยะที่ยังไม่สุก จนถึงระยะสุกหอม.....	54
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{WLR}$ และ $\overline{UVR}$ ของกลั้วในช่วงเวลาต่างๆ ที่เก็บไว้.....	55
4.9 ผลลัพธ์ของการบ่งชี้ระดับความสุกกลั้วแบบ 2 มิติ ในระยะ (ก) ยังไม่สุก วันที่ Day -2 (ข) สุก พอดี วันที่ Day 0 (ค) สุกหอม วันที่ Day 2 และ (ง) สุกหอม วันที่ Day 4.....	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันผลไม้ที่มีสีเขียวย่างเช่น กล้วย และมะม่วง นอกจากจะถูกใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศแล้วยังเป็นสินค้าส่งออกไปยังต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการประเมินคุณภาพโดยเฉพาะระดับความสุกของผลไม้นี้ดังกล่าวก่อนเพื่อทำการคัดแยกหรือเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจของผู้บริโภคในการเลือกซื้อหรือสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการคัดเลือกหรือตรวจสอบเพื่อส่งออกไปขายในต่างประเทศ โดยในปี ค.ศ. 2009 องค์การอาหารและเกษตรของสหประชาชาติ (Food And Agriculture Organization Of The United Nations: FAO) ได้จัดอันดับให้กล้วยเป็น 1 ใน 20 ของผลผลิตของสินค้าโภคภัณฑ์ทางด้านอาหารและการเกษตรในตลาดโลกด้วยารรวมระดับนานาชาติ 27 พันล้านเหรียญสหรัฐ และมากกว่า 97.4 ล้านตัน [1] ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากล้วยเป็นหนึ่งในผลผลิตทางด้านอาหารและการเกษตรที่มีบทบาทสำคัญต่อประชากรโลกได้อย่างชัดเจน โดยทั่วไปการประเมินระดับความสุกของผลไม้ อย่างเช่น กล้วย วิธีการหนึ่ง คือ การพิจารณาจากลักษณะของสีภายนอก ซึ่งผู้บริโภคหรือผู้ตรวจสอบสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า [2] แต่วิธีการดังกล่าวนอกเหนือจากต้องขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบแล้ว ความถูกต้องและความรวดเร็วในการตรวจสอบโดยเฉพาะในกรณีที่จำนวนของผลผลิตมีปริมาณมากขึ้นเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธวิธีหรือวิธีการที่รวดเร็ว และ ให้ผลถูกต้องสำหรับการตรวจสอบระดับความสุกของผลผลิตดังกล่าว

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีวิธีการและเครื่องมือต่างๆ มากมายสำหรับการใช้ในการตรวจสอบระดับความสุกในเชิงคุณภาพของกล้วย แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือเหล่านี้ยังไม่สามารถเข้าถึงผู้บริโภคทั่วไปได้อย่างแท้จริงและไม่สามารถนำไปใช้กันได้อย่างแพร่หลายมากนัก ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความคุ้มค่าของการใช้งานเมื่อเทียบกับราคา ความสะดวกในการใช้งาน หรือความสะดวกในการพกพา เป็นต้น ดังนั้น เมื่อคำนึงถึงการเติบโตของเทคโนโลยีโดยเฉพาะโทรศัพท์มือถือที่ตลาดขึ้นจากการที่มีหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงและยังบรรจุไปด้วยอุปกรณ์เพิ่มเติมอย่างหน่วยระบุพิกัด ตัววัดความเร่ง หน้าจอสัมผัส และกล้องถ่ายรูป ในปี พ.ศ. 2553 ยอดจำหน่ายของโทรศัพท์ฉลาด (Smart Phone) สูงถึง 302.6 ล้านเครื่อง และระบบปฏิบัติการที่เป็นที่นิยมคือแอนดรอยด์ (Android) ที่กินส่วนแบ่งในตลาดในปีดังกล่าวถึง 22.7% [3] นอกจากนี้แล้วระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ยังมีความยืดหยุ่นและเปิดกว้างในการพัฒนาโปรแกรมจึงส่งผลให้การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Application) ที่ใช้งานบนอุปกรณ์เหล่านี้เติบโตขึ้นตามมาได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน

ดังนั้น จากความต้องการในเรื่องการตรวจสอบความสุกของกล้วยและความพร้อมของเทคโนโลยีที่ใช้บนโทรศัพท์มือถือ วิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นไปที่การวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการและระบบสำหรับการตรวจวัดแบบสองมิติเพื่อประเมินความสุกของกล้วยแบบไม่ทำลาย โดยประเด็นสำคัญของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้คือการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การส่องสว่างจากแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตไปพร้อมกันโดยใช้โทรศัพท์มือถือฉลาดที่มีกล้องถ่ายรูป และใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เป็นตัวรับสัญญาณภาพสเปกตรัมและประมวลผลภาพเพื่อจำแนกกล้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระยะที่ยังไม่สุก สุกเต็มที และสุกห่อมนอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถระบุพื้นที่ในแต่ละบริเวณต่างๆ ของกล้วยตามระยะของความสุขได้ด้วยเช่นกัน พร้อมทั้งเสนอแนวทางในการพัฒนาต่อยอดสำหรับการใช้งานจริงในภาคสนามต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการและระบบสำหรับใช้ในการประเมินคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยเน้นไปที่การประเมินความสุขของกล้วย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของผลกล้วยภายหลังการเก็บเกี่ยวภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงสีขาว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะการเรืองแสงของผลกล้วยภายหลังการเก็บเกี่ยวภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและพัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้งานบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่มีกล้องถ่ายรูป หน่วยความจำ และหน่วยประมวลผลอยู่ภายในตัว
- 1.2.5 เพื่อนำความรู้ทางด้านฟิสิกส์มาผสมผสานเข้ากับการประมวลผลทางด้านรูปภาพบนโทรศัพท์มือถือฉลาด สำหรับใช้ในการพัฒนาระบบตรวจวัดระดับความสุขของกล้วยแบบไม่ทำลาย โดยสามารถบ่งบอกได้ว่าบริเวณไหนของผลกล้วยมีความสุขอยู่ในระดับที่ยังไม่สุก สุก หรือสุกห่อมน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดระดับความสุขของกล้วยใน 2 มิติ แบบไม่ทำลายด้วยวิธีการทางแสง โดยระบบสามารถระบุได้ว่าบริเวณไหนของผลกล้วยมีความสุขอยู่ในระดับที่ยังไม่สุก สุกพอดี หรือสุกห่อมน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำอุปกรณ์และเครื่องมือทางแสงที่จัดหาได้ง่ายและมีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการมาติดตั้งประกอบกันเป็นระบบตรวจวัดความสุขสำหรับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของกล้วยภายหลังจากการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการทางแสง โดยจะทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของผลกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาวและศึกษาลักษณะการเรืองแสงของผลกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ในงานวิจัยจะทำการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับใช้งานบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ในการตรวจวัดสัญญาณการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแสงจากกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงทั้งสองแหล่งดังกล่าว พร้อมกับบันทึกสัญญาณที่ได้ไว้ในรูปแบบของข้อมูลภาพสเปกตรัม 2 มิติ หลังจากนั้นจะทำการเก็บภาพสเปกตรัมของตัวอย่างกล้วยทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งสองเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าขีดเริ่มต้นของความสุขในระดับต่างๆ ต่อจากนั้นจะเป็นการทดสอบการประเมินความสุขของตัวอย่างกล้วยทั้งหมดด้วยโปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์มือถือที่ได้พัฒนาขึ้นมาแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีการระบุตำแหน่งว่าบริเวณไหนของผลกล้วยอยู่ในระยะที่ยังไม่สุก สุกพอดี และสุกห่อมน ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์และสรุปผลจากการทดสอบที่ได้เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาต่อยอดเป็นระบบตรวจวัดระดับความสุขกล้วยที่ใช้งานได้จริงในภาคสนามต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจถึงวิธีการและระบบการตรวจสอบคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกล้วยได้
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของผลกล้วยภายหลังการเก็บเกี่ยวภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงสีขาว
- 1.4.3 มีความรู้ความเข้าใจลักษณะการเรืองแสงของผลกล้วยภายหลังการเก็บเกี่ยวภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
- 1.4.4 สามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับทำการประมวลทางรูปภาพบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้
- 1.4.5 มีระบบตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยใน 2 มิติแบบไม่ทำลาย สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการที่สามารถตรวจวัดและระบุได้ว่าบริเวณไหนของผลกล้วยมีความสุกอยู่ในระดับที่ยังไม่สุก สุก หรือสุกหอม

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 เป็นบทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีการตรวจสอบความสุกกล้วยด้วยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ ซึ่งจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เข้าใจงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะบอกถึงกระบวนการ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างระบบตรวจวัดระดับความสุกกล้วยแบบสองมิติด้วยแสง

บทที่ 4 เป็นในส่วนของผลการทดลองและวิเคราะห์ผลที่เป็นการนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าขีดเริ่มต้นสำหรับการจำแนกระดับความสุกของกล้วย และหลังจากนั้นจะเป็นแสดงผลลัพธ์ของการบ่งชี้ความสุกแบบสองมิติจากค่าขีดเริ่มต้นที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้

บทที่ 5 เป็นบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนาต่อยอดของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสุกของกล้วย รวมถึงวิธีการและระบบต่างๆ สำหรับใช้ในการตรวจสอบระดับความสุกกล้วยที่ได้ถูกเสนอและสาธิตขึ้นมาอย่างหลากหลายก่อนหน้านี้

2.1 การสุกและการเปลี่ยนสีของกล้วย

โดยทั่วไปผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยวที่มีการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของผลสิ้นสุดลงแล้ว จะยังคงมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีอย่างต่อเนื่องไปจนถึงการเสื่อมสลายหรือสิ้นสุดการใช้งาน [4] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพของผลไม้โดยตรง ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.1

จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของสีเป็นลักษณะหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดระดับความสุกในเบื้องต้นของผลไม้บางชนิด อย่างเช่นกล้วย ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเปลือกของผลกล้วยมีการเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีเหลืองในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับความสุก การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยนี้เป็นผลมาจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุที่มีสีเขียวและมีบทบาทสำคัญต่อการสังเคราะห์แสงของพืช โดยภายหลังการเก็บเกี่ยวเมื่อผลกล้วยแก่เต็มที่แล้วคลอโรฟิลล์จะเริ่มมีการสลายตัวเปลี่ยนไปเป็นสารที่ไม่มีสีซึ่งมีผลให้เปลือกของกล้วยจากเดิมที่มีสีเขียวเข้มเปลี่ยนเป็นสีเขียวที่จางลงจนหายไปที่สุดในที่สุด และจะปรากฏสีของสารประกอบจำพวกคาโรทีนอยด์ (Carotenoid) เด่นชัดขึ้นมาแทนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น สำหรับผลกล้วยนั้นรงควัตถุสีเหลืองนี้จะถูกสังเคราะห์ขึ้นในตอนสุดท้ายของกระบวนการแก่เท่านั้น โดยจะไม่มีมีการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นในขณะที่กล้วยมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสุกและจะปรากฏเด่นชัดขึ้นเมื่อปริมาณของคลอโรฟิลล์ลดน้อยลง นอกจากนี้แล้วในผลกล้วยยังมีสารที่ชื่อว่า Polyphenole ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีแต่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศแล้วเกิดเป็นสีน้ำตาลปรากฏขึ้นมาได้เมื่อผลกล้วยได้รับการกระทบกระเทือน [4-5]

ในกระบวนการสุกของกล้วยนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีต่างๆ เกิดขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปัจจัยทางด้านปริมาณแสง อุณหภูมิ ระยะเวลาการเก็บรักษา และองค์ประกอบของอากาศ จึงเป็นเหตุให้การค้นคว้าวิจัยทางการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสุกของกล้วยได้ถูกเสนอขึ้นมาอย่างมากมายเพื่อนำมาพัฒนาหลักการและระบบสำหรับใช้ในการตรวจสอบระดับความสุกกล้วย ซึ่งมีทั้งวิธีการที่ทำให้ผลกล้วยนั้นเกิดความเสียหายหรือในบางครั้งเรียกว่าวิธีการแบบทำลาย และวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลกล้วยหรือในบางครั้งเรียกว่าวิธีการแบบไม่ทำลาย ซึ่งหลักการและระบบเหล่านี้เป็นที่ยอมรับในระดับหนึ่งและจะได้ถูกกล่าวถึงเป็นลำดับต่อไป

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในระหว่างการสุกของผลไม้ [4]

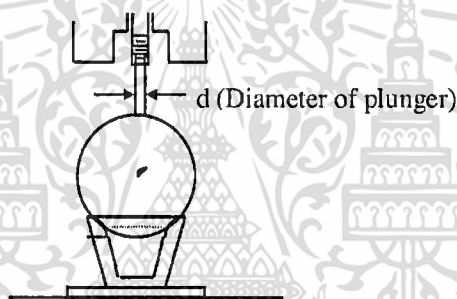
การเปลี่ยนแปลง	อิทธิพลที่มีต่อคุณภาพ
1. การแก่ของเมล็ด	-
2. การเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ (Pigments)	สีของผล
2.1 การเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)	
2.2 การปรากฏตัวของรงควัตถุที่มีอยู่เดิม	
2.3 การสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ (Carotenoids)	
2.4 การสังเคราะห์แอนโทไซยานิน (Anthocyanins)	
3. การนิ่มของผล (Softening)	เนื้อ (Texture) ของผล
3.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเพคติน (Pectin)	
3.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอื่นๆ ของผนังเซลล์ (Cell wall)	
3.3 การย่อยสลายสารที่เก็บสะสม	
4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)	รสชาติ
4.1 การเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล	
4.2 การแปลงรูปของน้ำตาล	
5. การสร้างสารที่ทำให้เกิดกลิ่น (Volatile substances)	กลิ่น
6. การเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ (Organic acids)	รสชาติ
7. การหลุดร่วงของอวัยวะ (Abscission)	-
8. การเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจ	-
9. การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์เอทิลีน (Ethylene)	-
10. การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านของเนื้อเยื่อ (Cell permeability)	-
11. การเปลี่ยนแปลงโปรตีน	-
11.1 การเปลี่ยนแปลงทางปริมาณ	
11.2 การเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพ	
11.2.1 การสังเคราะห์เอนไซม์	
12. การพัฒนาของไขบนผิว	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยแบบทำลาย

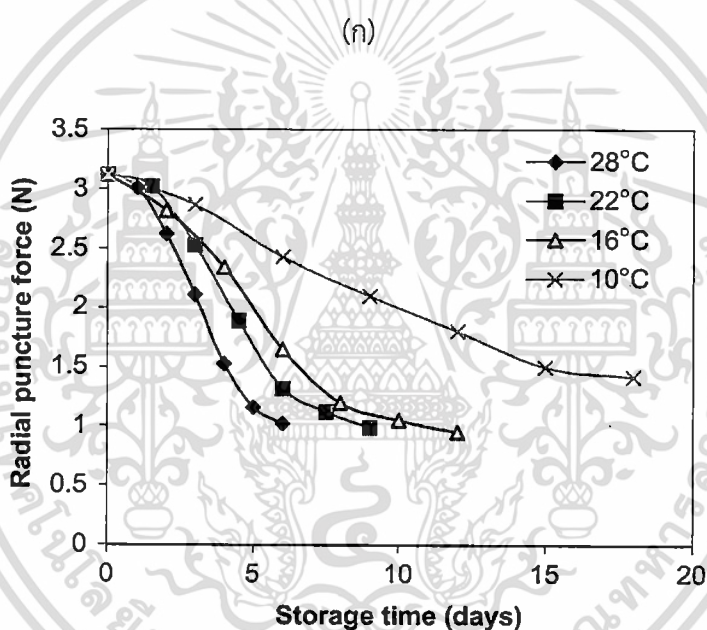
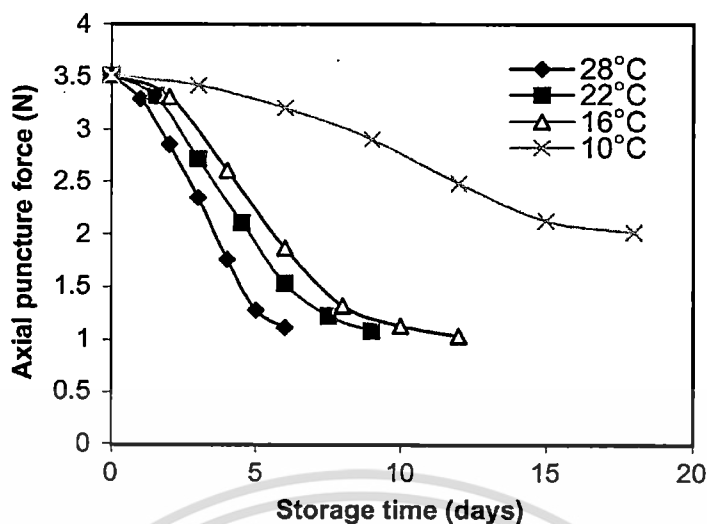
2.2.1 การตรวจสอบความแข็งของเนื้อ

วิธีการตรวจสอบระดับความสุกในเชิงคุณภาพที่ทำได้รวดเร็วขึ้นและเป็นวิธีที่เป็นที่ยอมรับระดับหนึ่ง คือ การวิเคราะห์คุณสมบัติความแข็งของเนื้อกล้วยด้วยวิธีเชิงกล [6-7] ซึ่งวิธีการหนึ่ง คือ การวัดแรงที่เจาะเข้าไปในเนื้อกล้วยโดยใช้แท่งเจาะ (Plunger) ที่ส่วนหัวมีลักษณะครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร (ตัวอย่างของวิธีการที่ใช้แรงเจาะแสดงได้ดังรูปที่ 2.1) ในขณะที่ทำการตรวจวัดแท่งเจาะนี้จะเคลื่อนตัวด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที เข้าไปในเนื้อของกล้วย ซึ่งเนื้อกล้วยที่ใช้ทดสอบได้ถูกตัดมาจากบริเวณตรงกลางของผลกล้วยให้เป็นท่อนทรงกระบอกหลายท่อน และมีความยาว 2.5 เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับการทดสอบด้วยวิธีการเจาะตามแนวแกนกับแนวรัศมี (Axial and Radial puncture) โดยการทดสอบจะกระทำกับกล้วยที่เก็บไว้ในอุณหภูมิต่างๆ กัน ได้แก่ 10, 16, 22, และ 28 องศาเซลเซียส และทำการวัดค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะเข้าไปในเนื้อของกล้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นถูกตั้งแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.2 (ก)-(ข)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการหาความแข็งแรงของผลไม้โดยวิธีการเจาะเข้าไปในเนื้อของผลไม้ (ภาพดัดแปลงจากวิธีการหาความแข็งแรงของมะเขือเทศ [8])

จากผลการทดสอบในรูปที่ 2.2 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าแรงของการเจาะในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวของรัศมี เนื่องจากว่าการวางตัวของโครงสร้างเส้นใยในเนื้อกล้วย แรงเจาะทั้งสองแนวที่ตรวจวัดได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการเก็บกล้วยไว้ กล่าวคือแรงเจาะจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของแรงนี้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงแรกและช่วงสุดท้ายของการเก็บรักษา และจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะตรงกลางของการเก็บรักษา ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อบ่งชี้ถึงระดับการสุกของกล้วยได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามภายหลังจากการทดสอบด้วยวิธีของการเจาะแล้ว ผลกล้วยจะได้รับความเสียหายเป็นอย่างมากจนไม่สามารถนำมารับประทานหรือจำหน่ายอีกต่อไปได้

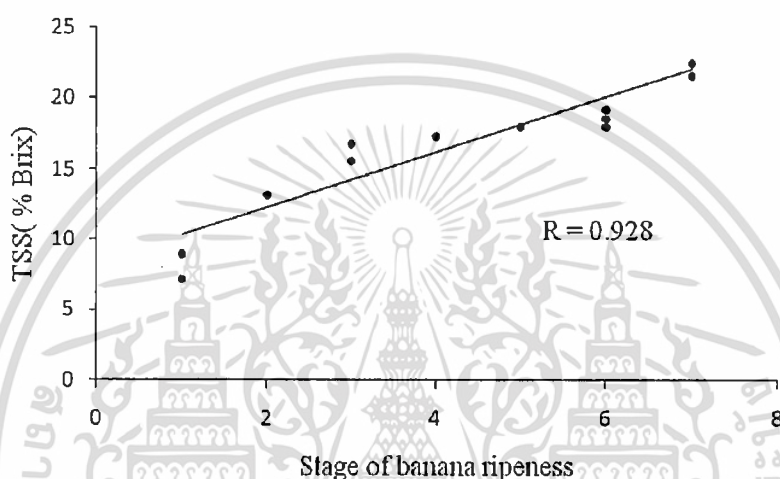


รูปที่ 2.2 ผลของแรงเจาะ (ก) ตามแนวแกน (ข) ตามแนวรัศมีของกล้วยในแต่ละวันที่เก็บเอาไว้ในอุณหภูมิต่างๆ กัน [7]

2.2.2 การตรวจหาปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด

การหาปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (Total Solid Soluble: TSS) ในหน่วยของบริกซ์ (Brix) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถใช้ในการตรวจสอบระดับความสุกของกล้วยในระยะต่างๆ ได้ [9] โดยอันดับแรกงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งกล้วยออกเป็น 7 ระดับความสุก หลังจากนั้นกล้วยในแต่ละระดับจะถูกนำเนื้อมาปั่นรวมกับน้ำกลั่นแล้วกรองออกเพื่อนำน้ำที่ได้ไปเข้าเครื่องวัดการหักเหของแสงแบบพกพา (Hand held refractometer) ซึ่งผลที่ได้จะบ่งชี้ถึงค่า TSS ในหน่วยของ %Brix การเปลี่ยนแปลงของ TSS ในระดับความสุกต่างๆ ของกล้วยแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว TSS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

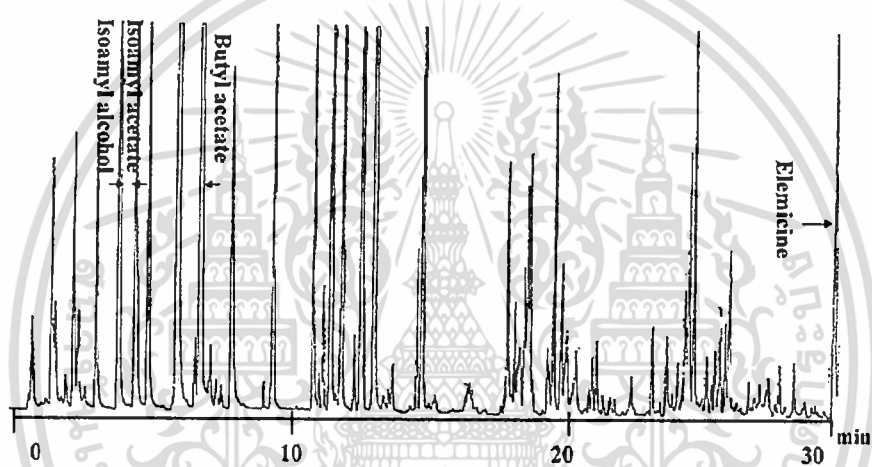
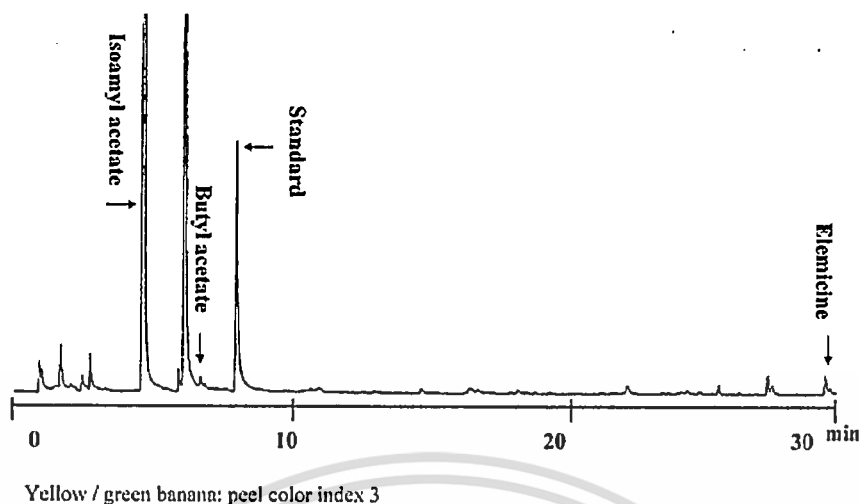
คือน้ำตาลที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความหวานได้เป็นอย่างดี ในระหว่างที่มีการสุกเกิดขึ้นแบ่งในผลกล้วยได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ดังนั้น TSS จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และมากที่สุดเมื่อกกล้วยอยู่ในระยะการสุกที่ 7 ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.3 การเพิ่มขึ้นของ TSS นี้เป็นลักษณะที่สำคัญของการย่อยสลายแบ่งไปเป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ อาทิเช่น กลูโคส (Glucose), ซูโครส (Sucrose) และ ฟรุคโตส (Fructose) เป็นต้น อันเนื่องมาจากการกำหนดระดับความสุกกล้วยด้วยวิธี TSS นี้ จำเป็นต้องทำลายผลกล้วยดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วจึงไม่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบระดับความสุกได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่กำลังบ่มให้สุกหรือเก็บไว้เพื่อจำหน่ายและบริโภคได้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง TSS และ ระดับความสุกของกล้วย [9]

2.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกลิ่นหอม

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกลิ่นหอมด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography: GC) [10] สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นเดียวกัน โดยองค์ประกอบของกลิ่นจากกล้วยจะถูกแยกออกมาโดยวิธีการของ Solid Phase Micro-Extraction (SPME) ซึ่งจะนำกล้วยมาบั่นให้ละเอียดแล้วนำมาบรรจุใส่ขวดที่ปิดด้วยฝาซิลิโคน หลังจากนั้นเส้นใยจะถูกสอดเข้าไปในขวด โดยมีเข็มโลหะเป็นตัวนำพาไปเพื่อให้กลิ่นจากกล้วยนั้นได้ซึมซับเข้าไปในเส้นใย ซึ่งใช้เวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นเส้นใยที่ได้ซึมซับกลิ่นของกล้วยเอาไว้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบต่างๆ ด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี



รูปที่ 2.4 รูปแบบของกราฟจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี GC ของกล้วยในระยะที่ (ด้านบน) มีสีเขียวปนเหลือง (ด้านล่าง) มีสีเหลืองเต็มใบหรือสุกเกิน [10]

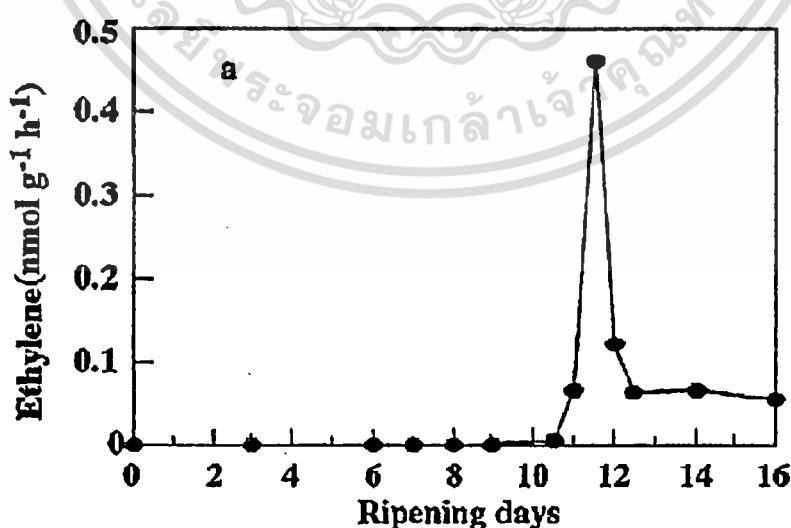
จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบกลิ่นได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เก็บเอาไว้ทั้งหมด 7 วันในอุณหภูมิห้อง ตั้งแต่กล้วยเริ่มมีสีเหลืองปะปนอยู่ในสีเขียวจนถึงระยะที่มีสีเหลืองเต็มใบ โดยพื้นที่ของจุดยอดของสารละลายแต่ละอันที่เป็นองค์ประกอบของกลิ่นหอมทั้งหมดรวมกันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5×10^6 AU (AU: Arbitrary Unit) ถึง 2×10^6 AU โดยรูปแบบของกราฟที่วัดได้แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในระยะแรกมีเพียง 2 องค์ประกอบเท่านั้นที่ปรากฏเด่นชัดขึ้นมา นั่นคือ Isoamyl acetate และ Butyl acetate (รูปที่ 2.4 (ด้านบน)) แต่เมื่อกล้วยได้สุกเต็มที่แล้วจะมีจุดยอดขององค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มขึ้นอีกมากมายดังที่ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.4 (ด้านล่าง) ซึ่งส่งผลให้ผลรวมของพื้นที่จุดยอดทั้งหลายเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากวิธีการนี้จำเป็นต้องมีการตัดชิ้นส่วนของกล้วยเพื่อนำมาสกัดเอาแต่กลิ่นหอมมาวิเคราะห์ จึงส่งผลให้ผลกล้วยนั้นได้รับความเสียหายซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปบริโภคหรือจำหน่ายอีกต่อไป

2.3 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยแบบไม่ทำลาย

เนื่องจากวิธีการดังที่ได้กล่าวเอาไว้ในข้างต้นเป็นวิธีการที่ต้องสัมผัสหรือมีแรงไปกระทำกับผลผลิตที่ต้องการตรวจสอบโดยตรง จึงส่งผลให้ผลผลิตที่ต้องการตรวจสอบได้รับความเสียหาย ผิดรูปทรง หรือมีรอยขีดข่วนได้ง่ายขณะทำการตรวจวัด ดังนั้นเพื่อให้ผลกล้วยยังคงสภาพอยู่เหมือนเดิมจึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาวิธีการตรวจสอบระดับความสุกกล้วยแบบไม่สัมผัสขึ้นมา ซึ่งมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน สำหรับในหัวข้อนี้จะเน้นถึงวิธีการและระบบตรวจสอบที่ไม่ทำให้ผลกล้วยนั้นได้รับความเสียหายภายหลังจากการตรวจสอบ

2.3.1 การตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีน

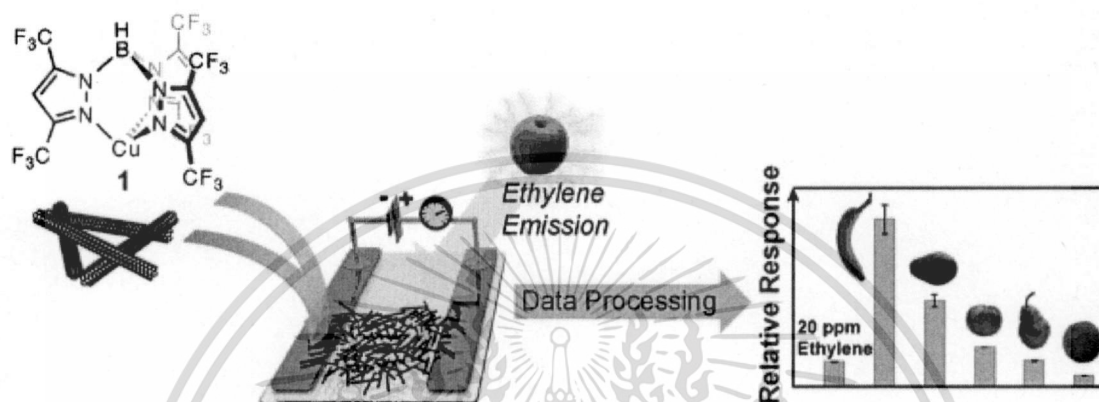
ก๊าซเอทิลีนเป็นก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากตัวของผลไม้เองซึ่งเปรียบเสมือนเป็นฮอร์โมนในการควบคุมการเจริญเติบโตและการสุกของผลไม้ ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจระดับความสุกของกล้วยได้ [11] โดยกล้วยภายใต้การตรวจสอบจะถูกเก็บและปล่อยให้สุกแบบธรรมชาติเป็นเวลา 16 วัน ในแต่ละวันกล้วยจะถูกนำมาตรวจสอบโดยการใส่เข้าไปในภาชนะที่มิดชิดไม่ให้อากาศภายนอกสามารถเข้าไปได้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกล้วยที่ฟุ้งกระจายอยู่ทั่วภายในภาชนะปิดนี้จะถูกดูดมาในปริมาณ 1 มิลลิลิตร เพื่อนำเข้าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเอทิลีนเรียบร้อยแล้วพบว่า ในช่วงแรกก่อนที่กล้วยจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองไม่สามารถตรวจหาปริมาณก๊าซเอทิลีนได้ จนกระทั่งเมื่อกล้วยเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองในวันที่ 11 เพียงครึ่งวันเท่านั้นอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนได้เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 nmol g⁻¹ h⁻¹ อย่างทันทีทันใด และลดลงมาอยู่ที่ 0.06 nmol g⁻¹ h⁻¹ อย่างรวดเร็วในวันที่ 12 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะได้รับการยอมรับและมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามขั้นตอนการตรวจสอบยังต้องใช้เวลานานและเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง



รูปที่ 2.5 อัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนของกล้วยเมื่อปล่อยให้สุกแบบธรรมชาติ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจสอบปริมาณก๊าซเอทิลีนที่มีราคาไม่แพงโดยใช้อุปกรณ์ที่มีพื้นฐานมาจากการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube-based) [12] ซึ่งจะทำให้การตรวจจับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผลไม้ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดซึ่งสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณของก๊าซที่มีอยู่ได้ และพบว่ากล้วยมีการปลดปล่อยก๊าซเอทิลีนสูงกว่าผลไม้ชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการทดสอบ



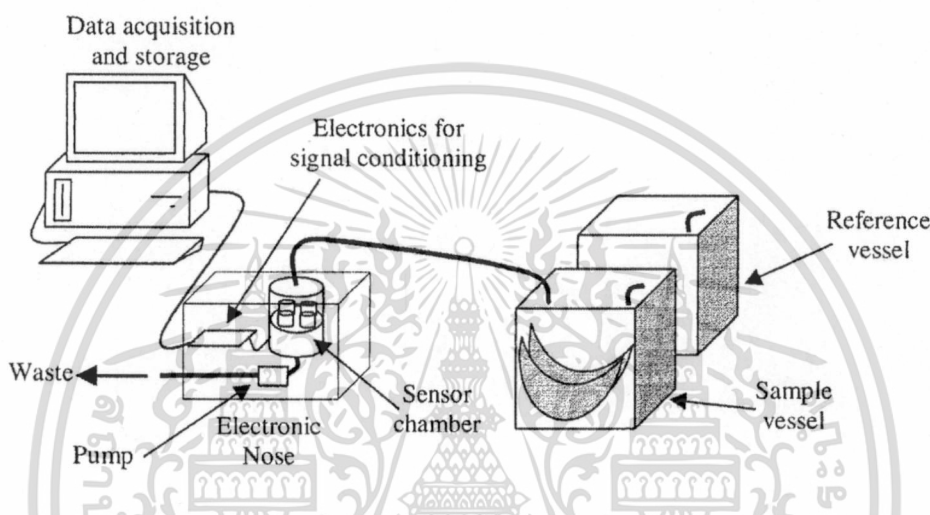
รูปที่ 2.6 การตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนด้วยอุปกรณ์ที่ใช้พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [12]

2.3.2 การใช้ตัวตรวจรับกลิ่นหรือจมูกอิเล็กทรอนิกส์

วิธีการตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งคือ การประยุกต์ใช้ตัวตรวจรับกลิ่นแบบอะเรย์ในกล่องปิด ผสมผสานกับการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) [13] โดยวิธีการดังกล่าวได้ติดตั้งระบบดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในระบบนี้ได้ติดตั้งตัวรับกลิ่นเอาไว้ทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน ดังที่แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2.2 ในการทดสอบนั้น ตัวอย่างกล้วยทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 7 ระดับความสุก กล้วยภายใต้การตรวจสอบจะถูกนำไปใส่ไว้ในกล่องปิด (Sample vessel) หลังจากนั้นปั๊มจะทำการดูดอากาศภายในกล่องที่มีกลิ่นของกล้วยฟุ้งกระจายอยู่ภายในให้ผ่านมาทางตัวตรวจรับกลิ่น โดยปั๊มจะดูดอากาศด้วยอัตรา 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อเสร็จสิ้นจากการดูดอากาศจากกล่องตัวอย่างกล้วยแล้ว จะเป็นขั้นตอนของการดูดอากาศจากกล่องอ้างอิงเป็นเวลาอีก 50 นาที ซึ่งเป็นกล่องเปล่าเพื่อใช้ในการเก็บกลิ่นของอากาศในห้องที่ใช้ในการทดสอบ ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากตัวตรวจรับกลิ่นทั้ง 4 ตัวจะถูกนำไปฝึกด้วยวิธีการของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ระบบได้ทำการเรียนรู้ว่ากลิ่นต่างๆ ที่ตรวจวัดมาได้นั้นเป็นกลิ่นของกล้วยในระดับความสุกใด ซึ่งหลังจากที่ระบบได้ทำการเรียนรู้เรียบร้อยแล้วมีความสามารถทำการแยกระดับความสุกกล้วยได้ด้วยความแม่นยำที่ 90% แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้จำเป็นต้องกระทำในที่ปิดและใช้เวลานานเพื่อให้สามารถวัดปริมาณก๊าซได้ถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 ตัวตรวจรับแบบ Metal oxide ที่ใช้ในระบบตรวจรับกลิ่นจากกล้วย [13]

Sensor	Manufacturer	Sensitive to
TGS 822	Figaro Engineering Inc, Japan	Volatile organic compounds
SP-11(P1)	FIS, Japan	Hydrocarbons, combustible gases
MGS 1100	Motorola, USA	Carbon monoxide
AAS14	Capteur Ltd, UK	Volatile organic compounds

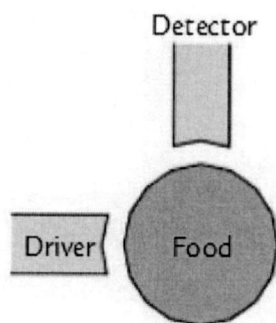


รูปที่ 2.7 ระบบสำหรับใช้ตรวจรับกลิ่นจากกล้วยเพื่อใช้บ่งชี้ระดับความสุก [13]

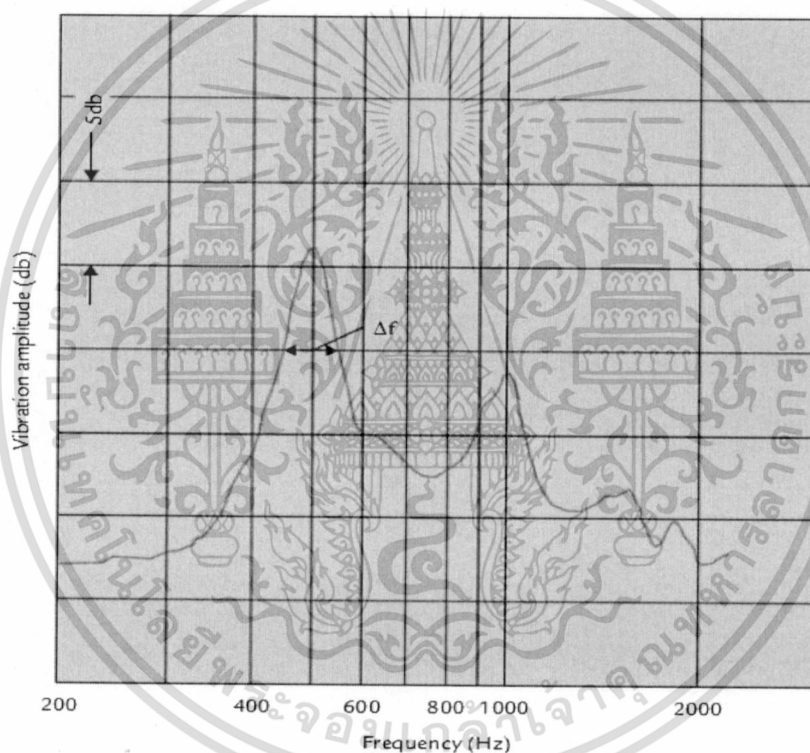
2.3.3 การวิเคราะห์ความถี่สั่นพ้องทางเสียง

นอกจากความแข็งแรงของผลไม้สามารถวิเคราะห์ได้จากการใส่แรงไปกระทำให้เสียรูปแล้ว การหาค่ามอดูลัสของยังของสภาพยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ซึ่งเป็นค่าของอัตราส่วนระหว่าง ความเค้น (Stress) ต่อ ความเครียด (Strain) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ [14] โดยแรงที่ไปกระทำกับผลไม้ในที่นี้จะเป็แรงที่เกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง (Driver) และมีตัวรับ (Detector) เพื่อตรวจจับการสั่นของผลไม้วางอยู่ในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดเสียงอีกทีหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่แหล่งกำเนิดเสียงได้ปล่อยออกไปกับความถี่ที่ตัวรับตรวจจับได้จะมีลักษณะที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.9 ซึ่งจุดสูงสุดของแอมพลิจูด (amplitude) คือความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency) ที่ผลกล้วยนั้นมีการสั่นมากที่สุด จากความถี่สั่นพ้องที่ได้จะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังของสภาพยืดหยุ่นของวัตถุทรงกระบอก ซึ่งพบว่าจะมีค่าลดลงจาก 272×10^5 dynes/cm² ตอนที่เปลือกกล้วยยังเป็นสีเขียวไปเป็น 85×10^5 dynes/cm² ในขณะที่เปลือกกล้วยเป็นสีเหลืองหมดแล้ว อย่างไรก็ตามขนาด รูปร่าง สายพันธุ์ และกระบวนการปลูกผลไม้ที่จะส่งผลต่อความหนาของเปลือกและปริมาณของเนื้อผลไม้ที่อยู่ภายในจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางเสียงซึ่งส่งผลให้การตรวจวัดมีการผิดพลาดเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความสูกของผลกล้วยด้วยคลื่นเสียง [14]

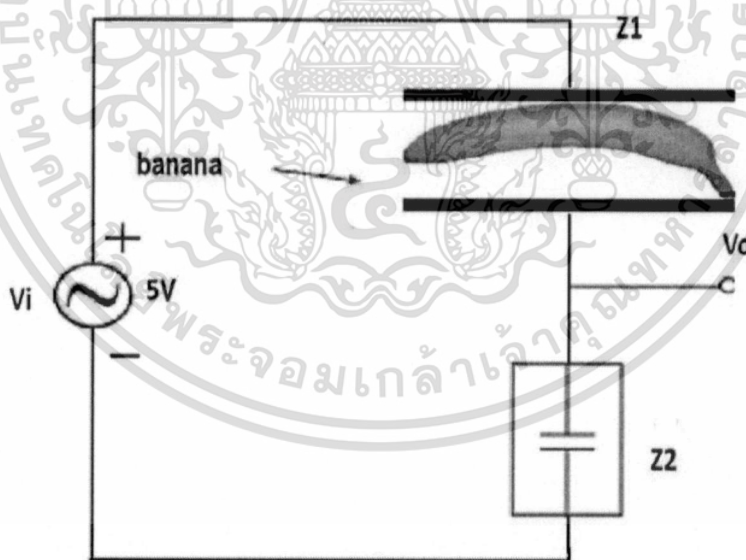


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงแอมพลิจูดการสั่นของผลกล้วยต่อความถี่ต่างๆ ที่ใส่เข้าไป [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

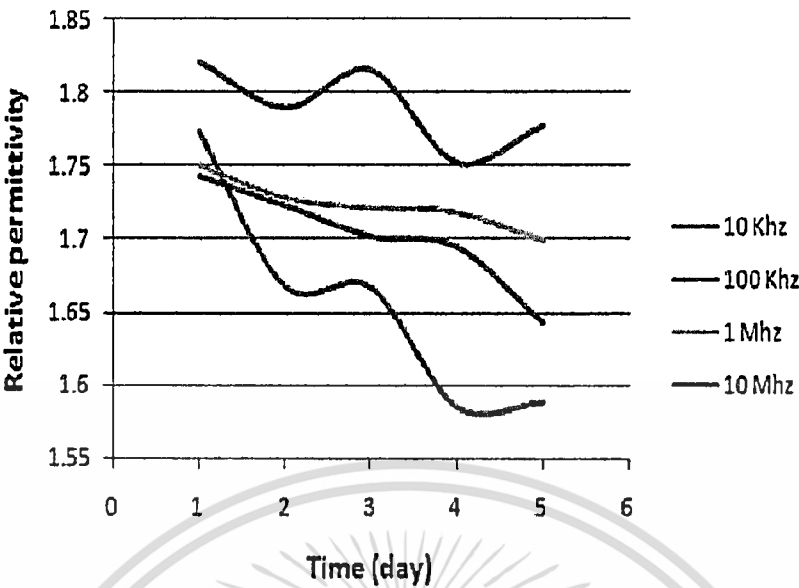
2.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของความจุไฟฟ้า

คุณสมบัติของความจุไฟฟ้า [15] สามารถประเมินระดับความสุกได้เช่นเดียวกัน โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับหาค่าความจุไฟฟ้าของกล้วยที่ระดับความสุกต่างๆ ตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน Z_1 เป็นวัสดุตัวนำที่ทำจากอลูมิเนียมขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ซึ่งวัสดุชนิดนี้ไม่แตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย เนื่องจากไอออนเป็นปัจจัยที่จะทำให้ลายการวัดคุณสมบัติค่าความจุทางไฟฟ้า เพื่อให้วงจรในรูปที่ 2.10 นี้มีการตอบสนองสูงสุด Z_2 จะถูกเลือกให้มีค่าใกล้เคียงกับ Z_1 ซึ่งในการตรวจสอบนี้ Z_2 มีค่าเท่ากับ 10 พิโคฟารัด กล้วยจะถูกบ่มให้สุกจากเดิมที่มีสีเขียวทั้งใบจนกระทั่งสุกมีสีเหลืองทั้งใบโดยจะทำการบันทึกค่า Relative permittivity ของกล้วยแต่ละผลตลอดระยะเวลาที่เก็บไว้ทั้งหมด 5 วัน ซึ่งกล้วยในแต่ละผลจะถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าแบบ Sine wave ขนาด 5 โวลต์ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 10 เมกกะเฮิรตซ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Relative permittivity ของกล้วยในแต่ละระดับความสุกต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์ต่อความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ซึ่งพบว่าในความถี่ที่ 10 กิโลเฮิรตซ์ และ 10 เมกกะเฮิรตซ์ มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนในแต่ละวันของการสุก แต่ในความถี่ที่ 100 กิโลเฮิรตซ์ และ 1 เมกกะเฮิรตซ์ มีการลดลงในแต่ละวันที่สอดคล้องกับระดับความสุกของกล้วย อย่างไรก็ตามขนาด รูปร่าง สายพันธุ์ และกระบวนการปลูกผลไม้ที่จะส่งผลต่อความหนาของเปลือกและปริมาณของเนื้อผลไม้ที่อยู่ภายในจะมีอิทธิพลต่อสภาพทางไฟฟ้าเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของวงจรสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้วย [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของค่า Relative permittivity ของกล้วยที่ความถี่ต่างๆ ในขณะที่กล้วยมีการเปลี่ยนแปลงของระดับความสุก [15]

2.3.5 การใช้คลื่นสนามแม่เหล็กนิวเคลียร์

คลื่นสนามแม่เหล็กนิวเคลียร์ (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) [16] สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้าน การตรวจสอบคุณภาพของกล้วยได้เช่นเดียวกัน โดยทำการวัดด้วยเครื่อง Pulsed NMR spectrometer เพื่อหา Water transverse relaxation time (T_2) และ Water self-diffusion coefficients (D) ของตัวอย่างกล้วยในระดับความสุกต่างๆกัน

ตารางที่ 2.3 เวลาของ Proton transverse relaxation และร้อยละของสัญญาณของ 3 องค์ประกอบในช่วงเวลา 7 วัน [16]

Storage time (days)	Cellular wall		Cytoplasm		Vacuole	
	T_2 (ms)	%	T_2 (ms)	%	T_2 (ms)	%
0	14 ± 3	17 ± 3	90 ± 10	27 ± 4	320 ± 30	56 ± 4
1	21 ± 4	16 ± 3	100 ± 10	33 ± 5	370 ± 30	51 ± 6
2	18 ± 3	13 ± 3	110 ± 10	27 ± 5	410 ± 30	60 ± 6
3	20 ± 3	13 ± 3	140 ± 10	28 ± 5	470 ± 40	59 ± 6
4	21 ± 3	11 ± 1	170 ± 10	29 ± 4	510 ± 20	60 ± 5
7	27 ± 1	13 ± 2	190 ± 10	25 ± 5	610 ± 10	62 ± 5

จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า T_2 ทั้งของ Cytoplasmatic water และ Vacuolar water (ดังตารางที่ 2.3) อาจจะมีสาเหตุหลักมาจากการลดลงของความเข้มข้นของแป้งในระหว่างกระบวนการสุกของกล้วย และการลดลงของค่า D (ดังตารางที่ 2.4) มีความเกี่ยวข้องกับการสะสมน้ำตาลจากกระบวนการสลายตัวของแป้ง แต่ระบบดังกล่าวมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ราคาสูง และ ข้อควรระวังในเรื่องของปริมาณสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อเจ้าหน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่นที่อยู่รอบข้าง ทำให้วิธีการดังกล่าวไม่ได้เป็นที่ยอมรับในทางปฏิบัติ

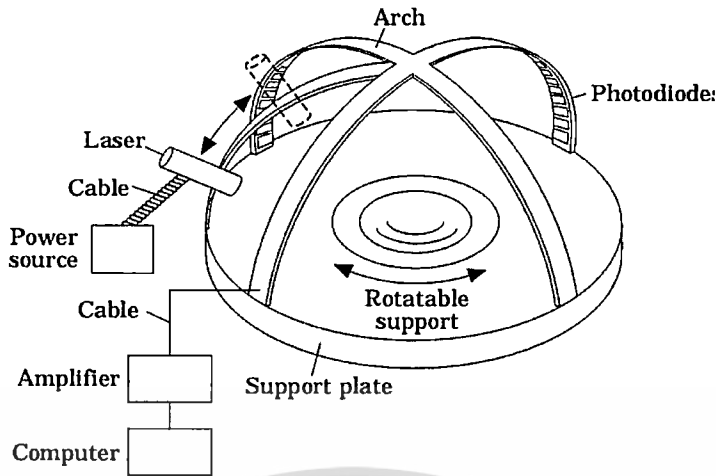
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยของ Water self-diffusion coefficient ที่ได้จากกล้วยในช่วงเวลา 7 วัน [16]

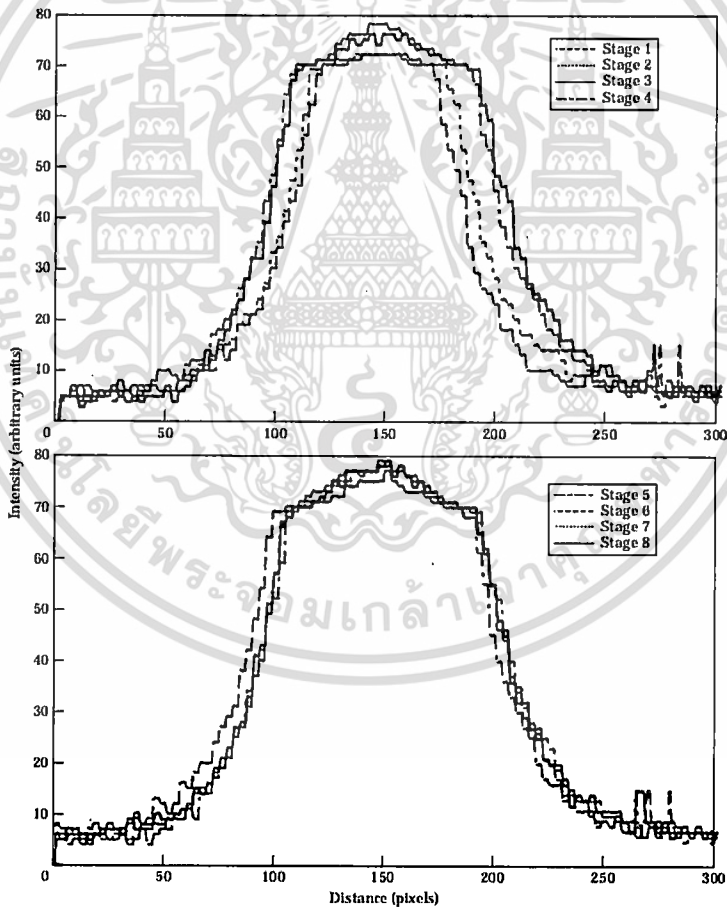
Storage time (days)	D ($10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
0	1.21 ± 0.04
1	1.16 ± 0.02
3	1.08 ± 0.02
4	1.07 ± 0.02
5	1.07 ± 0.04
6	1.00 ± 0.04
7	1.01 ± 0.05
8	1.01 ± 0.02

2.3.6 การวิเคราะห์ความมันวาว

วิธีการอื่นๆ อย่างเช่น การวิเคราะห์ความมันวาว [17-18] ได้ถูกสาธิตขึ้น โดยในรูปที่ 2.12 เป็นโครงสร้างของเครื่องมือสำหรับวัดความมันวาวของพื้นผิวโค้งซึ่งประกอบไปด้วย ฐานรองรับซึ่งด้านบนมีจานรองวัตถุภายใต้การตรวจสอบซึ่งสามารถหมุนได้เพื่อใช้ในการสแกนพื้นผิวของวัตถุขณะทำการตรวจวัด แผ่นโค้งครึ่งวงกลม 2 แผ่นถูกติดอยู่กับฐานรองรับ ด้านในของแผ่นโค้งนี้มีตัวรับสัญญาณแสงจำนวนมากติดเรียงกันตลอดทั้งแผ่นเพื่อใช้รับสัญญาณแสงที่สะท้อนและกระเจิงออกมาจากพื้นผิวของวัตถุ โดยมีแผ่นโค้งขนาด 1 ใน 4 ของวงกลมอีกแผ่นหนึ่งทำหน้าที่สำหรับยึดจับเลเซอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเอาไว้และสามารถใช้ปรับมุมของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนวัตถุได้อีกด้วย สัญญาณจากตัวรับแสงที่ได้จะถูกขยายสัญญาณและส่งต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลหาลักษณะความมันวาวของวัตถุเป็นลำดับต่อไป จากการทดสอบกับผลกล้วยที่ถูกแบ่งออกเป็น 8 ระดับความสุกทำให้ได้ข้อมูลความวาวของผิวกล้วยดังที่ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นลักษณะเส้นโค้งการสะท้อนแสงจากจากพื้นผิวของกล้วยในมุมต่างๆ เมื่อมีแสงเลเซอร์ตกกระทบที่มุม 45 องศา ซึ่งมุมของแสงสะท้อนจะอยู่ในรูปของระยะทางหรือจุดของสัญญาณ โดยขนาดความกว้างของเส้นโค้งของสัญญาณที่ค่าความเข้ม 50% ในรูปที่ 2.13 แสดงถึงค่าความมันวาวของกล้วยที่วัดได้ การกระจายตัวของเส้นโค้งในแนวแกนของระยะทางจะมีค่าตรงกันข้ามกับลักษณะของความมันวาว กล่าวคือ เส้นโค้งที่มีการกระจายตัวมากแสดงว่าพื้นผิวของกล้วยมีความมันวาวต่ำ แต่ถ้าเส้นโค้งมีการกระจายตัวน้อยแสดงว่ามีความมันวาวสูง จากการทดสอบกับผลกล้วยทั้ง 8 ระยะพบว่า ขนาดความกว้างของเส้นโค้งที่มีค่าความเข้ม 50% หรือความมันวาวของกล้วยจะมีค่าลดลงเมื่อกล้วยสุกตั้งแต่ระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 8 ทั้งนี้เชื่อว่าการลดลงของความมันวาวนี้เป็นผลมาจากปริมาณของขี้ผึ้งที่เคลือบเปลือกลดลงเมื่อระดับความสุกของกล้วยเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตาม การประเมินด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นการตรวจวัดในบางบริเวณของผลกล้วยเพียงเท่านั้น ไม่สามารถนำมาตรวจสอบเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของผลกล้วยได้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างเครื่องวัดความมนวาวของพื้นผิวโค้ง [17]

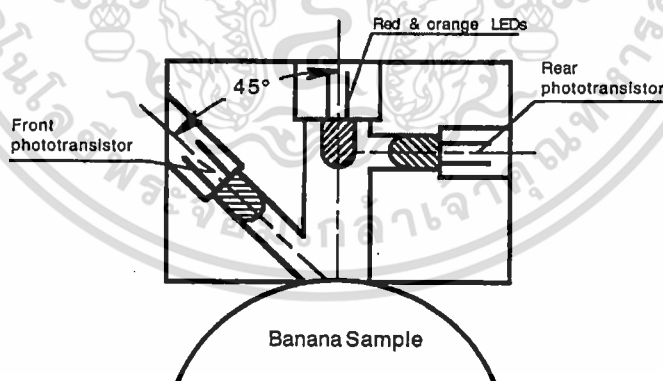


รูปที่ 2.13 ลักษณะสัญญาณจากตัวรับแสงเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุที่มุม 45° [18]

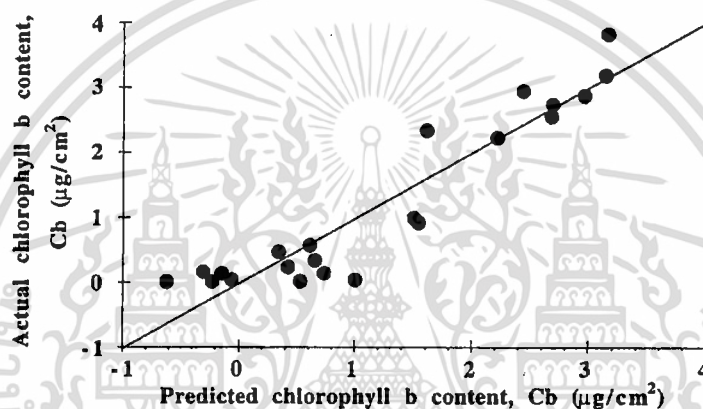
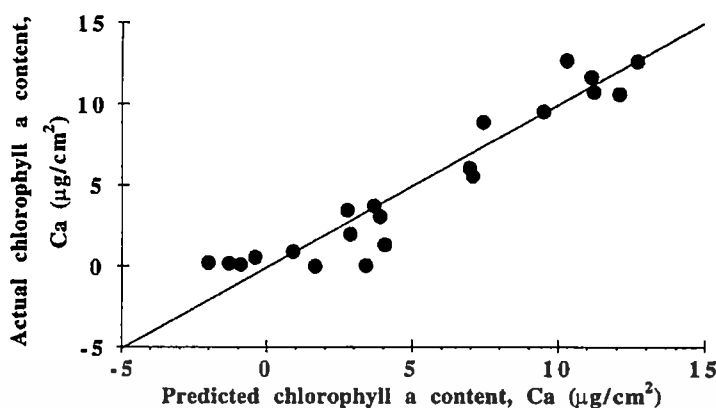
2.3.7 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นแสงใน 1 มิติ

2.3.7.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของสองความยาวคลื่นแสง

ในระบบตรวจวัดนี้ได้ใช้วิธีการทางแสงเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เพื่อใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ของกล้วยในระยะต่างๆ [19] สำหรับการศึกษาในครั้งนี้กล้วยทั้งหมด 22 ผลถูกใช้สำหรับการสอบเทียบจากปริมาณคลอโรฟิลล์ที่วัดได้กับปริมาณที่มีอยู่จริง โดยระบบตรวจวัดนี้มีโครงสร้างของตัวตรวจวัดดังรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงแบบไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) 2 แหล่ง คือสีแดงที่มีจุดยอดความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร และสีส้มที่มีจุดยอดความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นแสงของหลอด LED ทั้ง 2 นี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายปริมาณของคลอโรฟิลล์ได้เป็นอย่างดีและมีจำหน่ายตามท้องตลาด แสงทั้งสองแหล่งนี้เมื่อตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุภายใต้การตรวจสอบจะเกิดการกระเจิงของแสงขึ้น โดยตำแหน่งมุม 45 องศาจากแนวของแหล่งกำเนิดแสงจะมีตัวรับสัญญาณแสงที่กระเจิงออกมา ซึ่งตัวรับสัญญาณแสงนี้เรียกว่า Front phototransistor และตัวรับสัญญาณแสงอีกตัวหนึ่ง คือ Rear phototransistor ทำหน้าที่ในการตรวจวัดแสงที่เปล่งจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสอง ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาในส่วนของความเข้มแสงที่ไม่คงที่และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบตรวจวัด จากสัญญาณที่วัดได้จากกล้วยที่สุกในระยะต่างๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งปริมาณของคลอโรฟิลล์ a และ b ที่วัดได้จากระบบตรวจวัดนี้เมื่อเทียบกับวิธีการทางเคมีแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 โดยผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าระบบตรวจวัดนี้สามารถนำมาใช้ในการตรวจหาปริมาณของคลอโรฟิลล์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของหัววัด [19]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ (ด้านบน) a และ (ด้านล่าง) b ที่วัดได้จากระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรร่วมกับความยาวคลื่น 610 เมื่อเทียบกับปริมาณของคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่จริงในเปลือกกล้วย [19]

2.3.7.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมการสะท้อนแสงในย่านที่ตามองเห็นถึงย่านอินฟราเรด

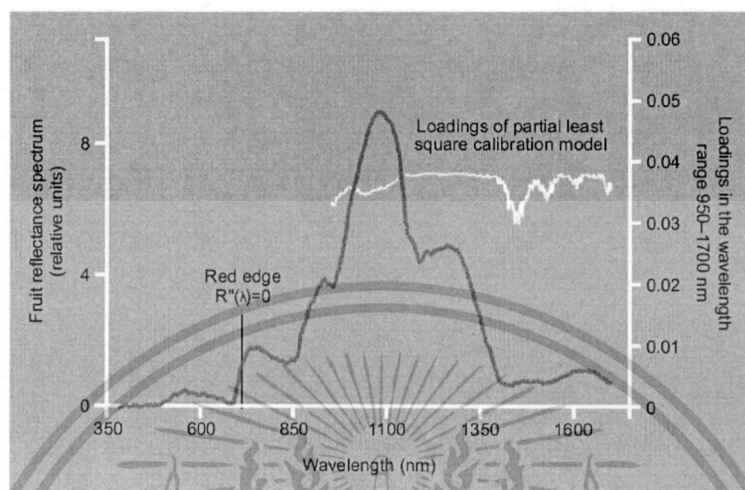
วิธีการตรวจสอบระดับความสุกของกล้วยอีกวิธีการหนึ่งคือ การใช้เครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) [20] เพื่อใช้ในการตรวจวัดสเปกตรัมการสะท้อนแสงของเปลือกกล้วย โดยทำการเก็บค่าการสะท้อนแสงของเปลือกกล้วยในช่วงความยาวคลื่น 350-1700 นาโนเมตร เพื่อนำมาเชื่อมโยงเข้ากับปริมาณของคลอโรฟิลล์และน้ำตาลในกล้วยที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการทางเคมี ในวิธีการนี้ได้แบ่งกล้วยออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกันตามลักษณะของสีที่ปรากฏบนเปลือกกล้วย ได้แก่ ระยะที่ 2 ซึ่งเป็นระยะที่ยังไม่สุก ระยะที่ 4 และ 5 เป็นระยะที่สุกแล้ว และ ระยะที่ 7 เป็นระยะที่สุกมาก ในการวัดค่าการสะท้อนแสงของผลกล้วยนั้นโดยทั่วไปแล้วจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งจะพบว่าการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์อย่างเด่นชัดที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

การหาปริมาณคลอโรฟิลล์โดยใช้แสงในช่วงที่ตามองเห็นนั้นจะพิจารณากราฟการสะท้อนแสงในรูปของฟังก์ชันและใช้อนุพันธ์อันดับ 2 ($R''(\lambda)=0$) เพื่อหาจุด Red edge ซึ่งเป็นขอบที่กราฟของการสะท้อนแสงในช่วงของสีแดงเริ่มเปลี่ยนจากขาขึ้นเป็นขาลง (ดูรูปที่ 2.15 ประกอบ) โดยความสัมพันธ์ของ Red edge กับระดับความสุกกล้วยได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.17 จาก

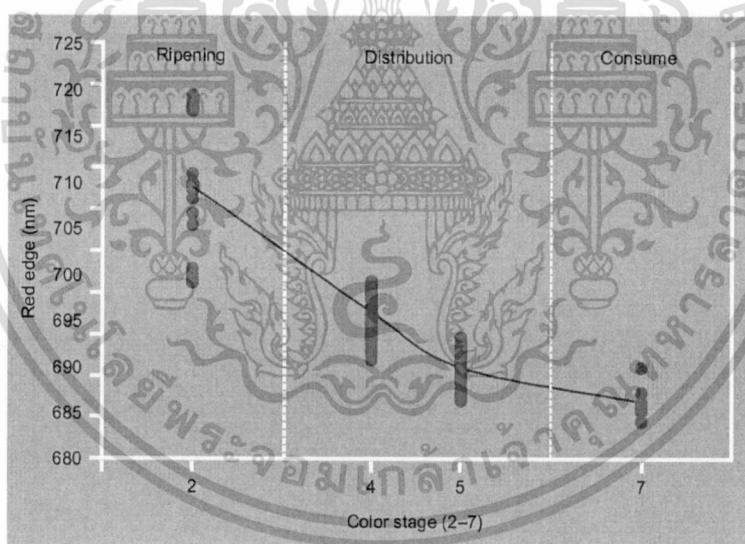
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์นี้จะพบว่าการใช้ Red edge สามารถนำมากำหนดเพื่อใช้บอกระดับความสุกกล้วยใน ระยะที่สุก (ระยะที่ 4 และ 5) และระยะที่สุกมาก (ระยะ 7) ได้ดีกว่าในระยะที่ยังไม่สุก (ระยะ 2) เนื่องจากค่า Red edge มีการเกาะกลุ่มกันและความแปรปรวนน้อยกว่ากล้วยที่อยู่ในระยะที่ 2



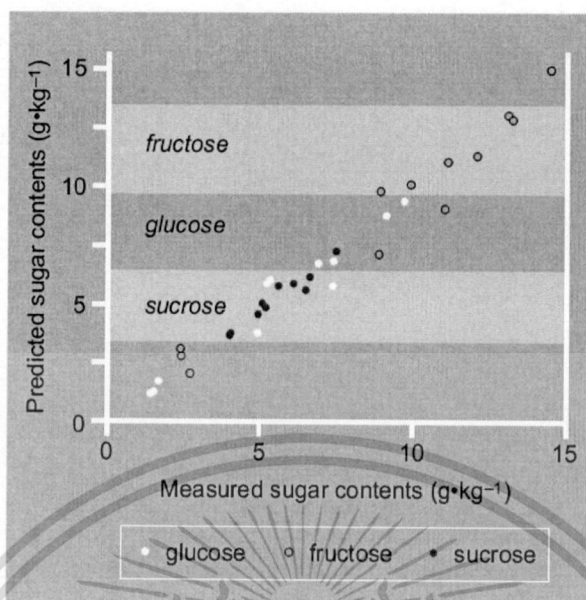
รูปที่ 2.16 แบบอย่างสเปกตรัมการสะท้อนแสงของกล้วยในย่านที่ตามองเห็นถึงย่านอินฟราเรด [20]



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Red edge กับระดับความสุกของกล้วย [20]

สำหรับคลื่นแสงสเปกตรัมในช่วงของอินฟราเรดนั้น (950-1700 นาโนเมตร) จะถูกนำมา วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Partial least square เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณขององค์ประกอบย่อยที่ซ่อนอยู่ ภายในข้อมูลของสเปกตรัม ซึ่งได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ฟรักโตส และ ซูโครส เพื่อนำมาเทียบกับการวัด จากเครื่อง High-performance liquid chromatography (HPLC) ในการทำนายปริมาณน้ำตาล ชนิดต่างๆ ดังกล่าว ที่มีอยู่ในกล้วยในระดับความสุกต่างๆ ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัด ได้นั้นมีความสัมพันธ์กัน 90% สำหรับกลูโคส 94% สำหรับซูโครส และ 96% สำหรับฟรักโตส ดัง แสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการทางแสงกับปริมาณที่วัดได้จากเครื่อง HPLC [20]

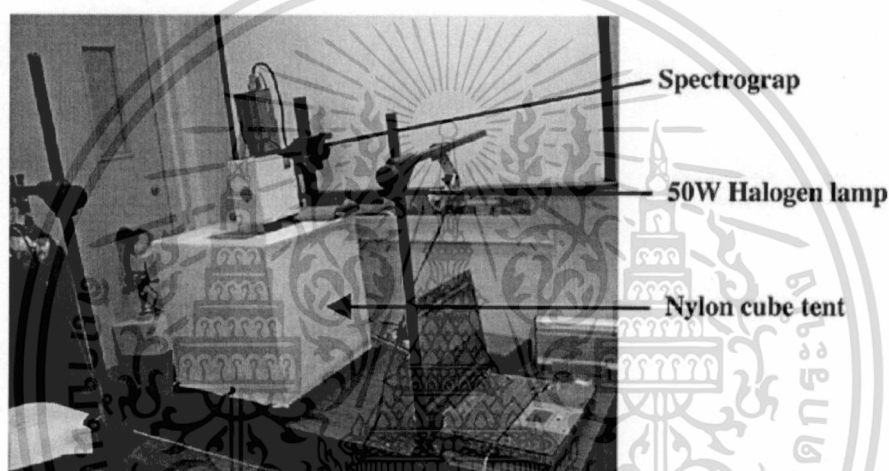
จากวิธีการและระบบต่างๆ ดังกล่าวได้ถูกสาธิตขึ้นเพื่อให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการตรวจวัดระดับความสุกกล้วย แต่อันเนื่องมาจากวิธีการและระบบดังกล่าวเป็นการตรวจวัดใน 1 มิติ จึงมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดพื้นที่ของการวัดและขนาดของวัตถุที่ต้องการทำการตรวจวัด

2.3.8 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นแสงใน 2 มิติ

2.3.8.1 การประมวลผลภาพหลายความยาวคลื่น

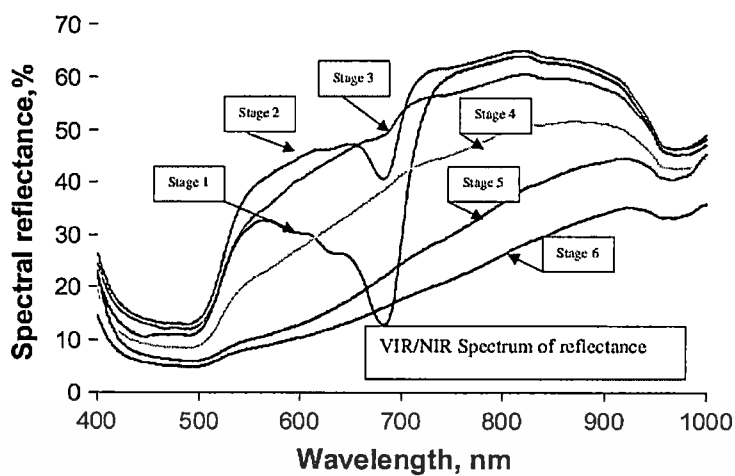
ระบบประมวลผลภาพหลายความยาวคลื่น (Hyperspectral imaging system) สำหรับใช้ในการจำแนกระดับความสุกของกล้วย [21] ประกอบไปด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ สเปกโตรกราฟ (Spectrograph, ImSpector V10E) ควบคู่มากับเลนส์ซูมแบบมาตรฐาน กล้องถ่ายภาพชนิด CCD หลอดฮาโลเจนขนาด 50 วัตต์ 2 หลอด และชุดสำหรับวางผลไม้ภายใต้การตรวจสอบที่มีกล่องในลอนสีขาวครอบอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ระบบนี้สามารถถ่ายภาพสเปกตรัมได้ตั้งแต่ช่วงของความยาวคลื่นแสงจาก 400 ถึง 1000 นาโนเมตร ซึ่งทำการถ่ายภาพออกมาได้ทั้งหมด 826 แถบสเปกตรัม โดยแต่ละภาพสเปกตรัมนี้จะมีขนาด 400×400 จุดภาพ ตัวอย่างกล้วยภายใต้การทดสอบทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 6 ระยะเวลาสุกด้วยกัน กล้วยที่จัดกลุ่มไว้ทั้งหมด 6 ระดับความสุกนี้จะมีทั้งหมด 3 ชุดด้วยกัน โดยแต่ละชุดถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 25 และ 30 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาตรวจสอบกับระบบประมวลผลภาพสเปกตรัมหลายความยาวคลื่นจะได้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตรดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าการสะท้อนแสงของกล้วยในระยะที่ 4-6 จะต่ำกว่ากล้วยในระยะที่ 1-3 เนื่องจากการดูดกลืนแสงของน้ำตาลซึ่งจะมีมากเมื่อกล้วยเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ในระยะที่ 1-3 นี้ กล้วยจะมีการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 450 680 และ 960 นาโนเมตร สำหรับกล้วยที่เก็บไว้ในอุณหภูมิทั้ง 3 ช่วงนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสังเกตการมีอยู่ของคลอโรฟิลล์ได้ในช่วงของสเปกตรัม 670-710 นาโนเมตร แต่ปริมาณของคลอโรฟิลล์ของกล้วยในระยะ 1 และ 2 ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะสูงกว่าในกล้วยที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส การดูดกลืนในช่วงนี้ไม่พบในกล้วยระยะที่ 4-6 เนื่องจากกล้วยได้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองและคลอโรฟิลล์ทั้งหมดได้ถูกสลายจนหมดไปอย่างสมบูรณ์ ในช่วงสเปกตรัมจาก 800-960 นาโนเมตร แสดงให้เห็นถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในผลกล้วย เนื่องจากเปลือกของกล้วยในระยะที่ยังไม่สุก (ระยะ 1 และ 2) จะมีความชื้นที่สูงกว่าและสอดคล้องกับการสะท้อนแสงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่กล้วยสุกแล้ว (ระยะ 3-6) เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดเปลือกและเนื้อของกล้วย เมื่อกล้วยเริ่มสุกปริมาณน้ำที่เปลือกกล้วยจะลดลงซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยน้ำจากระบวนการหายใจ การแพร่เข้าไปในเนื้อกล้วย และการคายน้ำออกจากผลกล้วย

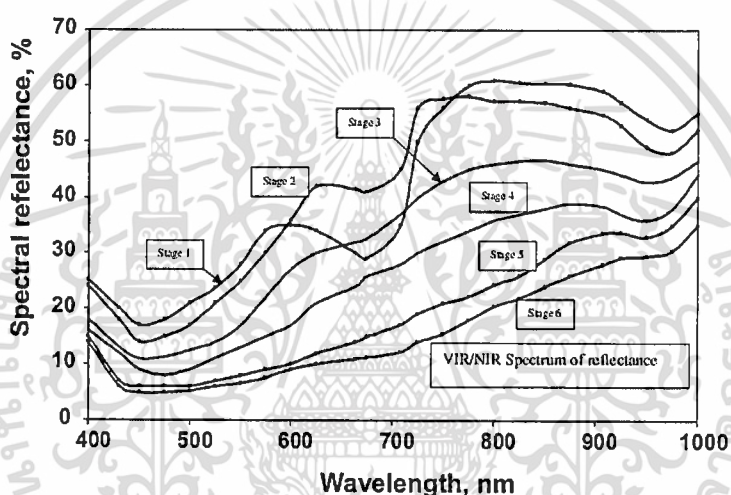


รูปที่ 2.19 ระบบถ่ายภาพสเปกตรัมหลายความยาวคลื่น [21]

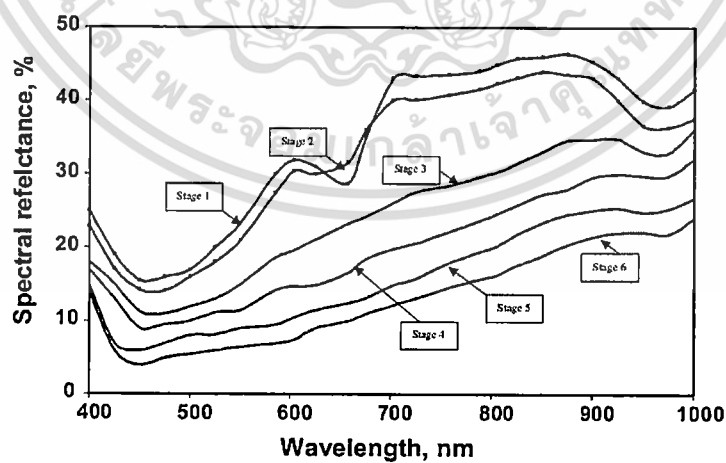
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

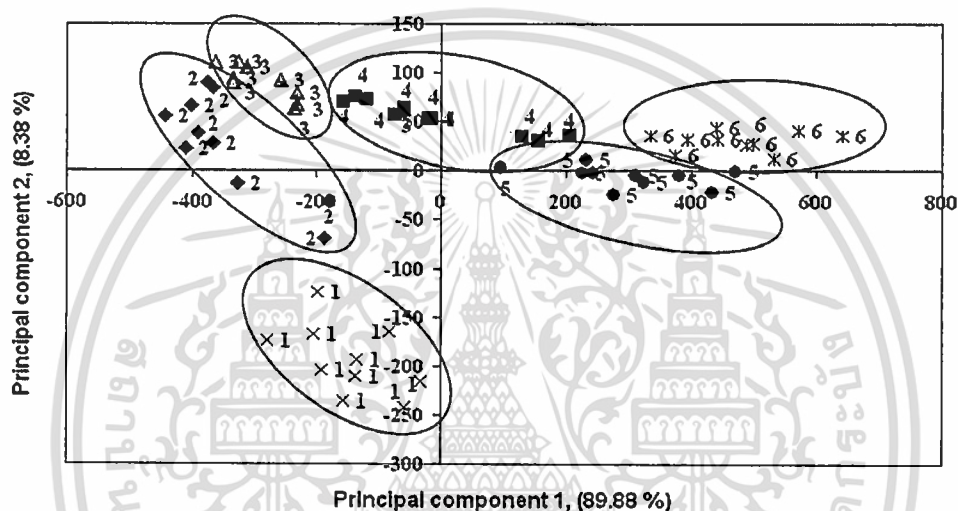


(ค)

รูปที่ 2.20 สเปกตรัมหลายความยาวคลื่นที่ได้จากการสะท้อนแสงของกล้วยที่ระดับความสุกต่างๆ ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ (ก) 20 °C (ข) 25 °C และ (ค) 30 °C [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

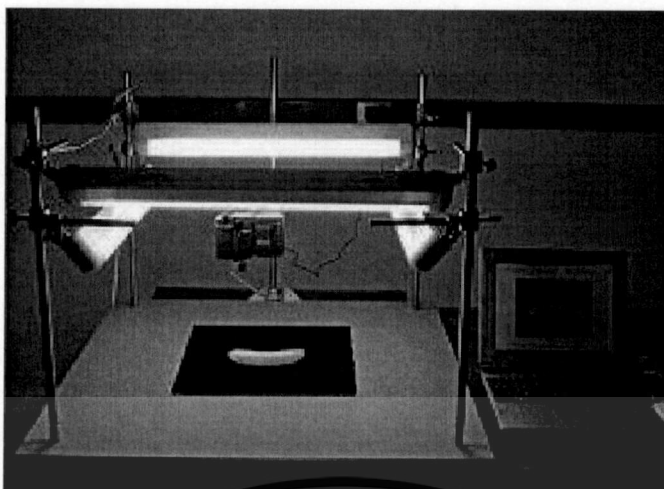
จากข้อมูลสเปกตรัมการสะท้อนแสงของกล้วยที่เก็บในอุณหภูมิต่างๆ ได้มีการเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดทั้งหมด 8 ความยาวคลื่น ได้แก่ 440 525 633 672 709 760 925 และ 984 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ร่วมกับการใช้หลักการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) เพื่อจำแนกระดับความสุกของกล้วยในระยะต่างๆ ทั้ง 6 ระยะ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าสององค์ประกอบหลักแรกสามารถจำแนกระยะความสุกของกล้วยทั้ง 6 ระยะได้ถึง 99.88% (PC1-89.88% และ PC2-8.38%) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมหลายความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง 400 ถึง 1000 นาโนเมตร ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถจำแนกกล้วยระดับความสุกของกล้วยที่อุณหภูมิต่างๆ ได้



รูปที่ 2.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากกล้วยในระดับความสุกต่างๆ [18]

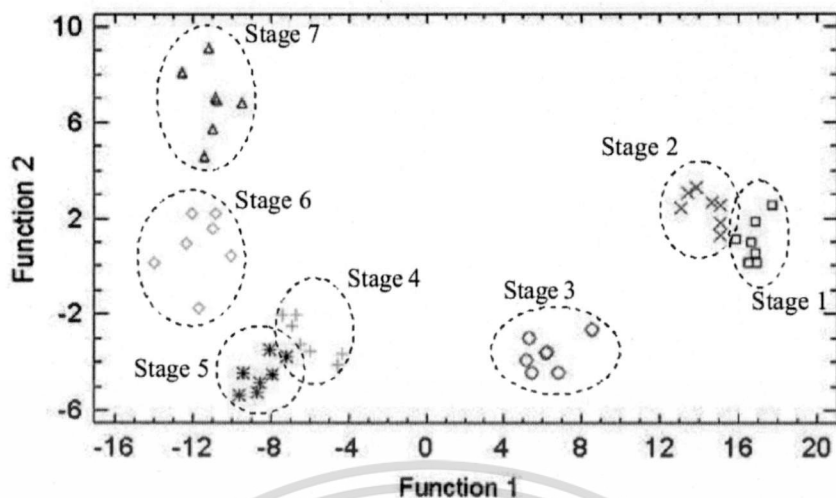
2.3.8.2 การวิเคราะห์สีจากเปลือก

การระบุระดับความสุกของผลไม้เมื่อพิจารณาจากลักษณะสีของผลไม้ [22] เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้การอย่างแพร่หลาย ซึ่งในรูปที่ 2.22 เป็นระบบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของสีเพื่อใช้ในการจะแนกกล้วยออกเป็นระยะต่างๆ ตามระดับความสุก โดยในระบบนี้ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงขาวขนาด 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอดวางเรียงกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยทำมุม 45 องศา กับวัตถุภายใต้การตรวจสอบและอยู่เหนือจากวัตถุ 30 เซนติเมตร กล้องถ่ายภาพสีถูกวางไว้เหนือวัตถุ 22 เซนติเมตร ซึ่งกล้องถ่ายภาพนี้มีขนาดภาพ 2048×1536 จุดภาพ และบันทึกภาพในรูปแบบของไฟล์ JPEG ภาพที่ได้จะถูกส่งต่อมายังคอมพิวเตอร์โดยตรงผ่านทางพอร์ตอนุกรม ภาพที่ได้จะถูกประมวลผลทางด้านรูปภาพบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB



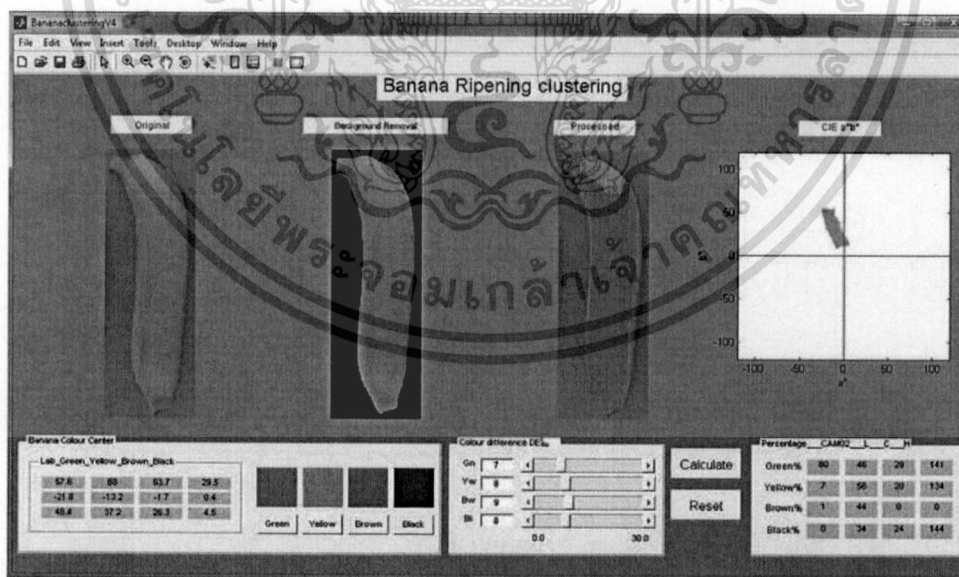
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของระบบสำหรับตรวจวัดสีจากเปลือกกล้วย [22]

ในเบื้องต้นภาพสีที่ได้จะถูกแยกองค์ประกอบหลักของสีออกมาพิจารณาซึ่งประกอบไปด้วย สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) หลังจากทีระดับสี RGB ได้ถูกแยกออกมาแล้วข้อมูลสีจะถูกนำมาสอบเทียบเพื่อให้ได้ตามมาตรฐาน CIELAB หรือ L^* , a^* , b^* ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านอาหารและเป็นการจำลองการรับรู้เกี่ยวกับสีของมนุษย์ ค่า L^* คือค่าความส่องสว่างหรือองค์ประกอบของความสว่างซึ่งมีค่าจาก 0 (ดำ) ถึง 100 (ขาว) พารามิเตอร์ a^* (จากเขียวไปแดง) และ b^* (จากน้ำเงินไปเหลือง) จากระบบสี $L^*a^*b^*$ ที่ได้ พบว่าค่า a^* จะเป็นตัวแทนที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบจุดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นระหว่างที่กล้วยกำลังสุก ดังนั้นจึงนำค่า a^* มาวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของจุดสีน้ำตาลที่ปรากฏต่อพื้นที่ของกล้วยทั้งหมดหรือ %BSA นอกจากนี้ยังใช้ค่าความชัดของภาพ (Contrast) มาร่วมประกอบการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการประเมินและคัดแยกระดับความสุกของกล้วยในแต่ละระยะอีกด้วย จากที่กล่าวมาตัวแปรทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งประกอบด้วย L^* , a^* , b^* , %BSA, และ ความชัด จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Sequential Forward Selection (SFS) โดยมีฟังก์ชันในการจำแนก ฟังก์ชันที่ 1 คือ $-a^*-0.65b^*+0.09L^*+0.08\%BSA+0.15\text{contrast}$ และฟังก์ชันที่ 2 คือ $-0.07a^*-1.35b^*+0.82L^*+0.72\%BSA+0.48\text{contrast}$ ซึ่งพบว่ามีความแม่นยำถึง 98% ในการจำแนกกล้วยทั้งหมด 49 ผลใน 7 ระดับความสุก ดังแสดงในรูปที่ 2.23



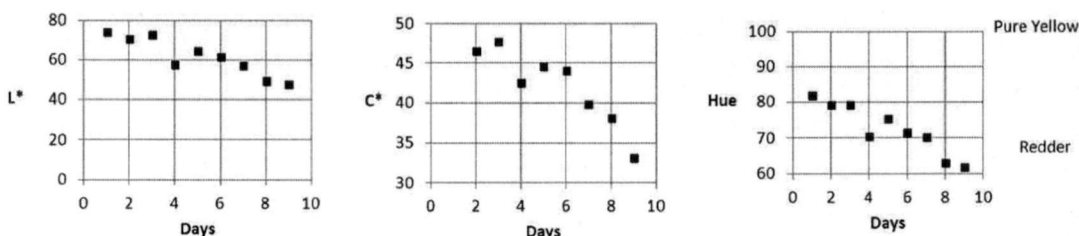
รูปที่ 2.23 ผลการคัดแยกกล้วยตามระดับความสุกด้วยวิธี SFS [22]

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้คือวิธีดูสีจากเปลือกเพื่อจัดกลุ่มกล้วยตามระดับความสุกต่างๆ โดยวิธีการดังกล่าวได้นำกล้วยในแต่ละระดับความสุกมาถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลภายใต้แสงขาวเพื่อคำนวณหา ค่าความสว่าง (Lightness: L^*) ตามมาตรฐาน CIELAB , ค่าความเข้มของสี (Chroma: C^*), และ ค่า Hue [23] ซึ่งโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ผลมีลักษณะดังที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.24 และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้แสดงเอาไว้มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามระยะเวลาที่เก็บกล้วยเอาไว้



รูปที่ 2.24 โปรแกรมสำหรับจัดกลุ่มกล้วยตามระดับความสุก [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของค่า L^* , C^* , และ Hue ตามระยะเวลาที่กล้วยที่ถูกเอาไว้ [23]

2.3.8.3 การวิเคราะห์สีด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

การพิจารณาจากลักษณะสีร่วมกับการนำหลักการทางสถิติหรือการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม [24] เป็นอีกระบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยได้ โดยระบบดังกล่าวจะทำการเก็บภาพสีและนำมาวิเคราะห์ลักษณะของฮิสโตแกรมผสมผสานกับการใช้หลักการโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการจำแนกระดับความสุกของกล้วยออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ยังไม่สุก สุกพอดี และสุกเกินไป ซึ่งระบบนี้ได้ทำการถ่ายภาพกล้วยภายใต้การตรวจสอบด้วยกล้อง web camera ภายใต้แสงขาว โดยจะใช้กล้วยในการทดสอบระดับความสุกละ 20 ผล รวมเป็น 60 ผล และแบ่งกล้วยออกเป็น 2 ชุด ชุดแรก 32 ผล สำหรับใช้ในการฝึกและเรียนรู้ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมและอีก 28 ผลที่เหลือจะใช้สำหรับการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการฝึกเรียบร้อยแล้ว



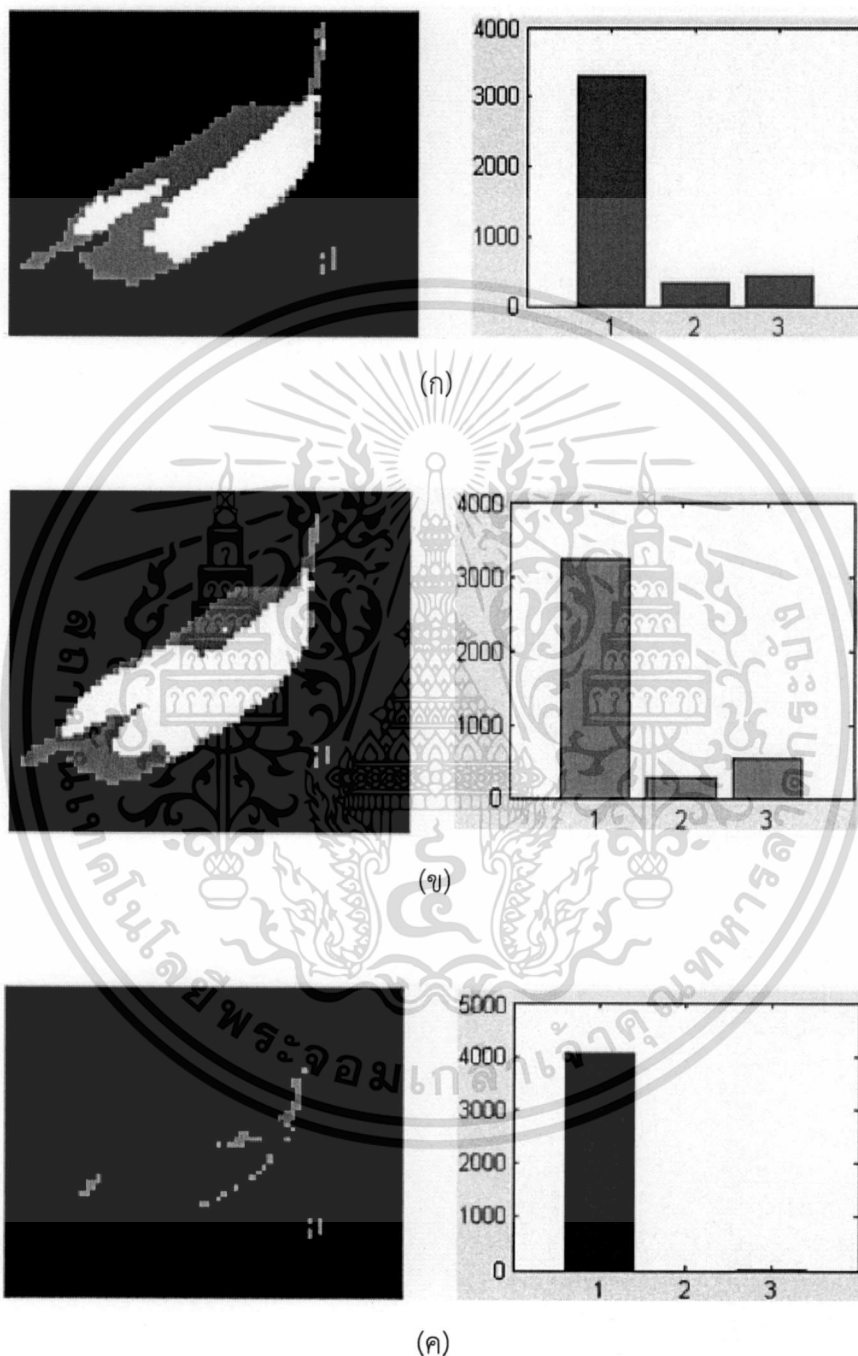
รูปที่ 2.26 ภาพกล้วยที่ถ่ายได้ภายใต้แสงขาว [24]

ภาพสีกล้วยที่ถ่ายได้ในแต่ละผล (ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.26) จะถูกแยกองค์ประกอบของภาพสีออกมาเป็นระนาบสีแดง ระนาบสีเขียว และระนาบสีน้ำเงิน ความเข้มของจุดภาพในแต่ละระนาบของภาพสีจะอยู่ในช่วง 0-255 จากความเข้มของแต่ละจุดภาพนี้จะถูกปรับเปลี่ยนใหม่ โดยกำหนดให้จุดภาพที่มีค่าสีอยู่ในช่วง 0-120 ปรับค่าใหม่ให้เป็น 0 ส่วนจุดภาพที่อยู่ในช่วง 121-190 จะถูกปรับให้เป็น 122 และจุดภาพในช่วง 191-255 จะถูกปรับให้เป็น 255 ดังนั้นภาพของกล้วยในแต่ละระนาบสีจะมีลักษณะของฮิสโตแกรมหรือความถี่ของค่าสีอยู่ 3 กลุ่มด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยระนาบสีแดงจะถูกแบ่งเป็น r_1 , r_2 , และ r_3 ระนาบสีเขียวถูกแบ่งเป็น g_1 , g_2 , และ g_3 และระนาบสีน้ำเงินถูกแบ่ง b_1 , b_2 , และ b_3 ซึ่งทั้ง 9 องค์ประกอบของกล้วยแต่ละผลนี้จะถูกใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการฝึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม จากการทดสอบกับกล้วย 28 ผลที่เหลือ พบว่าการวิเคราะห์สีจากลักษณะของฮิสโตแกรมผสมผสานกับการวิธีของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกกล้วยได้ถูกต้องถึง 25 ผลหรือ 98%



รูปที่ 2.27 ลักษณะภาพสีหลังจากการวิเคราะห์แบบฮิสโตแกรมในระนาบของ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน [24]

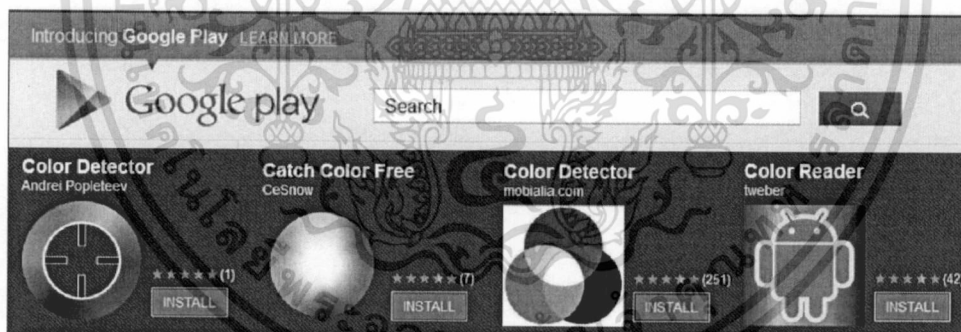
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8.4 การวิเคราะห์ที่สืด้วยโปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์พกพาฉลาด

ในการเติบโตของเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอุปกรณ์พกพาฉลาด (Smart mobile device) จากการเติบโตดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ เช่น FruitChecker (รูปที่ 2.28 (ก)), Colorimeter, Catch Color และ Color Detector (รูปที่ 2.28 (ข)) [25] ซึ่งสามารถนำมาประเมินคุณภาพโดยประมาณของผลไม้ภายใต้แสงขาวจากสภาวะแวดล้อมหรือการฉายแสงจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode) ที่มาพร้อมกับโทรศัพท์มือถือ



(ก)



(ข)

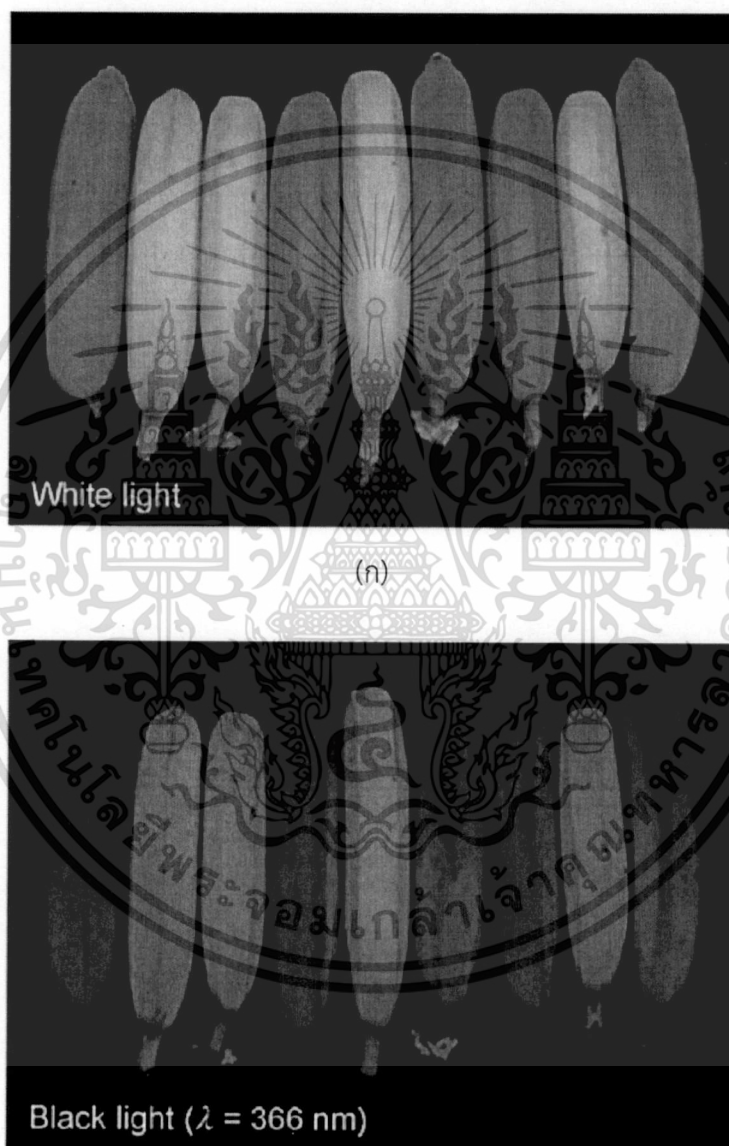
รูปที่ 2.28 โปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์พกพาฉลาดที่สามารถนำมาใช้วัดสีของผลไม้ได้ [25]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในกล้วยที่สุกเหลืองเต็มที่หรืออยู่ในระยะที่สุกพอดีคลอโรฟิลล์จะสลายตัวไปเกือบทั้งหมด ดังนั้นนับจากระยะนี้ไปผลกล้วยจะยังคงมีสีเหลืองอยู่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการที่อยู่บนพื้นฐานของการวัดสีของแสงในย่านที่ตามองเห็นโดยมีตัวรับสัญญาณภาพสีเป็นองค์ประกอบหรือการสังเกตด้วยตาของมนุษย์จะไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงระดับความสุกของกล้วยได้ จนกระทั่งมีรอยดำหรือจุดสีน้ำตาลเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของพื้นผิวของกล้วย ซึ่งแสดงว่าผลไม้สุกหอมเกินไปหรือมีความเสียหายจากความสุกเกินไปเกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นภายใต้แสงขาวนี้จึงไม่สามารถทำการตรวจสอบหรือคัดแยกกล้วยที่อยู่ระหว่างระยะที่สุกพอดีและสุกหอมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8.5 การวิเคราะห์ลักษณะการเรืองแสง

อีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการระบุระดับความสุกของกล้วยได้ คือ การตรวจสอบปริมาณการเปล่งแสงสีน้ำเงินของคลอโรฟิลล์เมื่อเกิดการแตกตัวภายใต้การกระตุ้นจากแสงที่มีพลังงานสูงอย่างแสงอัลตราไวโอเล็ตช่วง A (UVA) ซึ่งปริมาณของแสงที่เรืองออกมาเช่น แสงสีน้ำเงินจะปรากฏให้เห็นเด่นชัดกว่าลักษณะของสี (แสงในย่านที่ตามองเห็น) ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อผลไม้เริ่มสุกมากขึ้นและจะลดลงเมื่อผลไม้ได้สุกเต็มที่แล้ว [26]

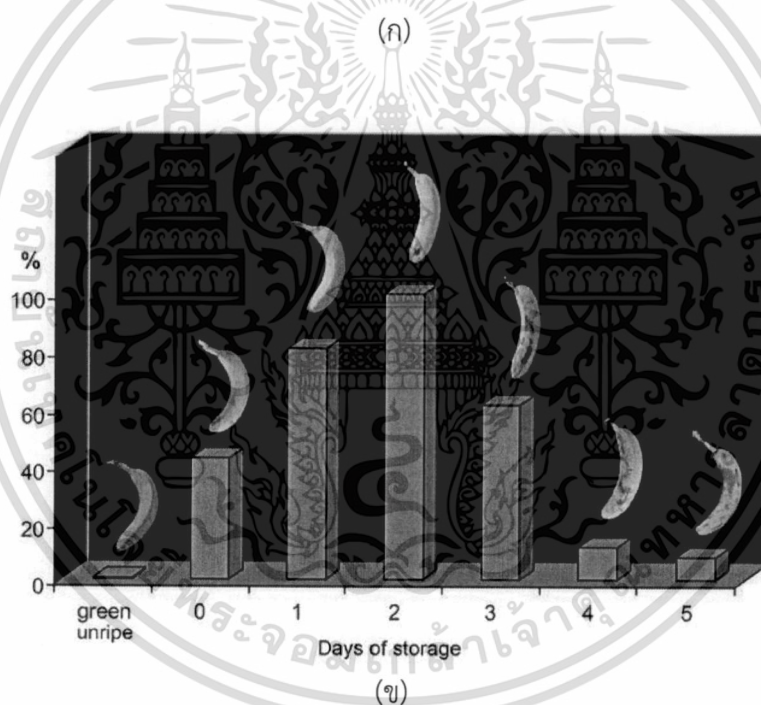
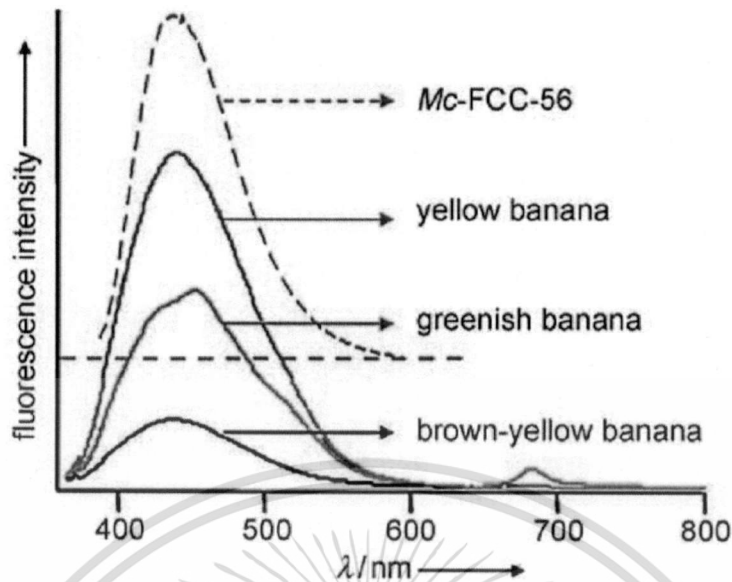


รูปที่ 2.29 ภาพสเปกตรัม (ก) การสะท้อนแสงภายใต้แสงขาว และ (ข) การเรืองแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่มีสีเขียวพบมากในใบ ลำต้น และผลของพืช ผลไม้บางชนิด เช่น กล้วย ในขณะที่ยังเจริญเติบโตไม่เต็มที่เมื่อสังเกตภายใต้การส่องสว่างของแสงขาวผลจะมีสีเขียว เนื่องจากในระยะนี้เปลือกของผลกล้วยยังมีปริมาณของคลอโรฟิลล์อยู่มาก แต่เมื่อกล้วยเริ่มสุกจะมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง เนื่องจากคลอโรฟิลล์ได้สลายตัวลงไปเกือบหมด และมีการสร้างแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ทำให้ผลกล้วยมีสีเหลืองขึ้นมาแทน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) ในขณะที่ทำการสังเกตภายใต้การส่องสว่างของแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร ผลกล้วยที่สุกแล้วจะปรากฏการเรืองแสงสีน้ำเงินเด่นชัดขึ้นมามากกว่าของผลกล้วยที่ยังไม่สุก ดังรูปที่ 2.29 (ข) การเรืองแสงสีน้ำเงินนี้เป็นผลผลิตมาจาก “fluorescent” catabolites of chlorophyll (FCCs) ซึ่งเป็นตัวกลางในการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และตรวจพบได้ยากในพืชชั้นสูง การเรืองแสงของกล้วยภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน-เขียว (400-500 นาโนเมตร) ดังรูปที่ 2.30 (ก) ซึ่งจะมีการปลดปล่อยออกมามากขึ้นเมื่อกล้วยเริ่มมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง หลังจากนั้นเมื่อผลกล้วยเริ่มสุกหอมจะมีจุดสีน้ำตาลปรากฏขึ้น เนื่องจากการเริ่มเสื่อมสภาพของเปลือกกล้วย ในระยะนี้กระบวนการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ได้สิ้นสุดลงแล้ว FCCs จึงค่อยๆ ลดลงซึ่งเป็นผลให้การเรืองแสงลดลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.30 (ก) และ (ข)



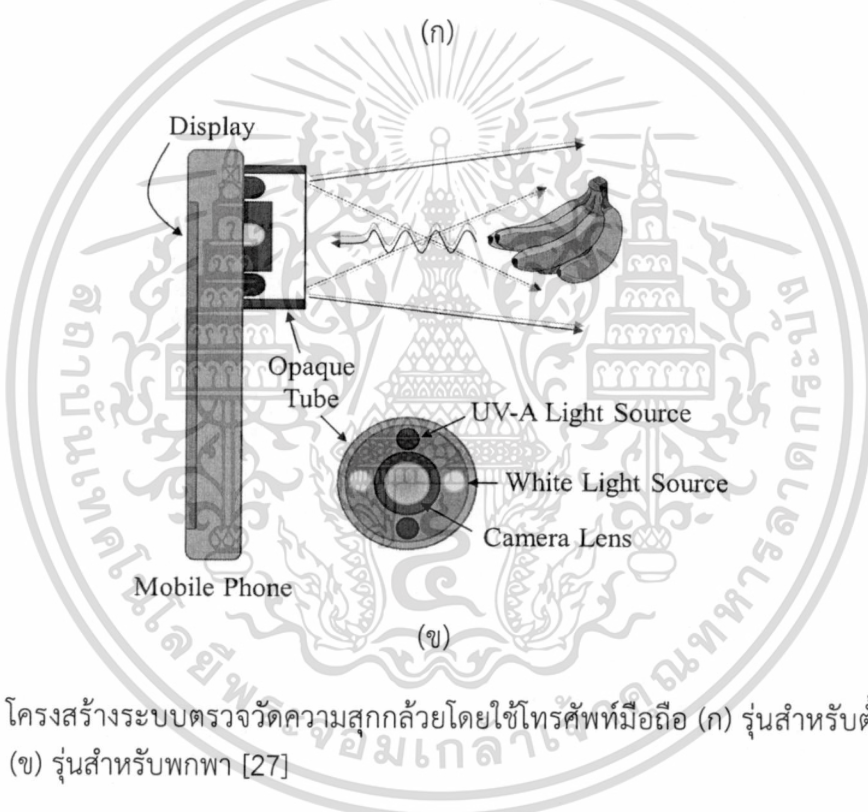
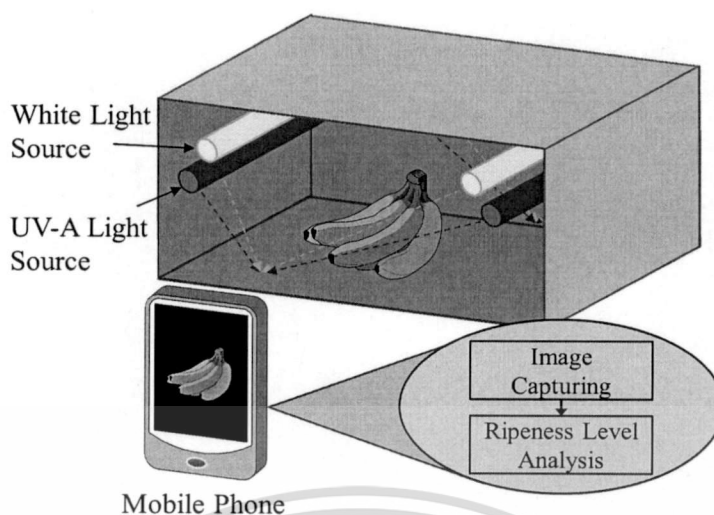


รูปที่ 2.30 (ก) สเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยในย่านของสีน้ำเงิน-เขียว และ (ข) ปริมาณการเรืองแสงของกล้วยในระดับความสุกต่างๆ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต [26]

อย่างไรก็ตาม เมื่อผลไม้ได้สุกเต็มที่แล้ว ปริมาณของแสงสีน้ำเงินที่เรืองออกมาจะลดลงเรื่อยๆ จนใกล้เคียงกับระดับของการเรืองแสงในช่วงที่ผลไม้ยังไม่สุก ซึ่งทำให้การประมวลผลภาพที่ได้จากแสงที่เรืองออกมาจากผลไม้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของผลไม้ที่ยังไม่สุกกับผลไม้สุกเกินไปแล้วออกจากกันได้

2.4 หลักการและระบบตรวจสอบความสุกกล้วยด้วยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์

จากหลักการและระบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจสอบระดับความสุกกล้วยที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น พบว่าการประมวลผลภาพสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะสีของกล้วยหรือการประมวลผลภาพสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการเปล่งแสงของกล้วยเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงไม่สามารถระบุระดับความสุกของกล้วยได้ตลอดพื้นผิวที่กำลังตรวจสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากในแต่ละบริเวณของผลกล้วยมีระดับความสุกไม่เท่ากัน การใช้วิธีการดังกล่าวจึงไม่สามารถทำการตรวจวัดและระบุระดับความสุกในแต่ละบริเวณของผลกล้วยได้ เพื่อให้สามารถระบุระดับความสุกในแต่ละบริเวณของกล้วยทั้งผลตั้งแต่ระยะที่ยังไม่สุกจนถึงระยะสุกห่อหุ้มได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อไม่นานมานี้ วิธีการตรวจวัดระดับความสุกของกล้วยแบบ 2 มิติด้วยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์จึงได้ถูกเสนอขึ้น [27] โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.31 ซึ่งระบบทั้งสองรุ่นทั้งแบบตั้งโต๊ะ (รูปที่ 2.31 (ก)) และแบบพกพา (รูปที่ 2.31 (ข)) นี้ประกอบไปด้วยโทรศัพท์มือถือฉลาด แหล่งกำเนิดแสงขาว และแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ในโครงสร้างแบบตั้งโต๊ะสามารถนำไปใช้งานในซูเปอร์มาเก็ตและสถานที่สำหรับการส่งออก สำหรับรุ่นพกพาเหมาะสำหรับการใช้งานของแต่ละบุคคลและเป็นเครื่องมือการตรวจสอบแบบเคลื่อนที่สำหรับเจ้าหน้าที่คลังสินค้า การวิเคราะห์ภาพสเปกตรัม 2 มิติ สำหรับการประเมินระดับความสุกของกล้วยอยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่า สีของกล้วยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองระหว่างการสุก อันเนื่องมาจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เมื่อสังเกตภายใต้แหล่งกำเนิดแสงขาว นอกจากนี้การเรืองแสงของกล้วยในช่วงของสเปกตรัมสีน้ำเงิน-เขียว หรือในช่วงของความยาวคลื่นแสง 400-500 นาโนเมตรเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตรมีแนวโน้มลดลงเมื่อกล้วยเปลี่ยนจากสีเหลืองไปสู่สีเหลืองน้ำตาล จากรูปที่ 2.31 (ก) เมื่อแสงขาวตกกระทบบนกล้วยที่ใช้ในการตรวจสอบ ภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยถูกถ่ายและบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลของโทรศัพท์มือถือฉลาด หลังจากนั้นแสงขาวจะถูกดับลงและแสงอัลตราไวโอเล็ตจะถูกเปิดขึ้นแทน ในขั้นตอนนี้เป็นถ่ายและบันทึกภาพภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของการเรืองแสงจากกล้วย



รูปที่ 2.31 โครงสร้างระบบตรวจวัดความสุกกล้วยโดยใช้โทรศัพท์มือถือ (ก) รุ่นสำหรับตั้งโต๊ะ และ (ข) รุ่นสำหรับพกพา [27]

ภาพสเปกตรัมช่วงกว้างภายใต้แหล่งกำเนิดแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตนี้จะถูกนำมาพิจารณาโดยแยกองค์ประกอบของภาพเหล่านี้ออกเป็นระนาบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เนื่องจากผลไม้สีเขียวเช่น กล้วยและมะม่วง จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเริ่มสุกซึ่งลักษณะสีที่เป็นองค์ประกอบอย่างเด่นชัดคือระนาบของสีแดงและสีเขียว ด้วยเหตุนี้ระนาบของสีแดงและเขียวจึงถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้หาอัตราส่วนของแสงสีขาว (WLR)

$$WLR(x, y) = R_{wl}(x, y) / G_{wl}(x, y) \quad (2.1)$$

ซึ่งในที่นี้ $R_{wl}(x, y)$ และ $G_{wl}(x, y)$ คือระดับค่าสีของสีเขียวและสีแดง ณ ตำแหน่งจุดภาพ x, y ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันสีเขียวและสีน้ำเงินคือสีที่เป็นองค์ประกอบหลักของภาพสเปกตรัมการเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรืองแสงของกล้วย ดังนั้นอัตราส่วนของแสงอัลตราไวโอเล็ต ณ ตำแหน่งจุดภาพ x,y สามารถคำนวณได้จาก

$$UVR(x, y) = B_{uv}(x, y) / G_{uv}(x, y) \quad (2.2)$$

ซึ่งในที่นี้ $B_{uv}(x,y)$ และ $G_{uv}(x,y)$ คือระดับค่าสีของสีน้ำเงินและสีเขียว ณ ตำแหน่งจุดภาพ x,y ตามลำดับ เพื่อระบุระดับความสุกในภาพของกล้วยที่ตำแหน่งจุดภาพ x,y หรือ $RL(x,y)$ สามารถดำเนินการได้โดยการประยุกต์ใช้ค่าขีดเริ่มต้นสองระดับ ตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

$$RL(x, y) = \begin{cases} \text{Immature, } WLR(x, y) \leq h \\ \text{Ripe, } WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) < k \\ \text{Overripe, } WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) \geq k \end{cases} \quad (2.3)$$

ซึ่งค่าขีดเริ่มต้นตัวแรก “ h ” ถูกใช้สำหรับการแบ่งกล้วยในเชิงพื้นที่ให้เป็นพื้นที่ที่ยังไม่สุกและที่สุกพอดี โดยสามารถคำนวณได้ด้วยสมการพื้นฐานอย่างง่ายดังนี้

$$h = \frac{\overline{WLR}_0 + \overline{WLR}_{-1}}{2} \quad (2.4)$$

ซึ่ง $\overline{WLR}$ คือ ค่าเฉลี่ย WLR ของภาพกล้วยทั้งผล ตัวห้อย “0” และ “-1” หมายถึง กล้วยที่อยู่ในระยะสุกพอดีและก่อนสุกพอดี 1 วัน ตามลำดับ ค่าขีดเริ่มต้นตัวที่สอง “ k ” ถูกใช้สำหรับการคัดแยกในเชิงพื้นที่ของกล้วยระหว่างพื้นที่ที่สุกพอดีและสุกห่อม ในกรณีนี้ k สามารถคำนวณได้จาก

$$k = \frac{\overline{UVR}_0 + \overline{UVR}_{-1}}{2} \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกัน $\overline{UVR}_0$ และ $\overline{UVR}_{-1}$ คือ ค่าเฉลี่ย UVR ของภาพกล้วยทั้งผลที่ถ่ายได้ในวันที่สุดพอดีและก่อนสุกพอดี 1 วัน ตามลำดับ เมื่อค่าขีดเริ่มต้น h และ k ทั้งสองนี้สามารถหาออกมาได้แล้ว กล้วยก็สามารถถูกแยกคัดแยกด้วยวิธีแบบไม่ทำลายได้เป็นบริเวณที่มีระดับความสุกแตกต่างกัน 3 บริเวณ

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ในการสร้างระบบตรวจระดับความสุกของกล้วยแบบสองมิติด้วยแสงสามารถสรุปขั้นตอนทั้งหมดเป็นแผนผังการดำเนินการได้ดังรูปที่ 3.1



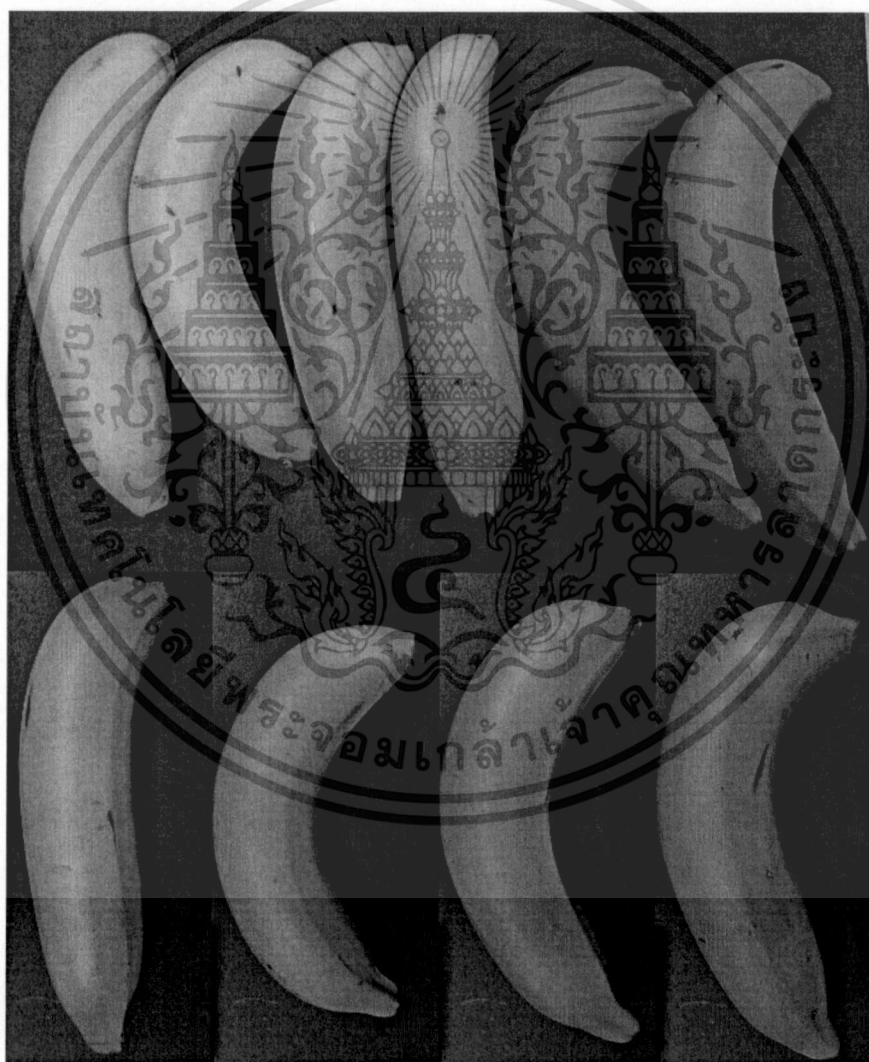
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์สำหรับติดตั้งระบบ

3.1.1 ตัวอย่างกล้วย

กล้วยที่ใช้ในการทดสอบนี้คือกล้วยหอมทอง (*Musa* (AAA group) “Kluai Hom Thong”) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 10 ผล ซึ่งถูกเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิ 25 ± 3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ $70 \pm 5\%$ ดังตัวอย่างที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.2 โดยเลือกซื้อมาจากร้านขายผลไม้ทั่วไปตั้งแต่ผลยังเป็นสีเขียวซึ่งยังอยู่ในระยะที่ยังไม่สุกและบางผลเริ่มเข้าสู่ในระยะที่สุก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกล้วยหอมทองผลหนึ่งจะมีขนาดกว้าง 3-4 เซนติเมตร ยาว 21-25 เซนติเมตร ปลายผลมีจุดเห็นชัดเปลือกบางและเมื่อสุกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง แต่ที่ปลายจุดจะมีสีเขียวแล้วเปลี่ยนสีภายหลัง เนื้อสีเหลืองเข้ม กลิ่นหอม รสหวาน [28]

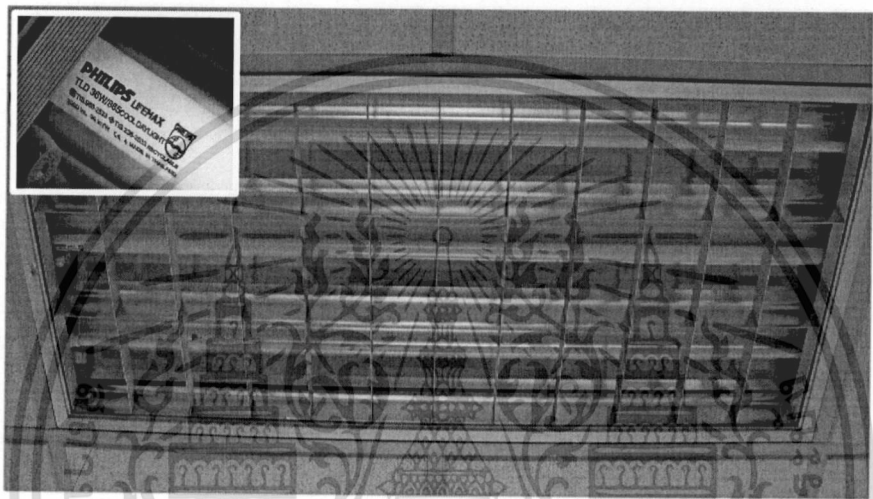


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกล้วยหอมสำหรับการทดสอบ

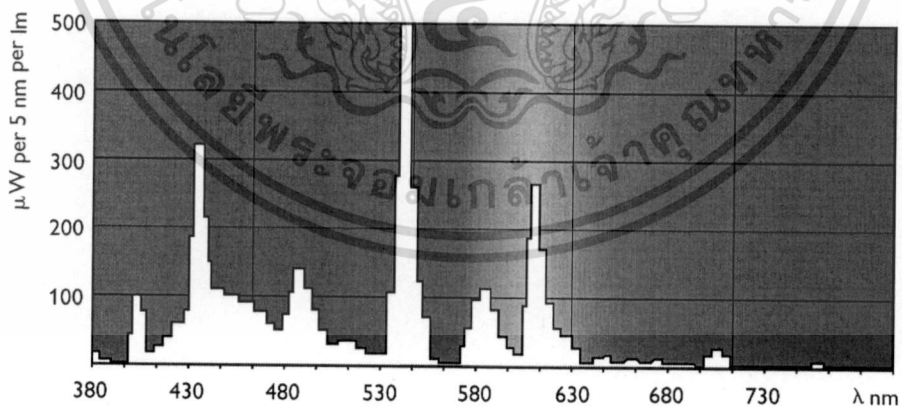
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงขาว

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงขาวที่เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ ยี่ห้อ Philips รุ่น TL-D 36W/865 มาตรฐาน T8 จำนวน 6 หลอด ซึ่งติดตั้งไว้บนเพดานของห้องปฏิบัติการ เนื้อชุดการทดลองนี้เป็นระยะห่าง 3 เมตร ดังที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.3 โดยแหล่งกำเนิดแสงขาวนี้ ปลดปล่อยคลื่นแสงออกมาในช่วงกว้างตั้งแต่ 380 - 720 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.4 [29] ซึ่งแสงขาวนี้จะ ถูกใช้เป็นแสงกระตุ้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการสะท้อนแสงของผลกล้วยที่มีสีเปลี่ยนแปลง ไปตามระยะต่างๆ ของการสุก



รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดแสงขาว

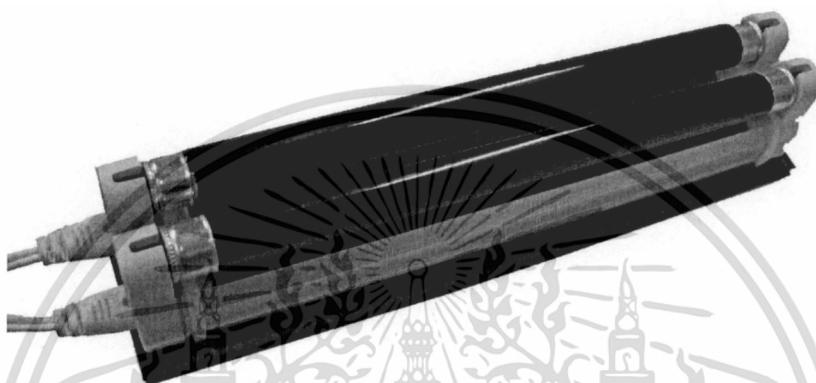


รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงขาว [29]

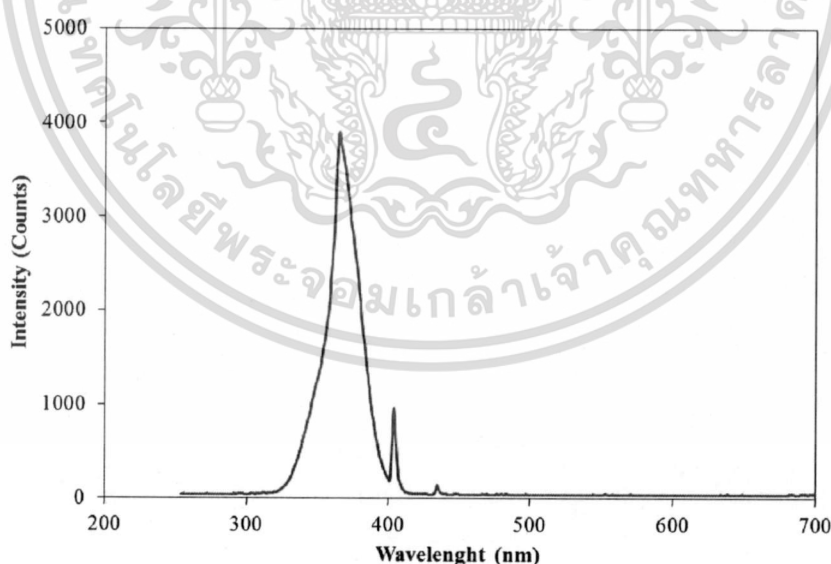
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3. แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต

สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการเรืองแสงของผลกล้วยที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะต่างๆ ของการสุก งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แสงกระตุ้นเพื่อให้ผลกล้วยเกิดการเรืองแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ตช่วง A (UVA) ยี่ห้อ Haichao รุ่น F6T5/BLB ขนาด 6 วัตต์ (ดังรูปที่ 3.5) จำนวน 4 หลอด ซึ่งสวมอยู่กับตัวยึดมาตรฐานแบบ T5 โดยที่หลอดอัลตราไวโอเล็ตแต่ละหลอดปลดปล่อยคลื่นแสงความยาวคลื่นที่วัดได้สูงสุด 365 นาโนเมตร ดังที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 โทรศัพท์มือถือฉลาด

โทรศัพท์มือถือฉลาด (Smart Phone) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยี่ห้อ HTC รุ่น Wildfire (ดังรูปที่ 3.7) ถูกวางอยู่เหนือจากถ้วยที่ระยะ 20 เซนติเมตร โดยโทรศัพท์มือถือฉลาดที่เลือกใช้มีคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

- ประมวลผลการทำงานด้วย Qualcomm MSM 7225 Processor ความเร็วในการประมวลผล 528 MHz
- หน่วยความจำ ROM ขนาด 512 MB และ RAM ขนาด 384 MB พร้อมรองรับการ์ดหน่วยความจำเสริมภายนอกแบบ microSD Card
- จอแสดงผลแบบ TFT LCD Capacitive Touchscreen ความละเอียด 240x320 Pixels (QVGA : กว้าง 3.2 นิ้ว) พร้อมระบบสัมผัสแบบหลายจุด (Multi-Touch)
- กล้องดิจิทัลความละเอียดสูงสุด 5 ล้านพิกเซล (2592x1952), ไฟแฟลช, ระบบโฟกัสภาพอัตโนมัติ, ถ่ายภาพวิดีโอ
- ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ 2.2



รูปที่ 3.7 โทรศัพท์มือถือฉลาดที่ใช้ในการทดสอบ

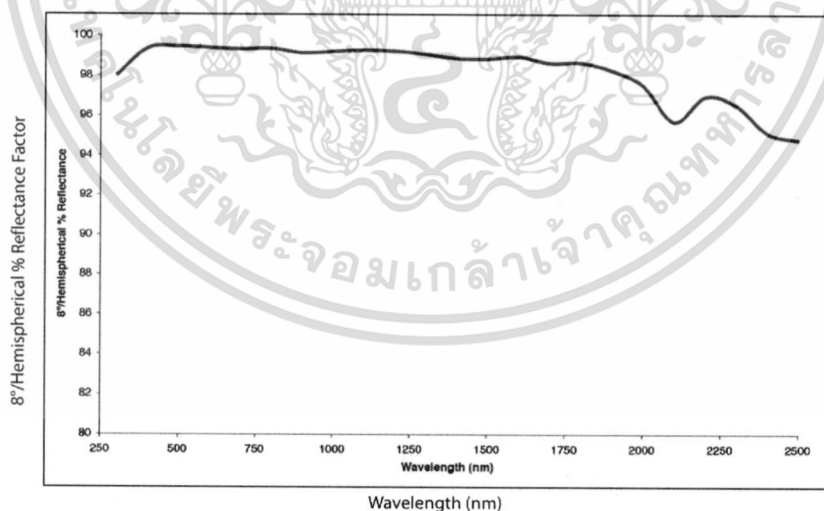
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐาน

วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐานจากบริษัท Labsphere รุ่น SRT-99-020 ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีขนาด 50.8×50.8 ตารางเซนติเมตร สามารถสะท้อนแสงในช่วงของความยาวคลื่น 350 – 1600 นาโนเมตร ได้ถึง 99% ดังรูปที่ 3.9 วัสดุสะท้อนแสงนี้ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมโฟกัสและเวลาในการรับแสงของกล้องดิจิตอลบนโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 3.8 วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐาน

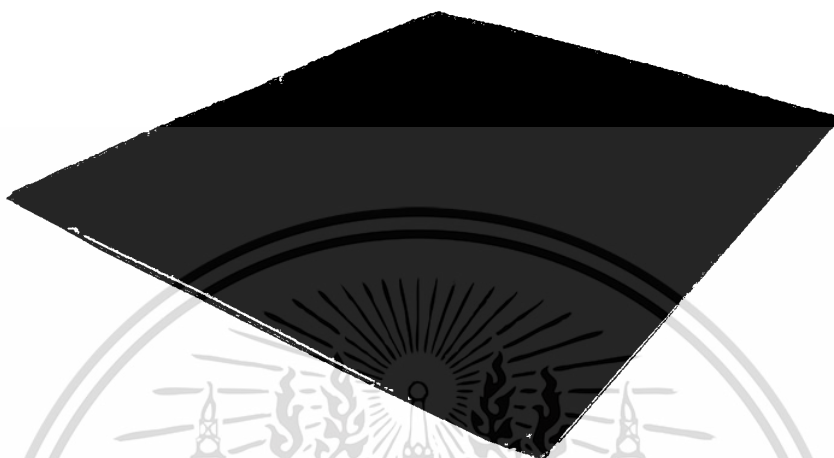


รูปที่ 3.9 ลักษณะการสะท้อนแสงในความยาวคลื่นต่างๆ ของวัสดุสะท้อนแสง [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 พื้นหลังสำหรับวางตัวอย่างภายใต้การตรวจสอบ

กล้วยภายใต้การตรวจสอบความสุกถูกวางอยู่บนพื้นหลังที่เป็นกระดาษแข็งสีดำขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 โดยพื้นหลังสีดำนี้นี้จะช่วยทำให้ระบบทำการแยกผลกล้วยออกจากภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น

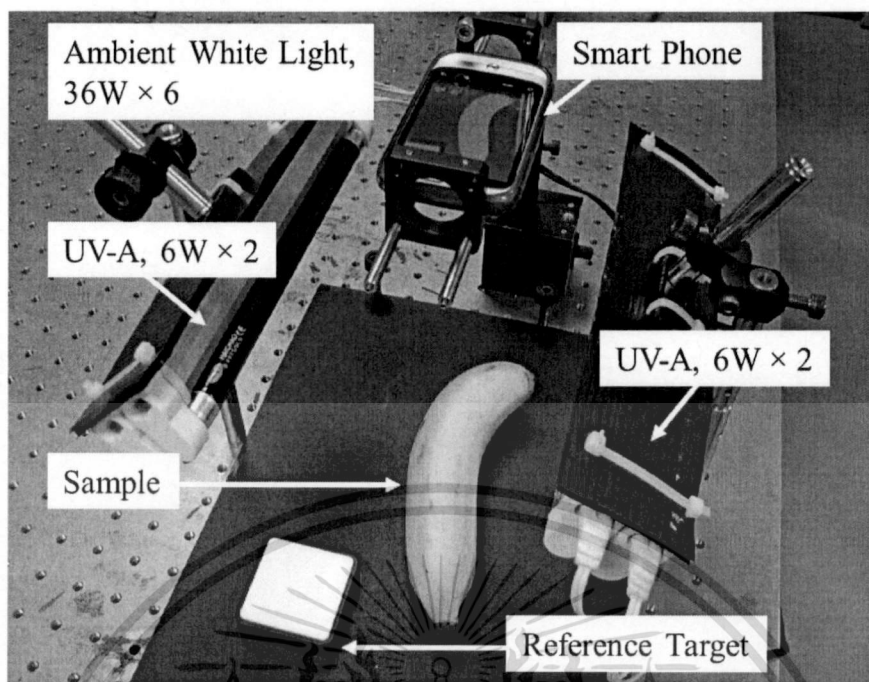


รูปที่ 3.10 พื้นหลังสำหรับวางกล้วยขณะทำการทดสอบ

3.2 การติดตั้งระบบตรวจวัดระดับความสุกกล้วยสำหรับห้องปฏิบัติการ

จากอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วภายในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการติดตั้งระบบสำหรับการทดลองตามโครงสร้างในรูปที่ 2.31 (ก) และระบบที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 จากรูปการติดตั้งการทดลองนี้หลอดอัลตราไวโอเลตช่วง A ขนาด 6 วัตต์ 2 หลอด สวมอยู่กับตัวยึดมาตรฐานแบบ T5 ถูกติดตั้งไว้ที่ 15 เซนติเมตร จากด้านข้างแต่ละข้างของกล้วย หลอดอัลตราไวโอเลตแต่ละหลอดปลดปล่อยคลื่นแสงความยาวคลื่นที่วัดได้สูงสุด 365 นาโนเมตร ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 6 หลอด ซึ่งติดตั้งไว้บนเพดานของห้องปฏิบัติการเหนือชุดการทดลองนี้ โทรศัพท์มือถือฉลาดถูกวางอยู่เหนือจากกล้วยที่ระยะ 20 เซนติเมตร ซึ่งทำให้ได้มุมมองของการถ่ายภาพ (Field of view) ขนาด 19x14 ตารางเซนติเมตร กล้วยที่ใช้ในการทดสอบนี้คือกล้วยหอมทอง (*Musa* (AAA group) “Kluai Hom Thong”) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 10 ผล โดยเลือกซื้อจากร้านขายผลไม้ทั่วไปตั้งแต่ผลยังเป็นสีเขียวซึ่งยังอยู่ในระยะที่ยังไม่สุก กล้วยภายใต้การตรวจสอบความสุกถูกวางอยู่บนพื้นหลังที่เป็นกระดาษแข็งสีดำ นอกจากนี้ได้ใช้วัสดุสะท้อนแสงสีขาวแบบมาตรฐานขนาด 50.8x50.8 ตารางเซนติเมตรวางอยู่ในตำแหน่งมุมด้านหนึ่งของกระดาษแข็งสีดำเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมโพกัสและเวลาในการรับแสงของกล้องดิจิทัลบนโทรศัพท์มือถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

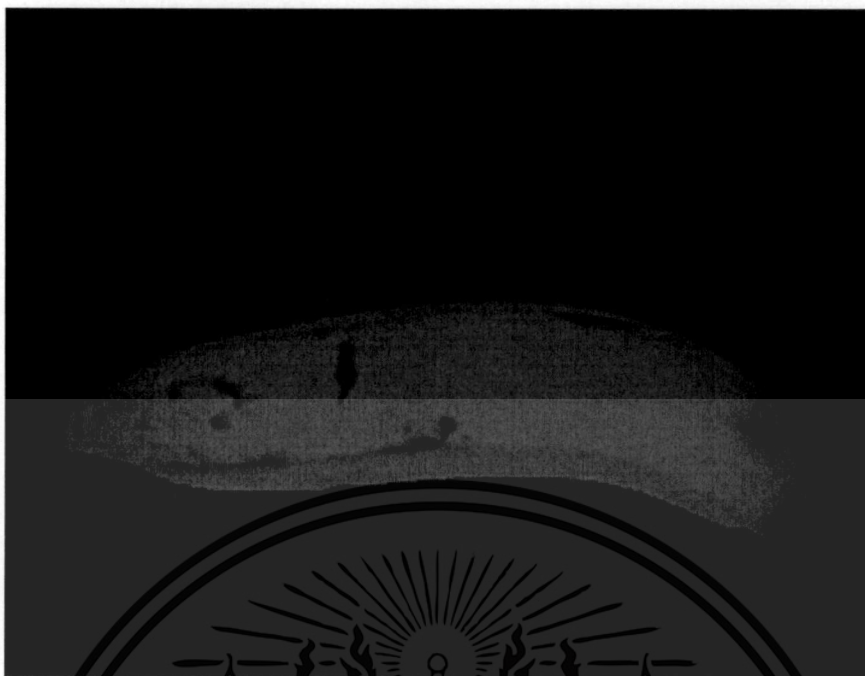


รูปที่ 3.11 การติดตั้งการทดลองตามโครงสร้างในรูปที่ 2.31 (ก)



รูปที่ 3.12 ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



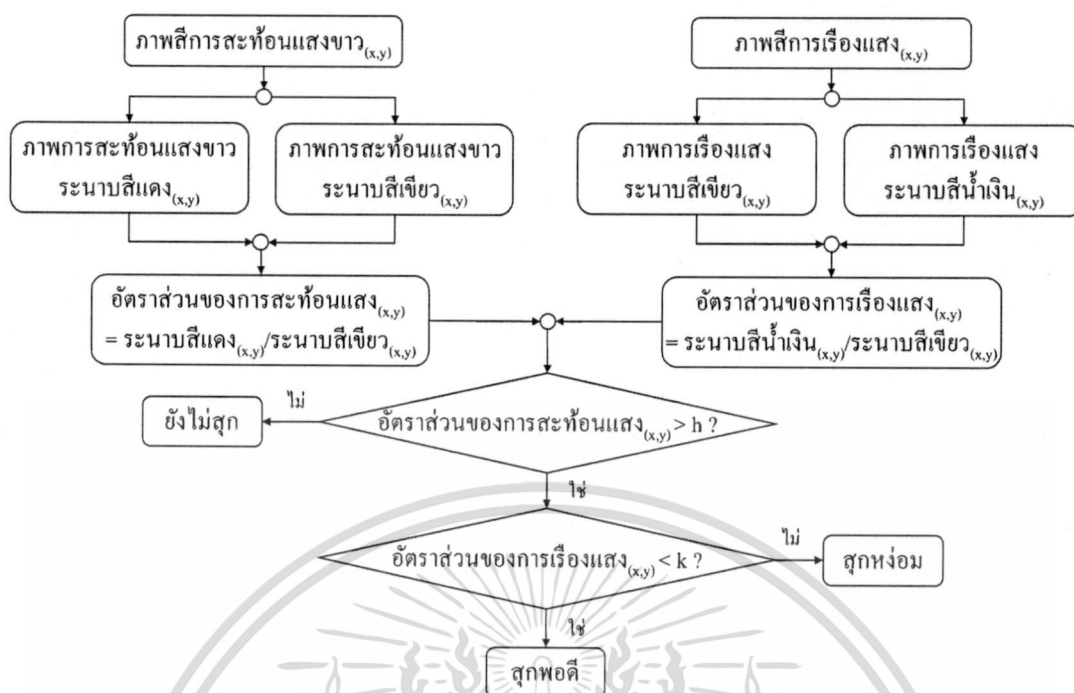
รูปที่ 3.13 ภาพสเปกตรัมของกล้วยภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

สำหรับโทรศัพท์มือถือ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อใช้ในการเก็บภาพสเปกตรัมช่วงกว้างทั้งสองภายใต้การฉายแสงสีขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ต ภาพสเปกตรัมแต่ละภาพจะถูกลดขนาดลงจาก 2592×1952 จุดภาพ เหลือเพียง 320×240 จุดภาพ ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ระดับความสุข ซึ่งตัวอย่างภาพสเปกตรัมภายใต้แสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

3.3 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์

ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Application) ในงานวิจัยได้ใช้โปรแกรม Eclipse SDK รุ่น 3.6.2 ในการพัฒนาภาษา Java ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อใช้สำหรับเก็บภาพสเปกตรัมช่วงกว้างทั้งสองภายใต้การฉายแสงสีขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยโปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นมีขนาดเพียง 26 กิโลไบต์ ภายหลังจากที่เก็บภาพสเปกตรัมทั้งสองเรียบร้อยแล้วโปรแกรมประยุกต์จะทำการดึงภาพที่ถูกบันทึกไว้เอามาประมวลผลเพื่อหาระดับความสุขของกล้วยแต่ละจุดภาพ x, y หรือ $RL(x, y)$ ตามขั้นตอนในแผนผังการทำงานที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.14 โดยจุดภาพแต่ละจุดของผลกล้วยจะถูกบ่งชี้ว่าอยู่ในระดับที่ยังไม่สุก สุกพอดี หรือสุกห่อหมแล้ว ในการประมวลผลภาพสเปกตรัมนี้ ภาพแต่ละภาพจะถูกลดขนาดลงจาก 2592×1952 จุดภาพ ให้เหลือเพียง 320×240 จุดภาพ ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ระดับความสุขของกล้วย โดยโปรแกรมตรวจวัดระดับความสุขกล้วยที่พัฒนาขึ้นมีโลโก้ดังรูปที่ 3.15 และได้ถูกติดตั้งเอาไว้ในโทรศัพท์มือถือฉลาดดังที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมประยุกต์



รูปที่ 3.15 โลโก้ของโปรแกรมประยุกต์สำหรับตรวจวัดระดับความสุกกล้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 โปรแกรมตรวจวัดระดับความสุกกล้วยบนโทรศัพท์มือถือตลาดที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 ภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสง

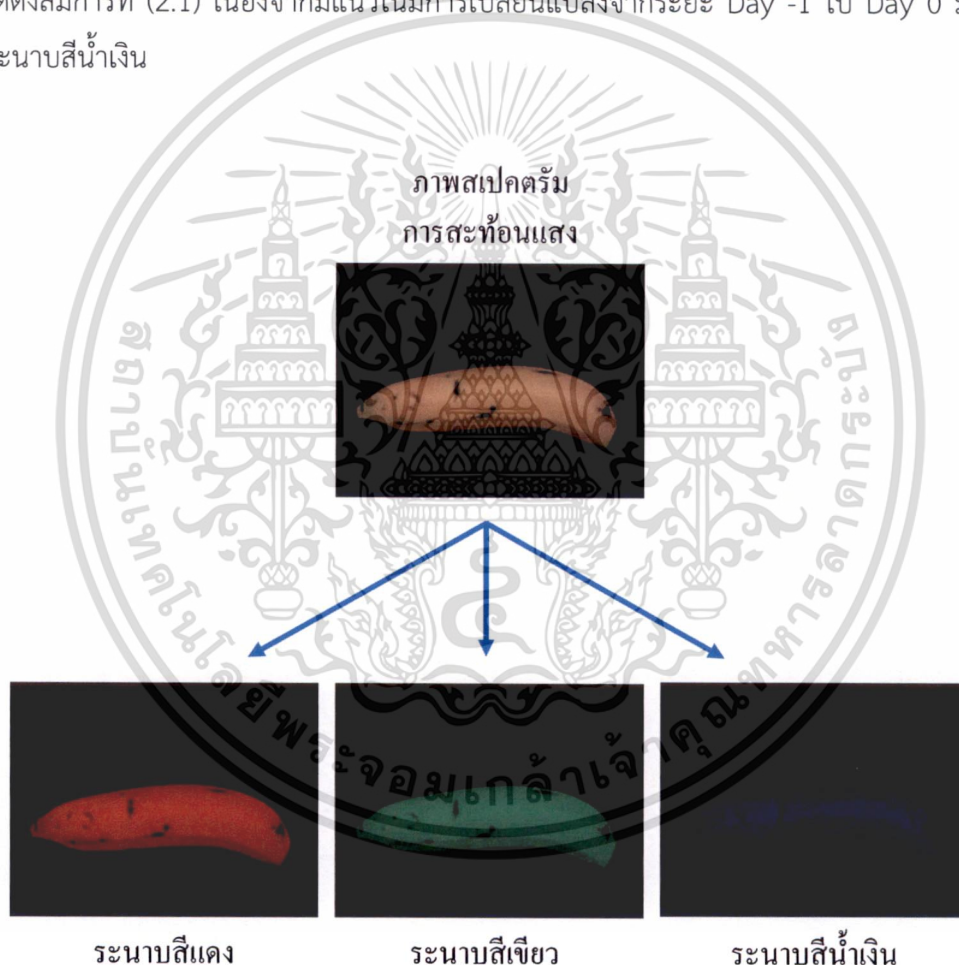
จากตัวอย่างกล้วยทั้งหมด 10 ผล จะถูกเก็บภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาวตั้งแต่วัยที่ยังไม่สุกไปจนถึงระยะที่เข้าสู่การสุกหอม ซึ่งใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 9 วัน แต่เนื่องจากกล้วยแต่ละผลมีระดับความสุกในแต่ละวันไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้วันที่กล้วยอยู่ในระยะที่สุกพอดีเป็น “Day 0” สำหรับกล้วยที่อยู่ในระยะยังไม่สุกถูกกำหนดให้เป็นวันที่มีเครื่องหมายลบ (-) และในทางกลับกันเมื่อกล้วยเริ่มเข้าสู่ระยะสุกหอมได้ถูกกำหนดให้เป็นวันที่มีเครื่องหมายบวก (+) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงของกล้วยตั้งแต่วัยที่ยังไม่สุกจนถึงสุกหอมภายใต้แสงขาว

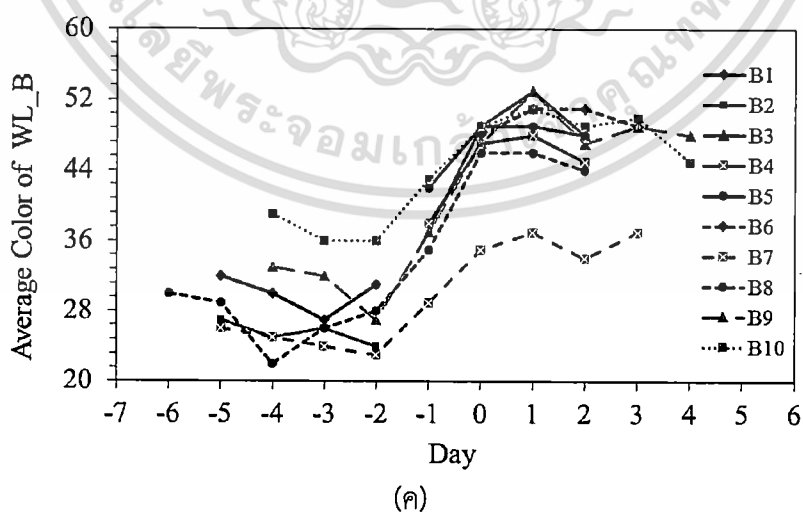
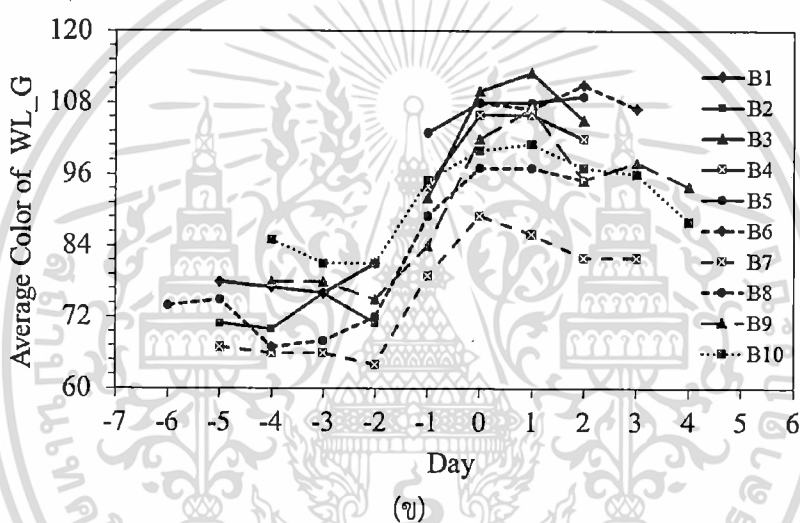
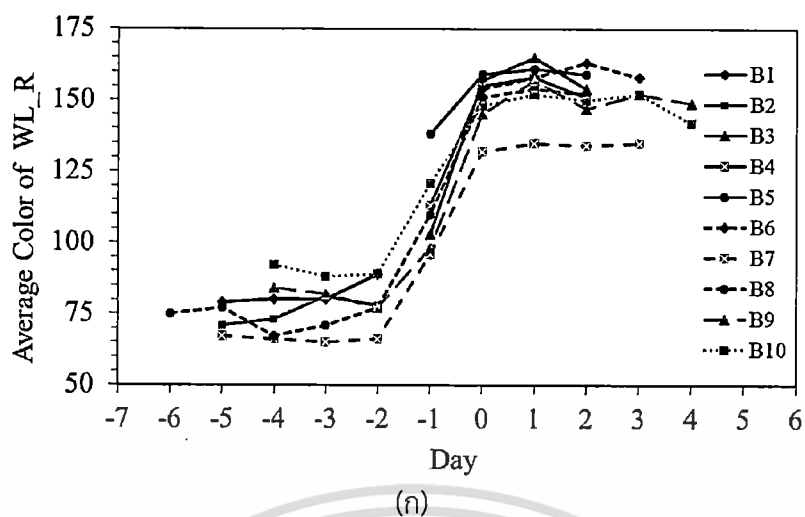
ภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงนี้จะถูกนำมาแยกองค์ประกอบของระนาบสีที่เป็นสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินออกมา ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะพบว่าภาพของกล้วยในระยะของสีแดงและสีเขียวมีความเข้มมากกว่าของระนาบสีน้ำเงิน เนื่องจากผลไม้สีเขียวเช่น กล้วยและมะม่วง จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเริ่มสุกซึ่งลักษณะสีที่เป็นองค์ประกอบอย่างเด่นชัดคือระนาบของสีแดงและเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเขียว เมื่อนำภาพของระนาบสีแต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยจะพบว่ากล้วยแต่ละผลมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในระนาบทั้ง 3 ตลอดระยะเวลาที่ทำการตรวจสอบดังรูปที่ 4.3 (ก)-(ค) ซึ่งจากรูปจะพบว่าค่าเฉลี่ยของระนาบสีแดงมีการเปลี่ยนแปลงจากระยะที่ยังไม่สุก (Day -1) ไปเป็นระยะที่สุก (Day 0) อย่างชัดเจนและมากกว่าของระนาบสีเขียวและสีน้ำเงิน โดยการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีสำหรับการบ่งชี้ระดับความสุกของกล้วยจากระนาบของสีแดง แต่อย่างไรก็ตามการประมวลผลโดยใช้เพียงระนาบสีของสีใดสีหนึ่งจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากความแปรปรวนของความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง และการตอบสนองของตัวรับภาพของกล้องโทรศัพท์มือถือได้ ดังนั้นระนาบสีเขียวจึงเป็นอีกระนาบสีหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาพร้อมกับระนาบสีแดงได้ดังสมการที่ (2.1) เนื่องจากมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากระยะ Day -1 ไป Day 0 มากกว่าของระนาบสีน้ำเงิน



รูปที่ 4.2 การแยกองค์ประกอบของระนาบสีออกจากภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

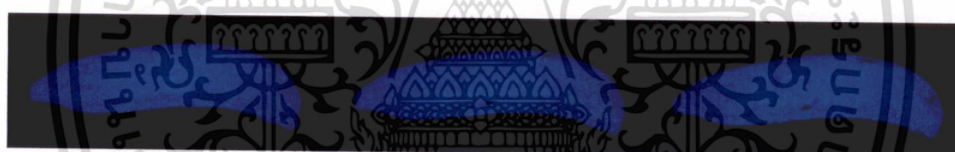


รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยสีของภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงของระนาบ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ภาพสเปกตรัมการเรืองแสง

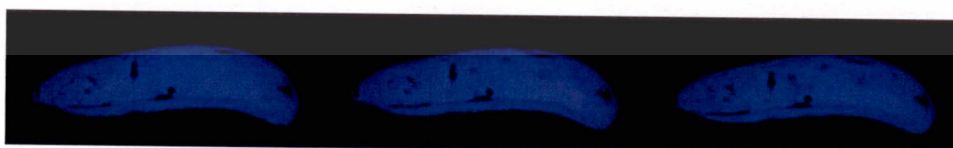
เช่นเดียวกับภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสง กล้วยจะถูกกำหนดให้วันที่กล้วยอยู่ในระยะที่สุกพอดีเป็น “Day 0” สำหรับกล้วยที่อยู่ในระยะยังไม่สุกถูกกำหนดให้เป็นวันที่มีเครื่องหมายลบ (-) และในทางกลับกันเมื่อกล้วยเริ่มเข้าสู่ระยะสุกห่อมได้ถูกกำหนดให้เป็นวันที่มีเครื่องหมายบวก (+) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งภาพสเปกตรัมการเรืองแสงนี้จะถูกนำมาแยกองค์ประกอบของระนาบสีที่เป็นสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินออกมา ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ซึ่งจากรูปจะพบว่าภาพของกล้วยในระยะของสีเขียวและสีน้ำเงินมีความเข้มมากกว่าของระนาบสีแดง เนื่องจากสีเขียวและสีน้ำเงินคือสีที่เป็นองค์ประกอบหลักของภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วย เมื่อนำภาพของระนาบสีแต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยจะพบว่ากล้วยแต่ละผลมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในระยะทั้ง 3 ตลอดระยะเวลาที่ทำการตรวจสอบดังรูปที่ 4.6 (ก)-(ค) แต่จากการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสีทั้ง 3 นี้สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าไม่สามารถนำมาใช้ในการจำแนกกล้วยในระดับที่ยังไม่สุก (Day -1) ออกจากในระดับที่สุก (Day 0) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำสีที่เป็นองค์ประกอบหลักของภาพสเปกตรัมการเรืองแสงคือระนาบสีเขียวและสีน้ำเงินมาพิจารณาร่วมกันดังสมการที่ (2.2)



ยังไม่สุก (Day -4)



สุกพอดี (Day 0)

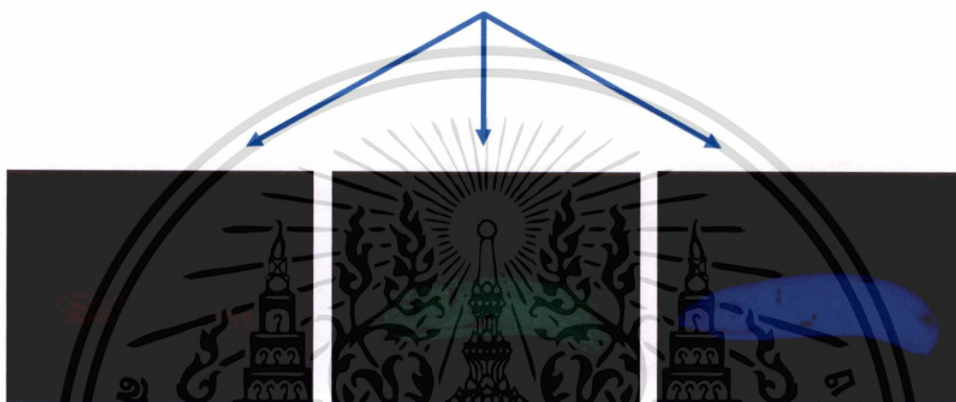
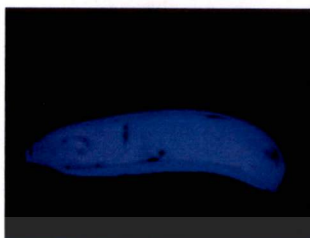


สุกห่อม (Day 4)

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยตั้งแต่ระยะที่ยังไม่สุกจนถึงสุกห่อมเมื่อถูกกระตุ้นภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพสเปกตรัม
การเรืองแสง



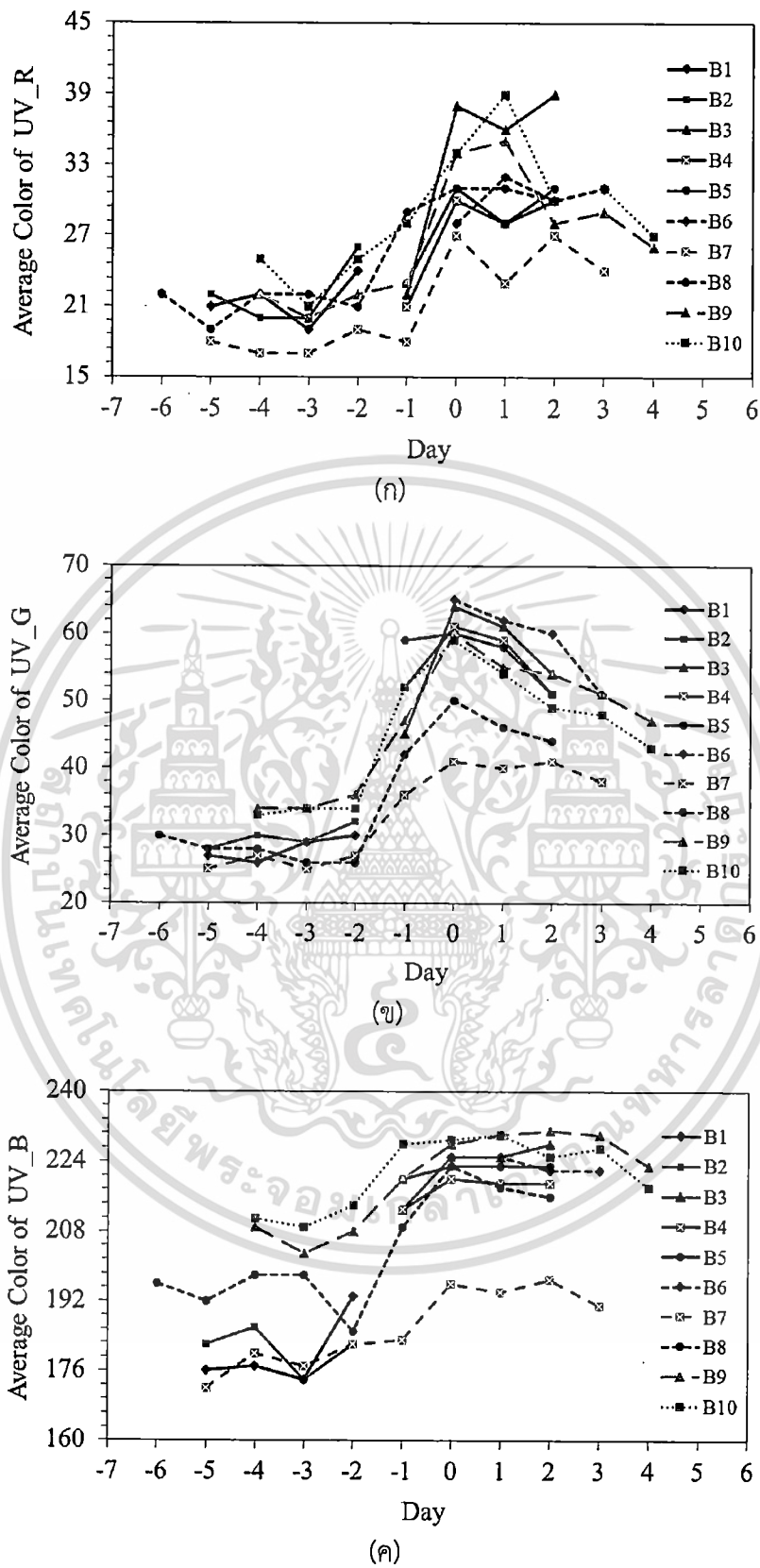
ระนาบสีแดง

ระนาบสีเขียว

ระนาบสีน้ำเงิน

รูปที่ 4.5 การแยกองค์ประกอบของระนาบสีออกจากภาพสเปกตรัมการเรืองแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



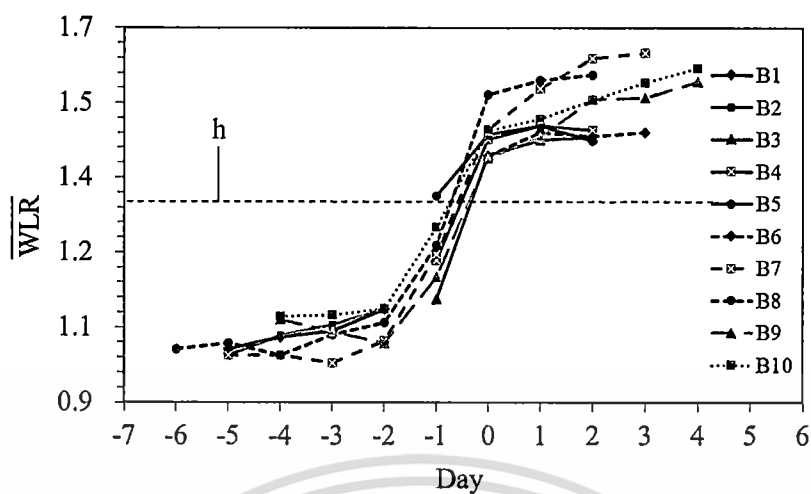
รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสีของภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของระนาบ (ก) สีแดง (ข) สีเขียว และ (ค) สีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

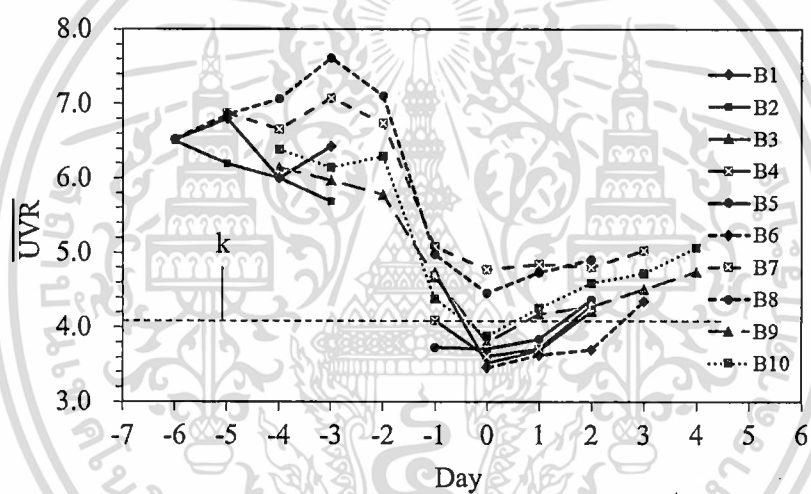
4.3 การวิเคราะห์ค่าขีดเริ่มต้น

เมื่อภาพสเปกตรัมช่วงกว้างภายใต้แหล่งกำเนิดแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตของกล้วยทั้งหมด 10 ผลที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ถูกถ่ายและบันทึกเก็บไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว (ตัวอย่างภาพสเปกตรัมทั้งสองของกล้วยแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13) ภาพทั้งหมดจะถูกนำมาคำนวณหา $WLR(x,y)$ และ $UVR(x,y)$ โดยใช้สมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งในรูปที่ 4.7 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\overline{WLR}$ ที่ได้จากการวัดและวันใดๆ ของการสุกของกล้วย ในช่วงที่กล้วยยังไม่สุกจาก Day -6 ถึง Day -2 $\overline{WLR}$ มีค่าประมาณ 1.1 ± 0.06 เมื่อกล้วยเริ่มต้นเข้าสู่ระยะสุกจาก Day -2 ถึง Day 0 ค่า $\overline{WLR}$ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงประมาณ 1.5 ± 0.13 และคงอยู่ในช่วงนี้จนกระทั่งอยู่ในระยะสุกห่อม จากผลการทดลองกับกล้วยทั้ง 10 ผลนี้ $\overline{WLR}_1$ และ $\overline{WLR}_0$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.20 และ 1.50 ตามลำดับ ถูกนำมาคำนวณหา k โดยใช้สมการ (2.4) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.35

รูปที่ 4.7 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\overline{UVR}$ ที่ได้จากการวัดและวันใดๆ ของการสุกของกล้วยซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ในกรณีนี้ในระยะที่กล้วยยังไม่สุกระหว่าง Day -6 ถึง Day -2 ค่า $\overline{UVR}$ จากการวัดอยู่ในช่วง 6.0-8.0 เมื่อวันผ่านไปจาก Day -2 ถึง Day 0 ค่า $\overline{UVR}$ จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงประมาณ 3.5-5.0 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกล้วยเข้าสู่การสุกห่อม จากการทดลองนี้พบว่าค่า $\overline{UVR}_1$ และ $\overline{UVR}_0$ มีค่าเท่ากับ 4.40 และ 3.90 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้สมการ (2.5) ทำให้ได้ค่าขีดเริ่มต้น k เท่ากับ 4.15

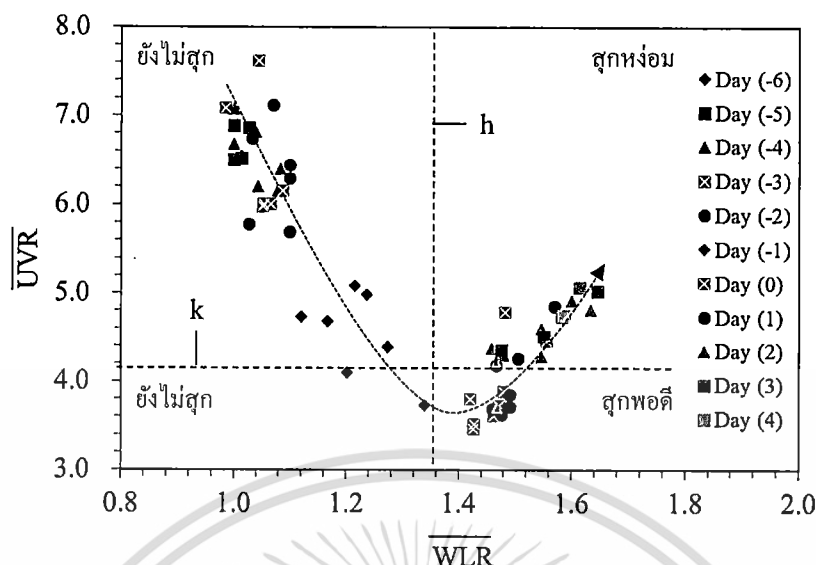


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า (ก) $\overline{WLR}$ และ (ข) $\overline{UVR}$ เมื่อกลั้วผ่านจากระยะที่ยังไม่
 สุกจนถึงระยะสุกหอม



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{WLR}$ และ $\overline{UVR}$ ของกล้วยในช่วงเวลาต่างๆ ที่เก็บไว้

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 พบว่ากล้วยที่อยู่ระหว่าง Day -6 ถึง Day -1 ยังอยู่ในช่วงที่ยังไม่สุก ซึ่งค่าของ $\overline{WLR}$ จะมีทิศทางที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ $\overline{UVR}$ จะมีทิศทางที่ลดลง เมื่อกล้วยเข้าสู่วันที่ Day 0 และ Day 1 กล้วยจะอยู่ในช่วงที่กำลังสุกพอดี หลังจากนั้นในวันที่ Day 2 ถึง Day 4 กล้วยจะอยู่ในระยะที่สุกห่อหมแล้ว โดยในระยะที่กล้วยอยู่ในช่วงสุกและสุกห่อหมทิศทางของการเพิ่มขึ้นของค่า $\overline{WLR}$ จะเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับช่วงที่ยังไม่สุก แต่ทิศทางของค่า $\overline{UVR}$ มีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการสะท้อนแสงสีเหลืองของกล้วยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงจากระยะที่ยังไม่สุกไปอยู่ในระยะที่สุกแล้ว และยังคงเป็นสีเหลืองหรือมีการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างช้าๆ ไม่ชัดเจนจนถึงในระยะที่สุกห่อหม ซึ่งเป็นผลให้การนำภาพสเปกตรัมการสะท้อนแสงเพียงอย่างเดียวมาจำแนกกล้วยที่อยู่ระหว่างสุกพอดีกับสุกห่อหมนั้นเป็นไปได้ยากลำบาก และความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 นี้ ยังสอดคล้องกับการเรืองแสงในช่วงสีน้ำเงิน-เขียวของกล้วยเช่นเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากระยะที่ยังไม่สุกจนถึงระยะที่สุกพอดีและการเปลี่ยนแปลงจากระยะที่สุกพอดีไปจนถึงในระยะที่สุกห่อหมที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการนำภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยมาประยุกต์ใช้จะไม่สามารถนำมาจำแนกระหว่างผลที่ยังไม่สุกกับสุกห่อหมได้ แต่จะสามารถนำมาใช้เพื่อจำแนกระหว่างสุกพอดีกับสุกห่อหมได้เป็นอย่างดี

4.4 การบ่งชี้ความสุกกล้วยแบบ 2 มิติ

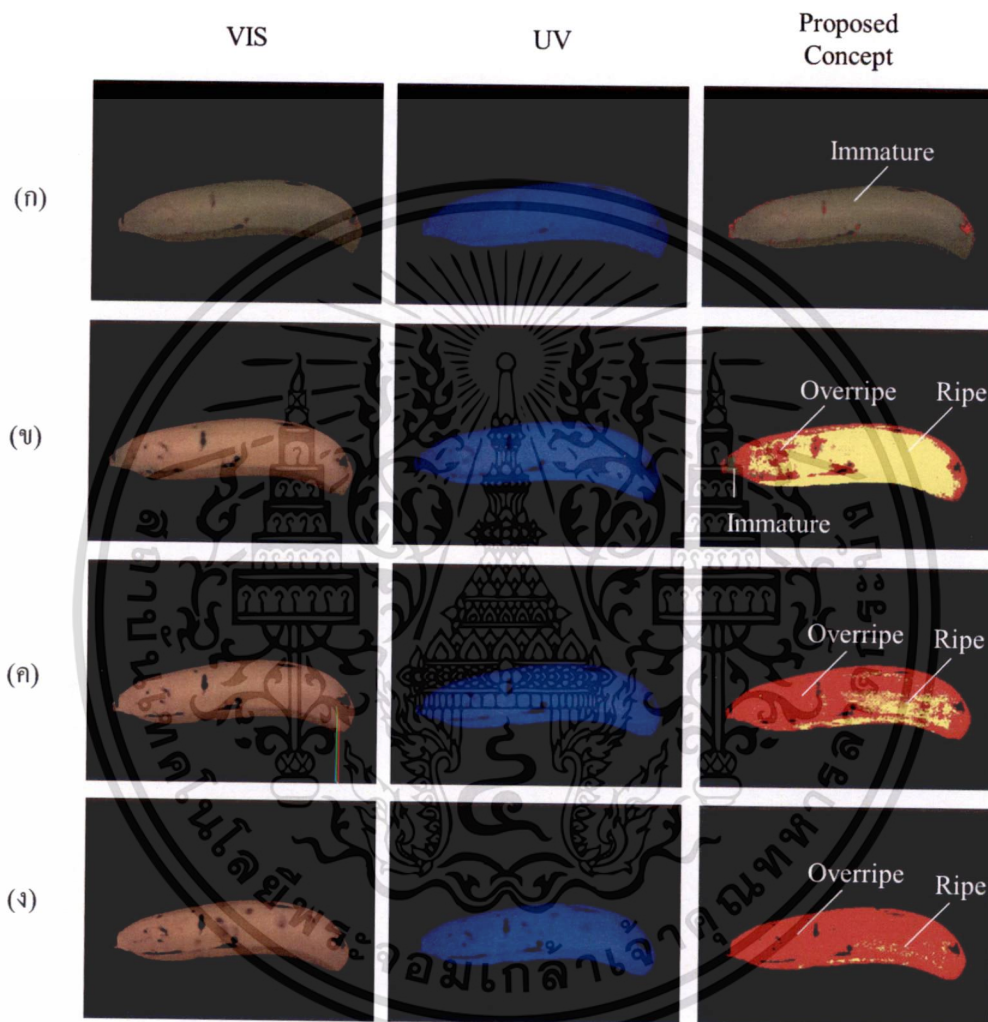
จากการเก็บภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยทั้งหมด 10 ผลภายในเวลา 9 วันทำให้ได้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกล้วยจากสีเขียวไปเป็นสีเหลืองภายใต้การฉายแสงขาวเมื่อกล้วยเจริญเติบโตจากระยะที่ยังไม่สุกไปจนถึงระยะที่สุกห่อหม ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 คอลัมน์ซ้าย นอกจากนี้เมื่อกล้วยผ่านจากระยะที่สุกไปแล้วจะปรากฏจุดสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่ากล้วยได้เข้าสู่ระยะสุกห่อหมแล้ว แต่อย่างไรก็ตามในระยะที่สุกห่อหมนี้กล้วยยังคงเป็นสีเหลืองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนในระยะที่สุกพอดี จากผลลัพธ์นี้ แสดงว่าภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยภายใต้การฉายแสงขาวสามารถใช้ได้แค่เพียงคัดแยกระหว่างกล้วยที่ยังไม่สุกและสุกพอดีเท่านั้นและยังคงไม่สามารถระบุได้ว่าบริเวณไหนของผลกล้วยที่อยู่ในระยะยังไม่สุก สุกพอดี หรือสุกห่อหมแล้ว

สำหรับภาพสเปกตรัมการเรืองแสงสีน้ำเงิน-เขียวของกล้วยภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 คอลัมน์กลาง ซึ่งในรูปที่ 4.9 (ก) ภาพสเปกตรัมการเรืองแสงมีความเข้มกว่า รูปที่ 4.9 (ข) เล็กน้อยเมื่อกล้วยเปลี่ยนจากระยะยังไม่สุกไปเป็นระยะที่สุกพอดี เมื่อกล้วยเริ่มสุกห่อหมดังรูปที่ 4.9 (ค) และ (ง) ปริมาณการเรืองแสงสีน้ำเงิน-เขียวจะลดลง จากผลที่ได้นี้แสดงเป็นนัยว่าการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมการเรืองแสงของกล้วยเพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุได้ว่ากล้วยอยู่ในระยะที่ยังไม่สุกหรือสุกห่อหมแล้ว นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการเรืองแสงในแต่ละช่วงของการเจริญเติบโตยังมีความยากต่อการสังเกต

เมื่อทำการผสมผสานการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยภายใต้การฉายแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตทั้งสองเข้าด้วยกัน ระดับความสุกของกล้วยในสองมิติสามารถถูกระบุออกเป็นระยะยังไม่สุก สุกพอดี และสุกห่อหมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 คอลัมน์ขวา เพื่อให้สามารถสังเกตระดับความสุกทั้ง 3 ระดับนี้ในแต่ละบริเวณของกล้วยได้อย่างชัดเจน จึงได้มีการเติมสีลงไปบนรูปภาพต้นฉบับของกล้วยที่ทำการเก็บได้ภายใต้การฉายแสงขาว โดยการคำนวณหา $RL(x,y)$ ในสมการ (2.3) เพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการเติมสี โดยจุดภาพ x,y ที่สอดคล้องกับระยะที่ยังไม่สุกจะไม่มีการเติมสีใดๆ ลงในภาพต้นฉบับ ส่วนในกรณีที่จุดภาพ x,y สอดคล้องกับระยะที่สุกพอดีจะถูกแทนที่ด้วยสีเหลือง และในกรณีที่จุดภาพ x,y สอดคล้องกับระยะที่สุกห่อหมจะถูกแทนที่ด้วยสีแดง จากรูปที่ 4.9 (ก) คอลัมน์ขวา พื้นที่ทั้งหมดประมาณ 99% ของกล้วยที่เก็บไว้ใน Day -2 อยู่ในระยะที่ยังไม่สุก มีเพียง 1% ของพื้นที่ทั้งหมดอยู่ในระยะที่สุกห่อหม ซึ่งในความเป็นจริงแล้วพื้นที่เล็กๆนี้คือรอยขีดและจะกลายเป็นจุดสีน้ำตาลให้เห็นในภายหลัง ในรูปที่ 4.9 (ข) คอลัมน์ขวา แสดงการเติมสีบนภาพกล้วยของ Day 0 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนแล้วว่า มีเพียง 4% ของพื้นที่เท่านั้นที่ยังอยู่ในระยะที่ยังไม่สุก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 (ก) คอลัมน์ขวา บริเวณที่สุกแล้วได้ขยายเพิ่มขึ้นและครอบคลุมถึง 71% ของพื้นที่ทั้งหมด และมีบางส่วนประมาณ 25% เข้าสู่ในระยะที่สุกห่อหมแล้ว เมื่อกล้วยเติบโตเข้าสู่ Day 2 กล้วยทั้งผลสามารถแบ่งออกได้เพียงระยะที่สุกและสุกห่อหมแล้วเท่านั้น ดังแสดงในรูป 4.9 (ค) คอลัมน์ขวา ซึ่งในวันนี้บริเวณที่สุกแล้วได้ลดลงจากเดิมใน Day 0 เหลือเพียง 21% ในขณะที่พื้นที่ของระยะสุกห่อหมได้เพิ่มขยายขึ้นเป็น 79% ของพื้นที่ภาพกล้วยทั้งหมด ใน Day 4 บริเวณที่สุกพอดีจะลดลงอย่างมากและคงเหลือเพียง 4% ของพื้นที่ทั้งหมดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) คอลัมน์ขวา จากผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่อสามารถหาขนาดของบริเวณที่ยังไม่สุก สุกพอดี และสุกห่อหมของกล้วยได้ การทำนายลักษณะการเจริญเติบโตของผลกล้วยก็จะสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการวิเคราะห์ผลเพื่อการคัดแยกระดับความสุกแบบสองมิตินี้โปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์มือถือใช้เวลาประมาณ 4 วินาทีโดยไม่รวมเวลาในการถ่ายภาพสเปกตรัม

บริเวณที่ยังไม่สุก สุกพอดี และสุกห่อของกล้วยได้ การทำนายลักษณะการเจริญเติบโตของผลกล้วย ก็จะสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการวิเคราะห์ผลเพื่อการคัดแยกระดับความสุกแบบสองมิติ นี้โปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์มือถือใช้เวลาประมาณ 4 วินาทีโดยไม่รวมเวลาในการถ่ายภาพสเปกตรัม



รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์ของการบ่งชี้ระดับความสุกกล้วยแบบ 2 มิติ ในระยะ (ก) ยังไม่สุก วันที่ Day -2 (ข) สุกพอดี วันที่ Day 0 (ค) สุกห่อ วันที่ Day 2 และ (ง) สุกห่อ วันที่ Day 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการและระบบสำหรับใช้ในการประเมินความสุขของกล้วย พบว่าได้มีการเสนอวิธีการต่างๆ ขึ้นมาอย่างมากมายซึ่งมีทั้งแบบที่เป็นการทำลายและไม่เป็นการทำลายผลกล้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และนอกจากนี้ได้พบว่าการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงได้ถูกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดระดับความสุกกล้วยแบบไม่ทำลายกันอย่างแพร่หลายทั้งในแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ อย่างไรก็ตามพบว่าการประมวลผลภาพสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะสีของกล้วยหรือการประมวลผลภาพสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการเปล่งแสงของกล้วยเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง ไม่สามารถระบุระดับความสุขของกล้วยได้ตลอดพื้นผิวที่กำลังตรวจสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบตรวจวัดระดับความสุกกล้วยใน 2 มิติแบบไม่ทำลายด้วยแสงประเด็นสำคัญของงานวิจัยได้นำเสนอเป็นครั้งแรกนี้อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยภายใต้แหล่งกำเนิดแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตไปพร้อมกันบนโทรศัพท์มือถือฉลาด โดยทำการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ทำงานบนอุปกรณ์พกพาฉลาดภายใต้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพสเปกตรัมช่วงกว้างของกล้วยจากการหาอัตราส่วนระหว่างสีแดงกับสีเขียวของภาพภายใต้แสงขาวรวมกับการหาอัตราส่วนระหว่างสีน้ำเงินกับสีเขียวของภาพภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ระบบที่สร้างขึ้นได้ถูกแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการตรวจสอบระดับความสุกกล้วยในระยะที่ยังไม่สุก สุกพอดี และสุกห่อหมได้ และยังสามารถทำการระบุพื้นที่ในแต่ละบริเวณต่างๆ ของกล้วยตามระยะของความสุกได้ด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถทำการตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วและง่ายต่อการพัฒนาต่อยอดในอนาคตได้อีกด้วยเพื่อศึกษาวิธีการและระบบสำหรับใช้ในการประเมินคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร ภายหลังการเก็บเกี่ยว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของต้นแบบจะขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอและปริมาณของแสงที่ใช้ส่องสว่างทั้งแสงสีขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ตกกระทบลงบนผลกล้วย และอีกส่วนหนึ่งมีผลมาจากการตอบสนองต่อสีของตัวรับสัญญาณภาพบนโทรศัพท์มือถือ ดังนั้นในการควบคุมความแปรปรวนและความสม่ำเสมอของแหล่งกำเนิดแสงพร้อมกับการสอบเทียบสีให้กับตัวรับสัญญาณภาพของโทรศัพท์มือถือจะช่วยให้ต้นแบบมีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มมากขึ้นและนำไปสู่การพัฒนาเป็นต้นแบบในระดับภาคสนามต่อไป

จากหลักการและระบบตรวจวัดความสุกกล้วยที่ได้นำเสนอเอาไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดระดับความสุขของกล้วยสายพันธุ์อื่นๆ ได้ โดยการปรับค่าขีดเริ่มต้น h และ k ให้เหมาะสมกับกล้วยสายพันธุ์นั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามควรทำการศึกษาและคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยควบคู่ไปด้วย เนื่องจากผิวของเปลือกกล้วยอาจมีการตกกระหรือมีจุดต่างดำเกิดขึ้นตามเอกลักษณ์ของกล้วยแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งอาจจะบดบังสีที่แท้จริงของเปลือกกล้วยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้โทรศัพท์มือถือฉลาดที่ใช้สามารถปรับเปลี่ยนเป็นรุ่นที่มีคุณสมบัติดีกว่านี้ได้ เพื่อเป็นการลดเวลาในการประมวลผลและการแสดงผลออกมาทางหน้าจอที่คมชัดมากขึ้นกว่าเดิม หรือหากต้องการให้มีหน้าจอการแสดงผลที่ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์พกพาฉลาดจำพวกแท็บเล็ต (Tablet) แทนได้

การตรวจสอบระดับความสุกของผลไม้ภายใต้การวิเคราะห์สเปกตรัมการสะท้อนแสงขาวและการเรืองแสงในช่วงของสีน้ำเงิน-เขียวนี้เหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับผลไม้ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวไปเป็นสีเหลืองในขณะที่มีการสุกเกิดขึ้น อย่างเช่น มะม่วง และมะละกอ เป็นต้น เนื่องจากการหลักการทำงานของระบบตรวจสอบนี้มีหัวใจสำคัญอยู่ที่การตรวจสอบการลดลงของสีเขียวหรือปริมาณคลอโรฟิลล์ และการเพิ่มขึ้นของสีเหลืองหรือการแสดงออกของสีจากสารประกอบจำพวกคาโรทีนอยด์

ปัจจัยทางด้านปริมาณแสง อุณหภูมิ องค์ประกอบของอากาศ และระยะเวลาในการเก็บรักษากล้วยเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการสุกและสีของเปลือกกล้วย ดังนั้นในการบ่งชี้ระดับความสุกของกล้วยนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ด้วย

5.3 งานในอนาคต

สำหรับในอนาคตนั้น ระบบตรวจวัดความสุกกล้วยที่ได้นำเสนอเอาไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกครอบปิดด้วยกล่องทึบแสง โดยภายในกล่องจะถูกติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตเอาไว้เพื่อควบคุมความแปรปรวนและความสม่ำเสมอของแสงที่ฉายลงบนวัตถุภายใต้การตรวจสอบ พร้อมทั้งลดปัญหาแสงรบกวนจากภายนอกได้ด้วยอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ระบบจะถูกเพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถตรวจวัดกล้วยได้หลายผลพร้อมๆ กัน และจะขยายผลไปสู่การศึกษาและวิจัยผลไม้สีเขียวชนิดอื่นๆ เป็นลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Food And Agricultural Commodities Production, “Agricultural production,” [Online]. Available: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, 2011.
- [2] Ford’s Produce Co., “Banana color guide,” [Online]. Available: <http://www.fordsproduce.com/Forms/Fords-Produce-Banana-Color-Guide.pdf>, 2013.
- [3] mobiThinking, “Global mobile statistics,” [Online]. Available: <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats>, 2011.
- [4] สังคม เตชะวงศ์เสถียร, “สรีรวิทยาการสุกของผล,” มหาวิทยาลัยขอนแก่น, [Online]. Available: http://ag.kku.ac.th/suntec/113401/HortPhysiol-Chapter%204_TXT.pdf, 2013.
- [5] Biotec, “กล้วย เรื่องราวของกล้วยที่ไม่กล้วยๆ,” [Online]. Available: http://www.biotec.or.th/sirs/index.php?option=com_content&view=article&id=72:2010-01-14-05-14-20&catid=38:2009-08-27-09-28-57&Itemid=77, 2013.
- [6] Kajuna S.T.A.R., Bilanski W.K., Mittal G.S., “Textural changes of banana and plantain pulp during ripening,” *J. Sci. Food Agric.* 75 (1997), pp. 244–250.
- [7] Chen C.R., and Ramaswamy H.S., “Color and texture change kinetics in ripening bananas,” *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 35 (2002), pp. 415–419.
- [8] Sirisomboon P., Tanaka M., and Kojima T., “Evaluation of tomato textural mechanical properties,” *J. Food Eng.* 111 (2012), pp. 618–624.
- [9] Soltani M., Alimardani R., and Omid M., “Comparison of some chromatic, mechanical and chemical properties of banana fruit at different stages of ripeness,” *Mod. Appl. Sci.* 4 (2010), pp. 34–41.
- [10] Boudhriouaa N., Giampaolib P., Bonazzi C., “Changes in aromatic components of banana during ripening and air-drying,” *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 36 (2003), pp. 633–642.
- [11] Xuejun L., Shinjiro S., Akira N., Yasutaka K., Reinosuke N., and Akitsugu I., “Characterization of ethylene biosynthesis associated with ripening in banana fruit,” *Plant Physiol.* 121 (1999), pp. 1257–1265.
- [12] Esser B., Schnorr J.M., and Swager T.M., “Selective Detection of Ethylene Gas Using Carbon Nanotube-based Devices: Utility in Determination of Fruit Ripeness,” *Angew. Chem. Int. Ed.* 51 (2012), pp. 5752–5756.
- [13] Llobet E., Hines E.L., Gardner J.W., and Franco S., “Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose,” *Meas. Sci. Technol.* 10 (1999), pp. 538–548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Finney E.E., Ben-Gera I., and Massie D.R., "An objective evaluation of changes in firmness of ripening bananas using a sonic technique," *J. Food Sci.* 32 (1967), pp. 642-646.
- [15] Soltani M., Alimardani R., and Omid M., "Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system," *Aust. J. Crop Sci.* 4 (2010), pp. 443-447.
- [16] Raffo A., Gianferri R., Barbieri R., and Brosio E., "Ripening of banana fruit monitored by water relaxation and diffusion $^1\text{H-NMR}$ measurements," *Food Chem.* 89 (2005), pp. 149-158.
- [17] Nussinovitch A., Ward G., and Mey-Tal E., "Gloss of fruits and vegetables," *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 29 (1996), pp. 184-186.
- [18] Ward G., and Nussinovitch A., "Peel gloss as a potential indicator of banana ripeness," *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 29 (1996), pp. 289-294.
- [19] Li M., Slaughter D.C., and Thompson J.F., "Optical chlorophyll sensing system for banana ripening," *Postharvest Biol. Tec.* 12 (1997), pp. 273-283.
- [20] Zude M., "Non-destructive prediction of banana fruit quality using VIS/NIR spectroscopy," *Fruits* 58 (2003), pp. 135-142.
- [21] Rajkumar P., Wang N., Elmasry G., Raghavan G.S.V., and Gariepy Y., "Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging," *J. Food Eng.* 108 (2012), pp. 194-200.
- [22] Mendoza F., "Characterization of surface appearance and color in some fruits and vegetables by image analysis," Ph.D. Thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2005.
- [23] Ji W., Koutsidis G., Luo R., Hutchings J., Akhtar M., Megias F., and Butterworth M., "A digital imaging method for measuring banana ripeness," *Color Res. Appl.* 38 (2013), pp. 364-374.
- [24] Saad H., Ismaie A.P., Othman N., Jusoh M.H., Naim N.F., and Ahmad N.A., "Recognizing the ripeness of bananas using artificial neural network based on histogram approach," *Proc. IEEE-ICSIPA, Kuala Lumpur, Malaysia*, November 2009, pp. 536-541.
- [25] Google Play, "Apps," [Online]. Available: <https://play.google.com/store>, 2012.
- [26] Moser S., Müller T., Ebert M.O., Jockusch S., Turro N.J., and Kräutler B., "Blue luminescence of ripening bananas," *Angew. Chem. Int. Ed.* 47 (2008), pp. 8954-8957.
- [27] Intaravanne Y., Sumriddetchkajorn S., and Nukeaw J., "Cellphone-based two-dimensional spectral analysis for banana ripeness estimation," *Sensor. Actuat. B-Chem.* 168 (2012), pp. 390-394.

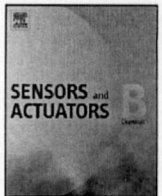
- [28] Department of Agricultural Extension, “กล้วยหอมทอง,” [Online]. Available: <http://www.doae.go.th/library/html/detail/banana/page62.html>, 2013.
- [29] Lumitron Lighting International Co., Ltd., “Fluorescent lamps,” [online]. Available: <http://www.lumitronlighting.com/lamp/PDF/Fluorescent%20lamps/TL-D%20Lifemax%20Super80.pdf>, 2013.
- [30] Labsphere, Inc., “Diffuse reflectance targets,” [Online]. Available: <http://www.labsphere.com/uploads/datasheets/PB-13025-000%20Rev00%20Targets.pdf>, 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Cell phone-based two-dimensional spectral analysis for banana ripeness estimation

Wuttana Intaravanne^{a,b}, Sarun Sumriddetchkajorn^{c,*}, Jiti Nukeaw^a

^a College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
^b Photonics Technology Laboratory, National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency, 2 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand
^c Intelligent Devices and Systems Research Unit, National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency, 2 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:
 received 13 January 2012
 received in revised form 5 April 2012
 accepted 10 April 2012
 available online 21 April 2012

Keywords:
 ripeness estimation
 non-destructive analysis
 spectral analysis
 banana
 image processing
 optical sensors
 mobile phone

ABSTRACT

It is known that when green fruits such as bananas and mangoes grow from the immature to the ripe stages, their color changes from green to yellow. However, once the green fruits are yellow, it is difficult to classify them into the ripe and the overripe stages. Here, we propose and experimentally demonstrate for the first time a two-dimensional banana ripeness level sensor by using a cell phone. Our key approach relies on simultaneous analysis of two broad-spectral images of the banana under white light and ultra-violet illuminations. Particularly, our selected color ratios from these two broad-spectral images are used for spatially and specifically classifying the whole banana into immature, ripe, and overripe zones. Experimental proof of concept using a smart mobile phone is highlighted, featuring fast response, portability, and ease of implementation.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

Introduction

For food and agricultural commodities production, banana is ranked one of the top twenty in the world trade with more than 97.4 million metric tons and a total international price of 7 billion dollars in 2009 [1]. Appropriate banana ripeness level is typically estimated by naked eyes for personal consumption and export. Several quantitative approaches were demonstrated including destructive analysis of mechanical hardness [2,3], total solid soluble content [4], ethylene content [5], and aromatic composition via gas chromatography [6].

To maintain the quality of bananas, non-destructive methods are highly desirable. This can be performed in a close chamber using an array of electronic odor sensors incorporated with complex neural network-based algorithm [7]. Acoustic [8] and capacitive [9] properties of the banana can also be used to evaluate the banana ripeness. However, a variation of banana shape and size has tremendous effect in the acoustic resonant frequency and electric permittivity. Nuclear magnetic resonance [10] and proton magnetic resonance [11] techniques were demonstrated for

measuring the sugar content with key concerns on cost and radiation leakage. Other promising approaches through gloss analysis [12] as well as two-wavelength [13] and visible/near infrared [14] spectral analysis were demonstrated. Because these techniques can evaluate the banana ripeness level in a very limited small area, a two-dimensional (2-D) spectral imaging-based technique can be employed as it has been recently used for identification of genuine credit cards [15,16] and Thai jasmine rice [17]. Previously, a hyperspectral-imaging concept [18], and a machine vision embedded with a color feature extraction algorithm [19] and artificial neural network [20] were proposed and demonstrated for classifying maturity levels of the banana. The rapid growth of today smart mobile phones [21] also stimulates mobile phone applications such as FruitChecker, Colorimeter, Catch Color, and Color Detector that can be used to roughly evaluate the quality of fruits under illumination of the ambient white light or a light emitting diode (LED)-based flash light embedded on the smart mobile phone [22]. As the chlorophyll in completely yellow banana is mostly degraded and the banana color is unchanged, these techniques cannot correctly estimate the banana ripeness level until undesired brown spots appear. In this scenario, the banana is already in the unwanted overripe stage. Although observation of the increase in blue luminescence from bananas under an ultraviolet light at either 350 or 366 nm wavelength can evaluate the banana ripeness level during

Corresponding author. Tel.: +66 2564 6900x2102; fax: +66 2564 6771.
 E-mail address: sarun.sumriddetchkajorn@nectec.or.th (S. Sumriddetchkajorn).

ripening [23], it fails in distinguishing bananas between immature and overripe stages. In addition, there is an introduction of using blue emission centered at 445 nm wavelength inherently provided by the organic LED-based touch screen on a smart mobile phone for exciting the Rhodamine 123 doped within a mesostructured silica sphere [24]. However, it cannot efficiently excite the chlorophyll in plants because the fluorescent catabolite of the chlorophyll has absorbance spectra near 358 nm [23]. As different areas of the whole banana are not in the same ripeness level at the same time, the above methods totally fail in dividing the whole banana into different ripeness zones as well. To clearly pinpoint the ripeness stages, this paper proposes and experimentally demonstrates for the first time a 2-D banana ripeness level indication concept. Our key idea is to simultaneously analyze two broad-spectral images under white light and ultraviolet illuminations. Particularly, specific color ratios from these two broad-spectral images are used for specifically classifying the whole banana into immature, ripe and overripe zones. In addition, we show how a smart mobile phone embedded with our proposed spectral analysis concept can be used as a banana ripeness sensor.

2. Proposed cell phone-based 2-D spectral analysis for banana ripeness estimation

Fig. 1 shows our proposed schematic structures of cell phone-based 2-D spectral analysis for banana ripeness level classification.

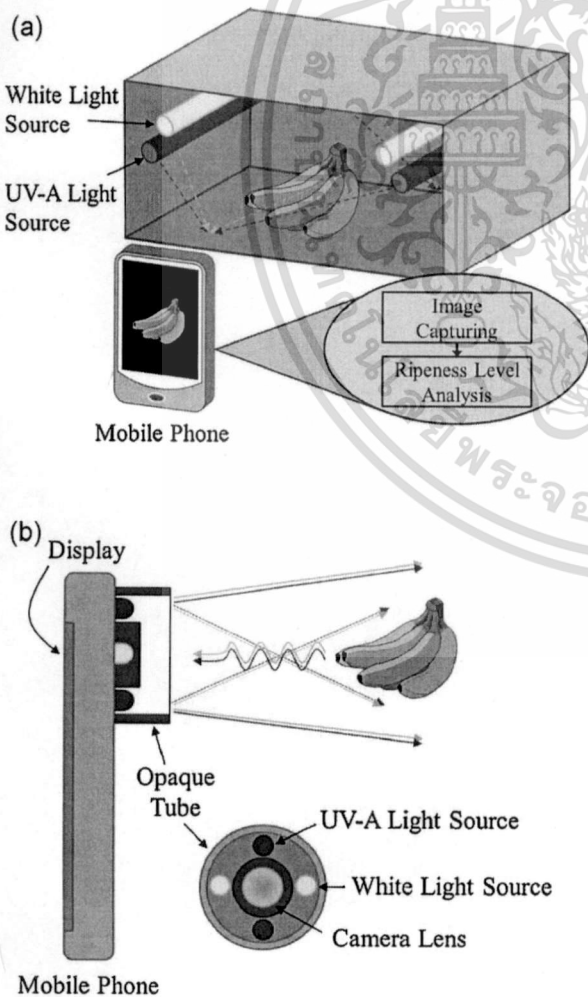


Fig. 1. Proposed cell phone-based banana ripeness level sensor structures: (a) a

In both stand-alone (Fig. 1(a)) and portable designs (Fig. 1(b)), they only consist of a smart mobile phone, white light sources, and ultraviolet light sources. The stand-alone version can be deployed in a super market and at the export sites. For the portable version, it is suitable for individual use and as a mobile inspecting tool for an officer at the warehouse. Our 2-D spectral analysis for estimating the banana ripeness level is based on the fact that the color of the banana changes from green to yellow during ripening due to the chlorophyll breakdown when observed under white light illumination. In addition, blue-green luminescent spectrum in a 400–500 nm wavelength band from the banana with an excitation at 350 nm wavelength trends to reduce when the banana goes from yellow to brown-yellow. From Fig. 1, when white light illuminates the banana under inspection, a broad spectral image of the banana is captured by a digital camera of the smart mobile phone. After that, a smart mobile phone records a blue-green fluorescent spectral image of the banana under the excitation of the ultraviolet light.

These two broad-spectral images under white light and ultraviolet light are automatically registered into red, green, and blue color planes. Since green fruit such as bananas and mangoes will change to yellow when ripening, the dominant color information contains in red and green image planes. In this case, the red and green color values of the image are used to calculate the white light ratio (WLR).

$$WLR(x, y) = \frac{R_{wl}(x, y)}{G_{wl}(x, y)} \quad (1)$$

Here, $R_{wl}(x, y)$ and $G_{wl}(x, y)$ are red and green color levels of the pixel (x, y) , respectively. Similarly, blue and green colors are dominant in the blue-green spectral image of the banana, the ultraviolet light ratio (UVR) at the pixel (x, y) of the image is calculated as:

$$UVR(x, y) = \frac{B_{uv}(x, y)}{G_{uv}(x, y)} \quad (2)$$

where $B_{uv}(x, y)$ and $G_{uv}(x, y)$ are blue and green color levels of the pixel (x, y) , respectively. To indicate the ripeness level of banana at the pixel (x, y) of the image "RL(x, y)", a two-level image thresholding algorithm is applied as follows:

$$RL(x, y) = \begin{cases} \text{Immature,} & WLR(x, y) \leq h \\ \text{Ripe,} & WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) < k \\ \text{Overripe,} & WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) \geq k \end{cases} \quad (3)$$

Here, the first threshold value (h) is used for spatially dividing the banana into the immature and ripe areas. It can be simply computed as:

$$h = \frac{\overline{WLR}_0 + \overline{WLR}_{-1}}{2} \quad (4)$$

where $\overline{WLR}$ is the average WLR of the whole banana image. Subscripts "0" and "-1" refer to bananas at the ripe stage and one day prior to the ripe stage, respectively. The second threshold value (k) is used for spatially distinguishing between the ripe and overripe zones of the banana. In this case, k can be calculated as:

$$k = \frac{\overline{UVR}_0 + \overline{UVR}_{-1}}{2} \quad (5)$$

Similarly, $\overline{UVR}_0$ and $\overline{UVR}_{-1}$ are average UVR values of the whole banana images taken at the ripe stage and one day before, respec-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

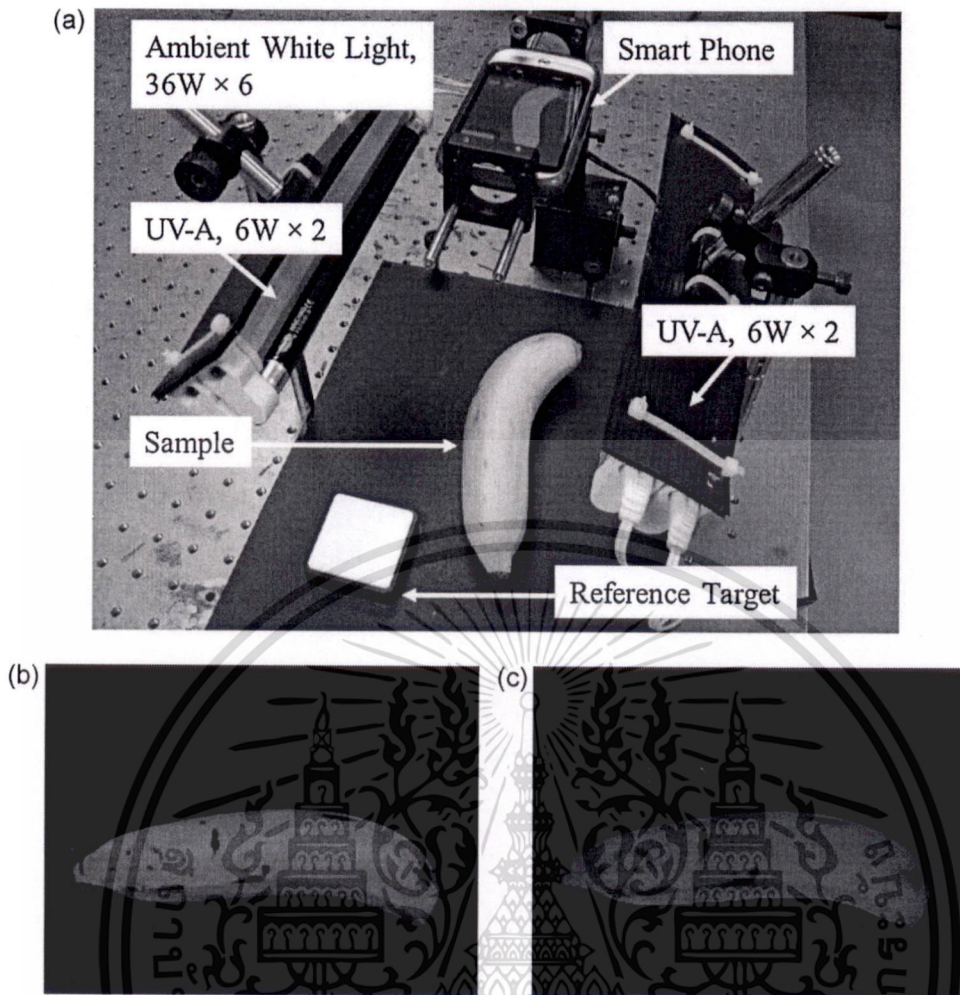


Fig. 2. (a) Experimental setup for proof of concept. Spectral images of the banana under (b) white light illumination and (c) ultraviolet illumination.

can be non-destructively classified into three different ripeness stages.

Experimental setup

Based on available components in our laboratory, we follow Fig. 1(a) and our experimental setup is shown in Fig. 2(a). Two specified 6-W UVA light sources in a T5 standard bracket are settled 10 cm from each side of the banana. Each UVA light source emits measured peak 365-nm wavelength light. For white light illumination, six of 36-W fluorescent lamps fixed at the ceiling above the experiment setup are employed. Our smart phone is situated at a distance of 20 cm above the banana. The smart phone is equipped with a 528-MHz processor, 384 MB of RAM, a 2592×1952 -pixel digital camera, and an Android 2.2 operating system. The banana is a Musa (AAA group “Kluai Hom Thong”). Ten immature bananas are randomly bought from a local market. The banana under ripeness evaluation is placed on top of a black cardboard. In addition, a 1.8×50.8 -mm² standard white reflectance material is positioned at one corner of the black cardboard to function as a reference target for controlling the focus and exposure time of the digital camera.

With this smart phone, we develop an Android based application program to capture the desired two broad-spectral images under white light and UVA illuminations. Each spectral image is resized from its large 2592×1952 pixels to 320×240 pixels in order to reduce the processing time during our ripeness level analysis.

4. Results and discussion

4.1. Threshold values

Once the two broad-spectral images are obtained (see Fig. 2(a and b)), $WLR(x, y)$ and $UVR(x, y)$ are computed by using Eqs. (1) and (2), respectively. For each banana, its spectral images are captured from its immature stage until it reaches the overripe stage, which takes about 9 days. Because all bananas are not in the same ripeness level at the same time, we assign “Day 0” to the ripe banana. For the immature banana, a minus sign is applied to the *N*th Day. On the other hand, a plus sign is used for the banana that starts over-ripening. Fig. 3(a) shows relationship between measured $\overline{WLR}$ and *N*th Day of ripening. The immature stage from –6th Day to –2nd Day has $\overline{WLR}$ around 1.1 ± 0.06 . When the banana begins to reach the ripe stage from Day –2 to Day 0, $\overline{WLR}$ will suddenly increase to around 1.5 ± 0.13 . It stays in this range until it is overripe. With ten bananas under test, $\overline{WLR}_{-1}$ and $\overline{WLR}_0$ of 1.20 and 1.50 are determined. By using Eq. (4), *h* is equal to 1.35.

Fig. 3(b) shows relationship between measured $\overline{UVR}$ and day of ripening which is opposite to the relationship shown in Fig. 3(a). In this case, the immature stage of the banana from Day –6 to Day –2 has measured $\overline{UVR}$ around 6.0–8.0. When the day passes from Day –2 to 0, $\overline{UVR}$ will suddenly decrease to around 3.5–5.0. It then trends to increase when the banana becomes overripe. In the experiment with ten bananas under study, $\overline{UVR}_{-1}$ and $\overline{UVR}_0$ are equal to 4.40 and 3.90, respectively. In this case, Eq. (5) finds *k* to be 4.15.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

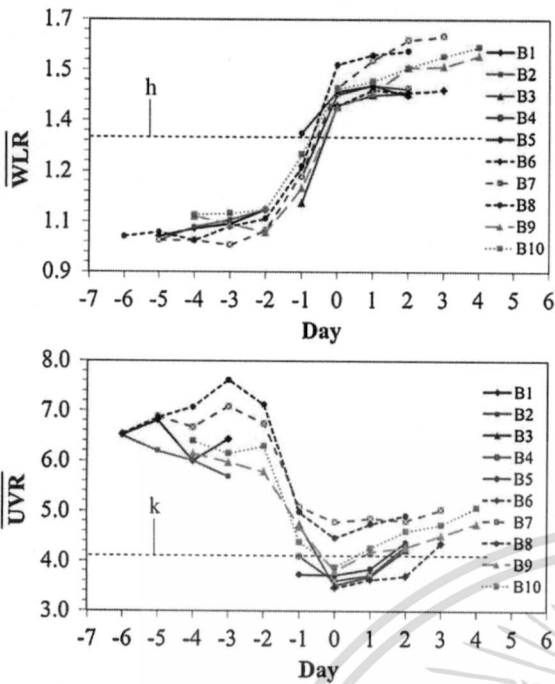
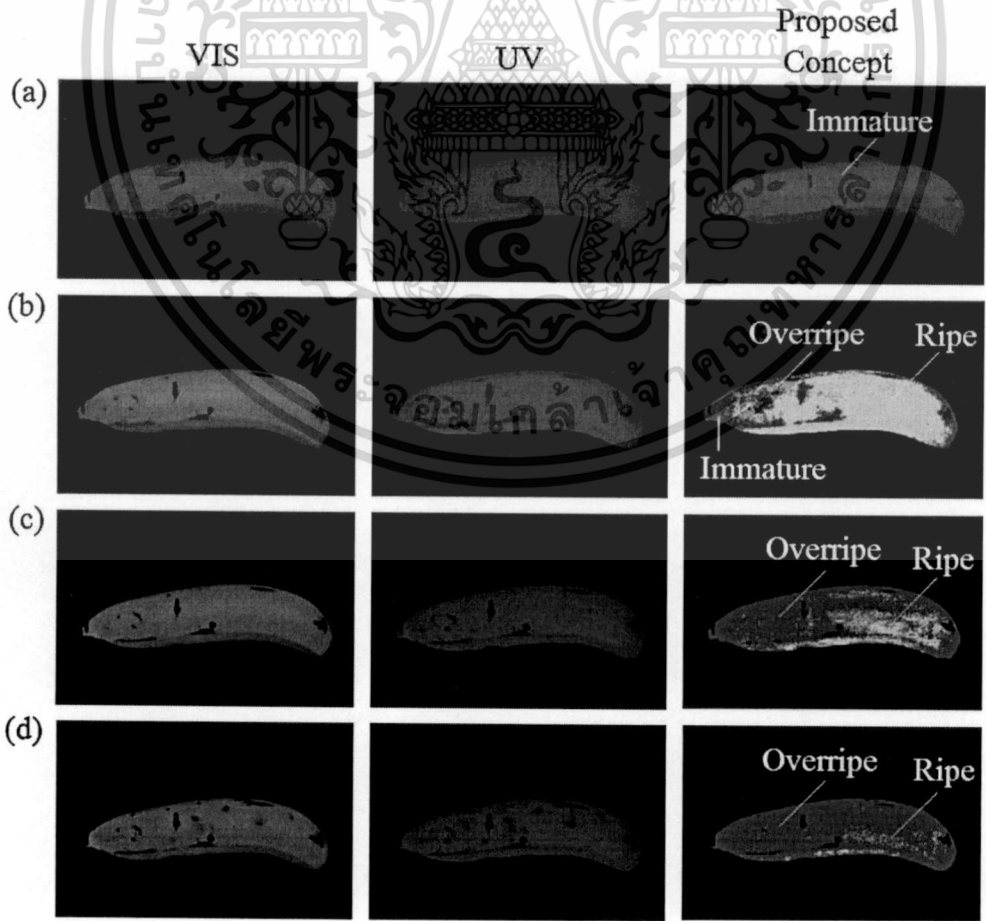


Fig. 3. Measured trends of (a) $\overline{WLR}$ and (b) $\overline{UVR}$ when bananas go from immature to overripe stages.

4.2. 2-D ripeness indication

As anticipated, the broad spectral image of the banana under white light illumination changes from green to yellow when the banana grows from the immature and ripe to overripe stages as shown in Fig. 4 left column. In addition, when the banana passes the ripe stage, more brown spots appear under the same yellow background. This result indicates that the broad spectral image of the banana under white light illumination can only be used to classify the banana into the immature and the ripe stages. Still, it cannot tell which part of the banana is immature, ripe, or overripe.

For the blue-green fluorescent spectral image of the banana observed under ultraviolet illumination shown in the middle column of Fig. 4(a) and (b), the fluorescent spectrum gets a little bit stronger when the banana changes from the immature to the ripe stages. Then the blue-green luminescence from the banana gets reduced when the banana starts overripening (see Fig. 4(c) and (d)). This implies that analysis of the blue-green spectral image of the banana alone cannot identify whether the banana is in the immature or the overripe stages. With the combination of both spectral images and our proposed spectral analysis, the 2-D ripeness level of the banana can be effectively identified into desired immature, ripe, and overripe stages as shown in Fig. 4 right column. To highlight these three zones on the banana, the original color (e.g., green) of the banana at the pixel (x, y) is maintained when the calculated $RL(x, y)$ in Eq. (4) is classified as the immature stage. The pixel (x, y) of the banana image is changed to yellow when the corresponding $UVR(x, y)$ and $WLR(x, y)$ are less than k and greater than h , respectively. In addition, red will be assigned to the pixel (x, y) of the



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

anana image under the overripe stage where $WLR(x, y)$ is greater than h and $UVR(x, y)$ is equal or greater than k . As manifested in Fig. 4(a) right column, most of the whole area of the banana (e.g., 9%) kept at Day -2 is immature. There is only 1% of the whole banana identified as overripe. These very small regions are actually bruises and will later on appear as dark brown spots. Fig. 4(b) right column shows the highlighted image of the banana at Day 0. It can be clearly seen that there is still a small 4% region associated with the immature stage. Compared to Fig. 4(a) right column, the ripe area expands more to cover about 71% of the whole banana and some small zones of the banana (i.e., 25%) already reach the overripe stage. When the banana grows to Day 2, the whole banana is divided into only ripe and overripe zones as shown in Fig. 4(c) right column. In this scenario, the ripe area is reduced from 71% at Day 0 to 21% while the overripe area covers about 79% of the whole banana image. At Day 4, the ripe area is tremendously suppressed and remains only 4% of the whole banana as highlighted in Fig. 4(d) right column. These results also imply that once the sizes of the immature, ripe, and overripe areas are known, the maturity of the banana can be efficiently predicted. The measured average classification time is 4.8 ms and the size of the application program is only 3 kB.

Conclusion

We propose a simple but yet effective 2-D spectral analysis concept for banana ripeness estimation. Our key idea is based on a simultaneous analysis of the two broad-spectral images of the banana taken under white light and ultraviolet illuminations. Then the calculated red and green color ratio from the broad-green or yellow spectral image and the computed blue and green color ratio from the broad blue-green fluorescent spectral image are used to spatially and specifically classify the whole banana into immature, ripe, and overripe zones. We also experimentally show for the first time that a smart mobile phone embedded with our proposed 2-spectral analysis concept can spatially divide bananas under the inspection into immature, ripe, and overripe areas. Other key features include fast classification time and ease of implementation. Future work relates to field deployment as well as to the study of ripeness level estimation for other green fruits.

References

- [1] Food and agricultural commodities production, <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (accessed September 2011).
- [2] S.T.A.R. Kajuna, W.K. Bilanski, G.S. Mittal, Textural changes of banana and plantain pulp during ripening, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 75 (1997) 244–250.
- [3] C.R. Chen, H.S. Ramaswamy, Color and texture change kinetics in ripening bananas, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 35 (2002) 415–419.
- [4] M. Soltani, R. Alimardani, M. Omid, Comparison of some chromatic, mechanical and chemical properties of banana fruit at different stages of ripeness, *Modern Applied Science* 4 (2010) 34–41.
- [5] C.S. Barry, J.J. Giovannoni, Ethylene and fruit ripening, *Journal of Plant Growth Regulation* 26 (2007) 143–159.
- [6] N. Boudhrioua, P. Giampaoli, C. Bonazzi, Changes in aromatic components of banana during ripening and air-drying, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 36 (2003) 633–642.
- [7] E. Llobet, E.L. Hines, J.W. Gardner, S. Franco, Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose, *Measurement Science and Technology* 10 (1999) 538–548.
- [8] E.E. Finney, I. Ben-Gera, D.R. Massie, An objective evaluation of changes in firmness of ripening bananas using a sonic technique, *Journal of Food Science* 32 (1967) 642–646.
- [9] M. Soltani, R. Alimardani, M. Omid, Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system, *Australian Journal of Crop Science* 4 (2010) 443–447.
- [10] S.I. Cho, G.W. Krutz, H.G. Gibson, K. Haghighi, Magnet console design of an NMR-based sensor to detect ripeness of fruit, *Transactions of the ASAE* 33 (1990) 1043–1050.

- [11] W.K. Wai, R.L. Strohshine, G.W. Krutz, A modified Hahn echo pulse sequence for proton magnetic resonance (^1H -MR) measurements of percent soluble solids of fruits, *Transactions of the ASAE* 38 (1995) 849–855.
- [12] G. Ward, A. Nussinovitch, Peel gloss as a potential indicator of banana ripeness, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 29 (1996) 289–294.
- [13] M. Li, D.C. Slaughter, J.F. Thompson, Optical chlorophyll sensing system for banana ripening, *Postharvest Biology and Technology* 12 (1997) 273–283.
- [14] M. Zude, Non-destructive prediction of banana fruit quality using VIS/NIR spectroscopy, *Fruits* 58 (2003) 135–142.
- [15] S. Sumriddetchkajorn, Y. Intaravanne, Hyperspectral imaging-based credit card verifier structure with adaptive learning, *Applied Optics* 47 (2008) 6594–6600.
- [16] S. Sumriddetchkajorn, Y. Intaravanne, Data-noninvasive photonics-based credit card verifier with a low noise rejection rate, *Applied Optics* 49 (2010) 764–771.
- [17] K. Suwansukho, S. Sumriddetchkajorn, P. Buranasiri, Demonstration of a single-wavelength spectral-imaging-based Thai jasmine rice identification, *Applied Optics* 50 (2011) 4024–4030.
- [18] P. Rajkumar, N. Wang, G.E. Imasry, G.S.V. Raghavan, Y. Garipey, Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging, *Journal of Food Engineering* 108 (2012) 194–200.
- [19] F. Mendoza, Characterization of surface appearance and color in some fruits and vegetables by image analysis, Ph.D. Thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2005.
- [20] H. Saad, A.P. Ismaie, N. Othman, M.H. Jusoh, N.F. Naim, N.A. Ahmad, Recognizing the ripeness of bananas using artificial neural network based on histogram approach, in: *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications*, Kuala Lumpur, Malaysia, November, 2009, pp. 536–541.
- [21] Global mobile statistics, <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats> (accessed September 2011).
- [22] Google play, <http://play.google.com/store> (accessed March 2012).
- [23] S. Moser, T. Müller, M.O. Ebert, S. Jockusch, N.J. Turro, B. Kräutler, Blue luminescence of ripening bananas, *Angewandte Chemie International Edition* 47 (2008) 8954–8957.
- [24] J. Canning, A. Lau, M. Naqshbandi, I. Petermann, M.J. Crossley, Measurement of fluorescence in a rhodamine-123 doped self-assembled giant mesostructured silica sphere using a Smartphone as optical hardware, *Sensors* 11 (2011) 7055–7062.

Biographies

Yuttana Intaravanne received his Bachelor of Science (applied physics) from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, in 2006. Since then, he has worked as an Assistant Researcher at NECTEC's Photonics Technology Laboratory. His current research work is in optics, electronics, and computer programming to solve technical issues for agricultural sectors.

Sarun Sumriddetchkajorn received his B.Eng. in electrical engineering with honors in 1994 from Khon Kaen University, Thailand. In 1996, he was awarded a Thai government scholarship and then joined the School of Optics/Center for Research and Education in Optics and Lasers at the University of Central Florida, Florida, USA. He earned his M.S. and Ph.D. in optical science and engineering in 1998 and 2000, respectively. From 1994–1996, he was with National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC)'s Electro-Optics Laboratory, Thailand, responsible for embossed hologram processing and computer generated holograms. He worked at Nuonics Inc., in Florida, USA as a photonics engineer in 2001 responsible for the development of fiber-optic processors using microelectromechanical systems (MEMS), liquid crystal, and acousto-optic technologies. He is now Director of NECTEC's Intelligent Devices and Systems Research Unit overseeing research groups of photonics technology, MEMS and nanoelectronics, optical thin film technology, and solar energy technology. His current research work is in the photonic area where he applies photonics to solve problems for industrial, medical, environmental, and education sectors. He is a recipient of the 1999 Optical Society of America (OSA) New Focus Student Award, the 2000 International Society for Optical Engineering (SPIE) "D. J. Lovell Award", and the 2000 IEEE Lasers and Electro-Optics (Photonics) Society (IPS) Graduate Fellowship Award. He also received the 2003 Young Technologist Award and the 2004 Young Scientist Award from the Foundation for the Promotion of Science and Technology under the Patronage of H. M. the King of Thailand. In addition, he was awarded the 2005 ICO/ICTP Award from the International Commission for Optics (ICO) and the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP). In 2002, he initiated the formation of the OSA, SPIE, and IPS Thailand Chapters. He is a senior member of OSA, SPIE, and IPS.

Jiti Nukeaw was born in Thailand, on January 30, 1962. He received B. Ed. (physics) from Srinakharinwirot University, Songkla, Thailand in 1983, M.S. in physics from Chiangmai University, Chiangmai, Thailand in 1989, and D.Eng. in material sciences and engineering from Nagoya University, Nagoya, Japan in 1998. Since 2002, he has been an Associate Professor in the Department of Applied Physics, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, Thailand. He is currently Dean of the College of Nanotechnology, KMUTL and the Director of Nanoscale Physics Research Center. His research interests are in the areas of inorganic/organic semiconductor materials and devices, optical characterization tools, optoelectronics materials and devices, and science education.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology.

ECTI-CON

2012

16-18 MAY 2012
PHETCHABURI, THAILAND

Author Index

Content

ISBN: 978-1-4673-2024-5
IEEE Catalog Number: CFP1206E-CDR

Computer Engineering Department
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Tel: (+66) 0-2470-9083, 0-2470-9085, and 0-2470-9082
Fax: (+66) 0-2872-5050
Admin@cpe.kmutt.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ripeness Level Indication of Bananas with Visible and Fluorescent Spectral Images

Yuttana Intaravanne^{1,2}, Sarun Sumriddetchkajorn^{3,*},
and Jiti Nukeaw¹

¹College of Nanotechnology

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Photonics Technology Laboratory

³Intelligent Devices and Systems Research Unit
National Electronics and Computer Technology Center
112 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd., Klong 1,
Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

*Email: sarun.sumriddetchkajorn@nectec.or.th

Abstract—This paper proposes and experimentally demonstrates for what is believed to be the first time a non-destructive two-dimensional ripeness level indication system for green fruits such as bananas and mangos. Our key approach is to simultaneously analyze two spectral images under white light and ultraviolet illuminations. Selected color ratios from these two images can spatially classify the whole green fruit into immature, ripe, and overripe zones. Other key features include fast response and ease of implementation.

Keywords—Ripeness Estimation; Non-Destructive Analysis; Spectral Analysis; Banana; Image Processing; Optical Sensors; Mobile Phone

I. INTRODUCTION

Based on the FAO report on food and commodities production, banana was ranked one of the top twenty in the world trade with more than 97.4 million metric tons and a total international price of 27 billion dollars in 2009 [1]. Appropriate banana ripeness level is estimated nondestructively by naked eyes for personal consumption and export. Several quantitative approaches were demonstrated including the use of an array of electronic odor sensors [2], analysis of the acoustic property [3], analysis of the capacitive property [4], the use of nuclear magnetic resonance [5], the use of proton magnetic resonance [6], gloss analysis [7], two-wavelength spectrum analysis [8], and visible/near infrared spectroscopy [9]. Because these techniques can evaluate the banana ripeness level in a very limited small area, a two-dimensional (2-D) spectral imaging-based technique can be employed as it has been recently used for the identification of genuine credit cards [10-11] and Thaiasmine rice [12]. Previously, a hyperspectral-imaging concept [13], and a machine vision embedded with a color feature extraction algorithm [14] and artificial neural network [15] were demonstrated for classifying maturity levels of the banana. As the chlorophyll in completely yellow banana is mostly degraded and the banana color is unchanged, these techniques cannot correctly estimate the banana ripeness level until undesired brown spots appear. In this scenario, the banana is already in the unwanted overripe stage. In addition, because different areas of the whole banana are not in the same ripeness level at the same time, the above methods totally fail in dividing the whole banana into different ripeness zones. To clearly determine the ripeness level of the whole banana from

its beginning immature to overripe stages, this paper proposes and experimentally demonstrates for the first time a 2-D banana ripeness level indication concept. Our key idea is to simultaneously analyze two broad-spectral images under white light and ultraviolet illuminations. Particularly, specific color ratios from these two broad-spectral images are used for classifying the whole banana into immature, ripe and overripe zones.

II. PROPOSED 2-D SPECTRAL ANALYSIS FOR BANANA RIPENESS ESTIMATION

Fig. 1 shows our proposed schematic structures of cell phone-based 2-D spectral analysis for banana ripeness level classification. It only consists of a smart mobile phone, white light sources, and ultraviolet light sources. Note that instead of using a combination of a computer and a digital camera, we propose to use a smart mobile phone as it is already embedded with a processing unit, a memory part, and a digital camera. The proposed structure can be deployed in a super market and at the export sites.

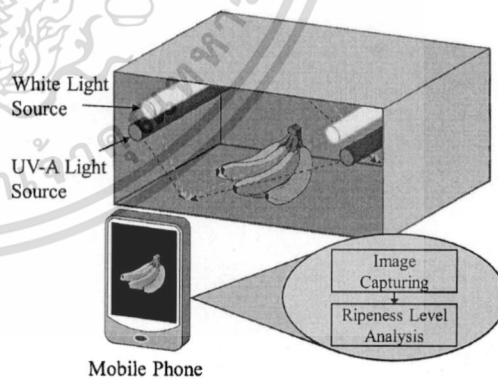


Figure 1. Proposed 2-D banana ripeness level identification structure.

Our 2-D spectral analysis for estimating the banana ripeness level is based on the fact that the color of the banana changes from green to yellow during ripening due to the chlorophyll breakdown when observed under white light illumination. In addition, blue-green luminescent spectrum in a 400-500 nm wavelength band from the banana with an excitation at 350 nm wavelength trends to reduce when the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

banana goes from yellow to brown-yellow. From Fig. 1, when white light illuminates the banana under inspection, a broad spectral image of the banana is captured by a digital camera of the smart mobile phone. After that, a smart mobile phone records a blue-green fluorescent spectral image of the banana under the excitation of the ultraviolet light. These two broad-spectral images under white light and ultraviolet light are automatically registered into red, green, and blue color planes. Since green fruit such as bananas and mangoes will change to yellow when ripening, the dominant color information contains in red and green image planes. In this case, the red and green color values of the image are used to calculate the white light ratio (WLR).

$$WLR(x, y) = R_{wl}(x, y) / G_{wl}(x, y) \quad (1)$$

Here, $R_{wl}(x, y)$ and $G_{wl}(x, y)$ are red and green color levels of the pixel (x, y) , respectively. Similarly, blue and green color are dominant in the blue-green spectral image of the banana, the ultraviolet light ratio (UVR) at the pixel (x, y) of the image is calculated as.

$$UVR(x, y) = B_{uv}(x, y) / G_{uv}(x, y) \quad (2)$$

where $B_{uv}(x, y)$ and $G_{uv}(x, y)$ are blue and green color levels of the pixel (x, y) , respectively. To determine the ripeness level of banana at the pixel (x, y) of the image “ $RL(x, y)$ ”, a two-level image thresholding algorithm is applied as follows.

$$RL(x, y) = \begin{cases} \text{Immature, } WLR(x, y) \leq h \\ \text{Ripe, } WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) < k \\ \text{Overripe, } WLR(x, y) > h \text{ and } UVR(x, y) \geq k \end{cases} \quad (3)$$

Here, the first threshold value (h) is used for spatially dividing the banana into the immature and ripe areas while the second threshold value (k) is for dividing the banana into the ripe and overripe states. These two threshold values can be determined by using statistical or neural network analytical approaches.

III. EXPERIMENTAL SETUP

Based on available components in our laboratory, our experimental setup is shown in Fig. 2(a). Two specified 6-Watt UVA light sources in a T5 standard bracket are settled 15 cm from each side of the banana. Each UVA light source emits a measured peak 365-nm wavelength light. For white light illumination, six of 36-Watt fluorescent lamps fixed at the ceiling above the experiment setup are employed. Our smart mobile phone is situated at a distance of 20 cm above the banana. The smart phone is equipped with a 528-MHz processor, 384 MB of RAM, a 2592×1952-pixel digital camera, and an Android 2.2 operating system. The banana is fusa (AAA group) “Kluai Hom Thong”. Ten immature bananas are randomly bought from a local market. The banana under ripeness evaluation is placed on top of a black cardboard. In addition, a 50.8×50.8-mm² standard white reflectance material is positioned in one corner of the black cardboard to function as a reference target for controlling the focus and exposure time of the digital camera. With this smart phone, we

develop an Android based application program to capture the desired two broad-spectral images under white light and UVA illuminations. Each spectral image is resized from its large 2592×1952 pixels to 320×240 pixels in order to reduce the processing time during our ripeness level analysis.

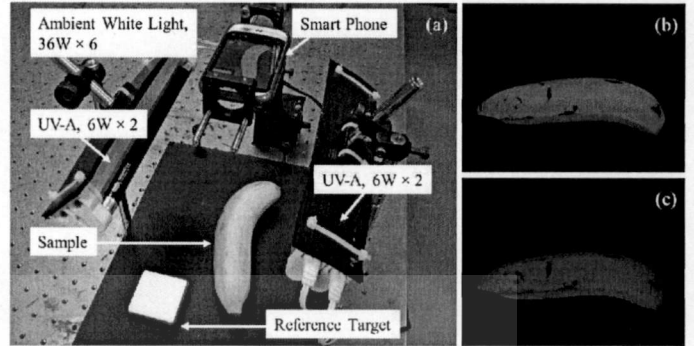


Figure 2. (a) Experimental setup for proof of concept. Spectral images of the banana under (b) white light illumination and (c) ultraviolet illumination.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Threshold Values

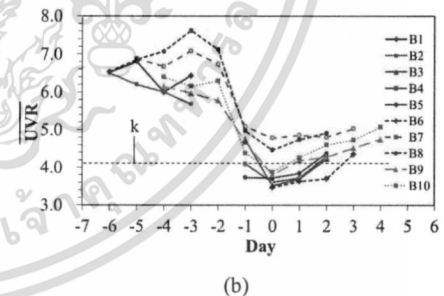
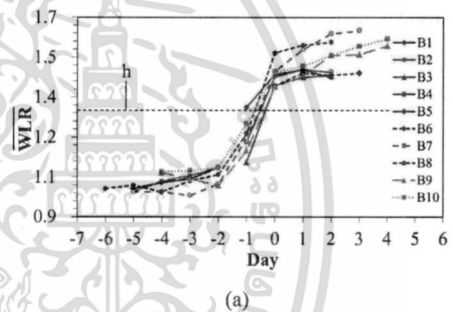


Figure 3. Measured (a) $\overline{WLR}$ and (b) $\overline{UVR}$ when bananas go from immature to overripe stages.

Once the two broad-spectral images are obtained, $WLR(x, y)$ and $UVR(x, y)$ are computed by using (1) and (2), respectively. For each banana, its spectral images are captured from its immature stage until it reaches the overripe stage, which takes about 9 days. Because all bananas are not in the same ripeness level at the same time, we assign “Day 0” to the ripe banana. For the immature banana, a minus sign is applied to the N^{th} Day. On the other hand, a plus sign is used for the banana that starts overripening. Fig. 3(a) shows relationship between measured $\overline{WLR}$ and N^{th} Day of ripening. The immature stage from -6th Day to -2nd Day has $\overline{WLR}$ around 1.1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When the banana begins to reach the ripe stage from Day -2 to Day 0, $\overline{WLR}$ will suddenly increase to around 1.5. It stays in this range until it is overripe. With ten bananas under test, $\overline{WLR}_{-1}$ (i.e., $\overline{WLR}$ at Day -1) and $\overline{WLR}_0$ (i.e., $\overline{WLR}$ at Day 0) of 1.20 and 1.50 are determined, respectively. In this case, we choose h of $(\overline{WLR}_{-1} + \overline{WLR}_0)/2 = 1.35$.

Fig. 3(b) shows relationship between measured $\overline{UVR}$ and day of ripening which is opposite to the relationship shown in Fig. 3(a). In this case, the immature stage of the banana from Day -6 to Day -2 has measured $\overline{UVR}$ around 6.0-8.0. When the day passes from Day -2 to 0, $\overline{UVR}$ will suddenly decrease to around 3.5-5.0. It then trends to increase when the banana becomes overripe. In the experiment with ten bananas under study, $\overline{UVR}_{-1}$ and $\overline{UVR}_0$ are equal to 4.40 and 3.90, respectively, indicating k of 4.15.

B. 2-D Ripeness Indication

As anticipated, the broad spectral image of the banana under white light illumination changes from green to yellow when each area of the banana grows from the immature and ripe to overripe stages as shown in Fig. 4 left. In addition, when some zones of the banana pass the ripe stage, more brown spots appear under the same yellow background. This result indicates that the broad spectral image of the banana under white light illumination can only be used to classify the banana into the immature and the ripe stages. Still, it cannot tell which part of the banana is immature, ripe, or overripe.

For the blue-green fluorescent spectral image of the banana observed under ultraviolet illumination shown in Fig. 4 center, the change in fluorescent signals is hardly observed.

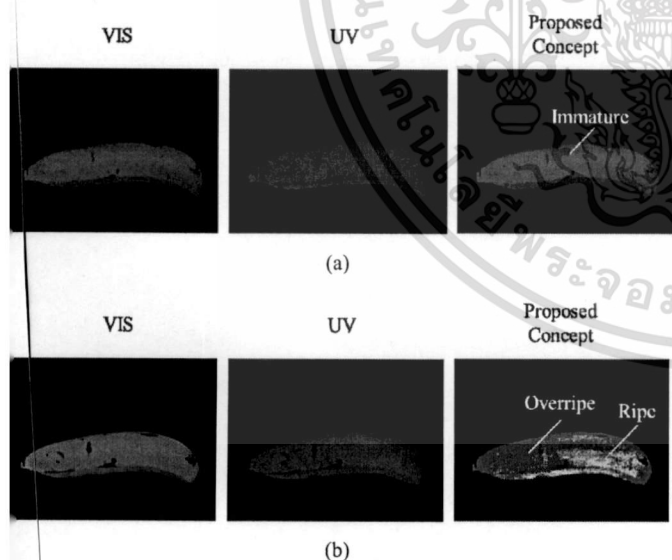


Figure 4. Results of 2-D ripeness level indication for bananas in (a) immature stage of Day -2 and (b) overripe stage of Day 2.

With the combination of both spectral images and our proposed spectral analysis, the 2-D ripeness level of the banana can be effectively divided into interested immature, ripe, and overripe zones as shown in Fig. 4 right. To highlight these

three zones on the banana, the original color (e.g., green) of the banana at the pixel (x,y) is maintained when the calculated $RL(x,y)$ in (3) is classified as the immature stage. The pixel (x,y) of the banana image is changed to yellow when the corresponding $UVR(x,y)$ and $WLR(x,y)$ are less than k and greater than h , respectively. In addition, red will be assigned to the pixel (x,y) of the banana image under the overripe stage where $WLR(x,y)$ is greater than h and $UVR(x,y)$ is equal or greater than k . As manifested in Fig. 4(a) right, most of the whole area of the banana (e.g., 99%) kept at Day -2 is immature. There is only 1% of the whole banana identified as overripe. These very small regions are actually bruises and will later on appear as dark brown spots. When the banana grows to Day 2, the whole banana is divided into only ripe and overripe zones as shown in Fig. 4(b) right. In this scenario, the ripe area is reduced from 71% at Day 0 to 21% while the overripe area covers about 79% of the whole banana image. The measured average classification time is 4.8 ms and the size of the application program is only 26 Kbytes.

V. CONCLUSION

We propose a simple 2-D spectral analysis concept for banana ripeness estimation. Our key idea is based on the simultaneous analysis of the two broad-spectral images of the banana taken under white light and ultraviolet illuminations. Then the calculated color ratios from the broad-green or yellow spectral image and from the broad blue-green fluorescent spectral image are used to divide the whole banana into immature, ripe, and overripe zones. We also experimentally show for the first time that a smart mobile phone embedded with our proposed 2-D spectral analysis concept can classify the whole banana under the inspection into immature, ripe, and overripe areas. Future work relates to field deployment as well as to the study of ripeness level estimation for other green fruits.

REFERENCES

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Food and agricultural commodities production," <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, Accessed on December, 2011.
- [2] E. Llobet, E. L. Hines, J. W. Gardner, and S. Franco, "Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 538-548, 1999.
- [3] E. E. Finney, I. Ben-Gera, and D. R. Massie, "An objective evaluation of changes in firmness of ripening bananas using a sonic technique," *Food Sci.*, vol. 32, pp. 642-646, 1967.
- [4] M. Soltani, R. Alimardani, and M. Omid, "Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system," *Aust. J. Crop Sci.*, vol. 4, pp. 443-447, 2010.
- [5] S. I. Cho, G. W. Krutz, H. G. Gibson, and K. Haghighi, "Magnet console design of an NMR-based sensor to detect ripeness of fruit," *Trans. ASABE*, vol. 33, pp. 1043-1050, 1990.
- [6] W. K. Wai, R. L. Strohshine, and G. W. Krutz, "A modified hahn echo pulse sequence for proton magnetic resonance (^1H -MR) measurements of percent soluble solids of fruits," *Trans. ASABE*, vol. 38, pp. 849-855, 1995.
- [7] G. Ward and A. Nussinovitch, "Peel gloss as a potential indicator of banana ripeness," *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, vol. 29, pp. 289-294, 1996.

- [8] M. Li, D. C. Slaughter, and J. F. Thompson, "Optical chlorophyll sensing system for banana ripening," *Postharvest Biol. Tec.*, vol. 12, pp. 273–283, 1997.
- [9] M. Zude, "Non-destructive prediction of banana fruit quality using VIS/NIR spectroscopy," *Fruits*, vol. 58, pp. 135–142, 2003.
- [10] S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, "Hyperspectral imaging-based credit card verifier structure with adaptive learning," *Appl. Opt.*, vol. 47, pp. 6594–6600, 2008.
- [11] S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, "Data-nonintrusive photonics-based credit card verifier with a low noise rejection rate," *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. 764–771, 2010.
- [12] K. Suwansukho, S. Sumriddetchkajorn, and P. Buranasiri, "Demonstration of a single-wavelength spectral-imaging-based Thai jasmine rice identification," *Appl. Opt.*, vol. 50, pp. 4024–4030, 2011.
- [13] P. Rajkumar, N. Wang, G. Elmasry, G. S. V. Raghavan, and Y. Gariepy, "Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging," *J. Food Eng.*, vol. 108, pp. 194–200, 2012.
- [14] F. Mendoza, "Characterization of surface appearance and color in some fruits and vegetables by image analysis," Ph.D. Thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2005.
- [15] H. Saad, A. P. Ismaie, N. Othman, M. H. Jusoh, N. F. Naim, and N. A. Ahmad, "Recognizing the ripeness of bananas using artificial neural network based on histogram approach," *Proc. of IEEE Conference on Signal and Image Processing Applications*, pp. 536 – 541, 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ (ภาษาไทย) นายยุทธนา อินทรวันณี
 ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr.Yuttana Intaravanne
 วันเดือนปีเกิด 21 พฤษภาคม 2527 ที่จังหวัดอุทัยธานี
 ที่อยู่ 20/3 หมู่ 2 ต.หนองกระทุ่ม อ.ทัพทัน จ. อุทัยธานี 61120
 โทรศัพท์ 085-936-9501

ประวัติการศึกษา

2549 ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขา โสณิตส
 เตหะอิลักทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 2556 ปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สาขา
 นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
 ทหารลาดกระบัง

ความสนใจเฉพาะด้าน

- 1) อิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์
- 2) ฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสง
- 3) การเขียนโปรแกรมประยุกต์บนคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพา

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2550 – ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้ช่วยวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ทรัพย์สินทางปัญญา-สิทธิบัตรการประดิษฐ์และสิทธิบัตรการออกแบบ

1. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ ยุทธนา อินทรวันณี, “อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบแสงเลี้ยวเบนจากฮอโลแกรมด้วยหลักการสร้างหน้าคลื่นย้อนกลับ,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 0901003707, 17 ส.ค. 2552.
2. โกษม ไชยถาวร, ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ ยุทธนา อินทรวันณี, “วิธีการตรวจสอบลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว ความกว้าง และ แนวการเรียงตัวของวัตถุขนาดเล็กแบบไม่สัมผัส,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1101000226, 17 ก.พ. 2554.
3. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ ยุทธนา อินทรวันณี, “ระบบและวิธีการสำหรับตรวจระดับความสุกของผักและผลไม้แบบไม่ทำลาย,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1101001595, 18 ส.ค. 2554.
4. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ ยุทธนา อินทรวันณี, “อุปกรณ์และวิธีการสำหรับตรวจวัดระดับความเข้มข้นของวัตถุแบบสองมิติ,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1201002494, 29 พ.ค. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ ยุทธนา อินทรวรรณ, “ระบบและวิธีการสำหรับตรวจระดับความสุกของผลผลิตผลเกษตรด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1201005829, 8 พ.ย. 2555.
6. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร, โกษม ไชยถาวร, และ ยุทธนา อินทรวรรณ, “ระบบและวิธีการสำหรับใช้วัดคุณภาพทางกายภาพของวัตถุรูปทรงเม็ดพร้อมกันด้วยแสง,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1301000516, 31 ม.ค. 2556.
7. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร, โกษม ไชยถาวร, และ ยุทธนา อินทรวรรณ, “ถาด,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1302001133, 2 พ.ค. 2556.
8. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร, โกษม ไชยถาวร, และ ยุทธนา อินทรวรรณ, “ถาด,” *เอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตรไทย*, หมายเลขคำขอ 1302001134, 2 พ.ค. 2556.

งานเขียน-บทความตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติตามรายชื่อของ Citation Index

1. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “Hyperspectral imaging-based credit card verifier structure with adaptive learning,” *Appl. Opt.* **47**, 6594-6600 (2008).
2. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “Data-nonintrusive photonics-based credit card verifier with a low noise rejection rate,” *Appl. Opt.* **49**, 764-771 (2010).
3. Y. Intaravanne, S. Sumriddetchkajorn, and J. Nukeaw, “Cell phone-based two-dimensional spectral analysis for banana ripeness estimation,” *Sensor. Actuat. B-Chem.* **168**, 390-394 (2012).
4. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “Home-Made N-Channel Fiber-Optic Spectrometer from a Web Camera,” *Appl. Spectrosc.* **66**, 1156-1162 (2012).
5. S. Sumriddetchkajorn, K. Chaitavon, and Y. Intaravanne, “Mobile device-based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water,” *Sensor. Actuat. B-Chem* **182**, 592-597 (2013).

งานเขียน-บทความตีพิมพ์ใน Proceeding การประชุมวิชาการนานาชาติที่มี Peer Review

1. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “A credit card verifier structure using diffraction and spectroscopy concepts,” *Proc. SPIE.* **7003**, 700318 (2008).
2. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “Non-intrusive hyperspectral imaging-based credit card verifier with histogram analysis approaches,” *Proc. AsiaSense*, 122-128 (2009).
3. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, “Evolution of Optically Nondestructive and Data-Non-Intrusive Credit Card Verifiers,” *Proc. SPIE* **7726**, 77261B (2010).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. S. Sumriddetchkajorn and Y. Intaravanne, "Low-Cost Light-Emitting-Diode based Leaf Color Meter for Nitrogen Status Estimation in the Rice Field," *Proc. SPIE* **7847**, 784707 (2010).
5. Y. Intaravanne, S. Sumriddetchkajorn, and J. Nukeaw, "Ripeness Level Indication of Bananas with Visible and Fluorescent Spectral Images," *Proc. IEEE on ECTI-CON* (2012).
6. Y. Intaravanne and S. Sumriddetchkajorn, "BaiKhao (Rice Leaf) App: A Mobile Device-based Application in Analyzing the Color Level of the Rice Leaf for Nitrogen Estimation," *Proc. SPIE*. **8558**, 85580F (2013).

งานเขียน-บทความตีพิมพ์ใน Proceeding การประชุมวิชาการในประเทศ

1. Y. Intaravanne, S. Sumriddetchkajorn, and J. Nukeaw, "Development of an Imaging Spectrometer for R&D in Thailand," *Proc. Nat. Conf. Opt. and Appl.*, 71-76, Bangkok, Thailand (2010).

