



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มและทะลายปาล์ม  
ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ  
Oil Quantity of Oil Palm and Plam Bunch  
Using Image Processing Techniques

**คณะนักวิจัย** รศ.ดร.มิตรชัย จงเชียวชำนาญ  
ดร.สมชัย หลิมศิริโรรัตน์  
ผศ.ดร.ธเนศ เคารพพวงค์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก เงินรายได้มหาวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2554 รหัสโครงการ ENG540598S

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอกรรมวิธีการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มและทะลายปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพประกอบด้วยกระบวนการหลักสี่กระบวนการคือ กระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น กระบวนการตัดแยกระดับความสุขของผลปาล์ม กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม และ กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์ม ในกระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้นได้นำเสนอกรรมวิธีการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่นกันด้วยเทคนิคการคำนวณค่าฟังก์ชันสีของกล้องจากภาพมาตรฐานและชดเชยสีด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ กระบวนการตัดแยกระดับความสุขของผลปาล์ม มีพื้นฐานอยู่บนโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าสองชั้นโดยใช้ค่าสีอิฐที่ได้จากผิวของผลปาล์ม กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม พัฒนาค้นคว้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการพหุนาม และกระบวนการทำนายปริมาณทะลายปาล์มจะใช้เทคนิคการคำนวณปริมาตรจากภาพสามมิติเพื่อทำนายปริมาณน้ำมันปาล์ม ในส่วนของกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม คณะผู้วิจัยได้พัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งติดตั้งอยู่บนโทรศัพท์มือถือ ผลลัพธ์จากการทดสอบด้วยตัวอย่างผลปาล์มจำนวน 64 ผล และทะลายปาล์มน้ำมัน 10 ทะลาย เปรียบเทียบกับวิธีการชอกท์เลตพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายร้อยละของปริมาณน้ำมันในผลและทะลายปาล์มโดยเฉลี่ย 3.30 และ 10.29 ตามลำดับ จากช่วงของปริมาณน้ำมันที่ทดสอบร้อยละ 30-73

## Abstract

This research presents a simple scheme based on an image processing technique for determining oil content in oil palm fruit. The scheme has four main algorithms for color correction, classification, oil extraction rate (OER) of oil palm fruit and bunch determination. The color correction algorithm can correct image color from the device-dependence effect in the RGB color model by the device profile function. The classification process is developed on a two-layer feedforward neural network by using features from the hue values of oil palm fruits. The OER determination function is modeled by using the polynomial regression model. The OER determination of oil palm bunch is modeled by using 3D reconstruction model. The results demonstrate that the proposed scheme can classify and determine the OER with a simple calculation. The scheme is implemented on a mobile device/phone and tested with 64 oil palm fruit samples and 10 bunch samples. Comparing with the standard Soxhlet extraction measurement, the scheme achieves a mean error of OER 3.30 and 10.29 for oil palm fruit and bunch, respectively with the OER range of 30-73.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนวิจัย ภายใต้สัญญา  
ทุน ENG540598S

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ที่กรุณาสับสนุนให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

## คำนำ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อรายงานผลการศึกษาระบบวิธีการทำนายน้ำมันในผลปาล์มและทะลายปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ต่อ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภายใต้สัญญาวิทยุรับทุนเลขที่ ENG540598S โดยเนื้อหาของรายงานฉบับนี้เพื่อศึกษาการทำนายน้ำมันในผลปาล์มและทะลายปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ขั้นตอนต่างๆประกอบด้วย การอธิบายผลของการศึกษาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่นกัน วิธีการจำแนกผลปาล์มออกเป็นกลุ่มต่างๆรวมถึงการทำนายน้ำมันในผลปาล์ม ตลอดจนการสร้างแบบจำลองสามมิติของทะลายปาล์มเพื่อคำนวณปริมาตรของทะลายปาล์ม จากผลการศึกษาดังกล่าวได้นำไปสู่การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว มาประยุกต์เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ จากนั้นได้ทำการทดสอบโปรแกรมดังกล่าวด้วยกลุ่มตัวอย่างผลและทะลายปาล์มเปรียบเทียบกับวิธีการชอกท์เลต ผลสำเร็จของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวที่นำเสนอ เป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเชิงระบบเครื่องวัดปริมาณน้ำมันในผลและทะลายปาล์ม ซึ่งผลเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ไปสู่การจดสิทธิบัตรสองฉบับ ผู้วิจัยเชื่อว่าบนพื้นฐานของงานวิจัยนี้จะมีความเป็นไปได้สูงในการนำองค์ความรู้ของงานวิจัยนี้ไปพัฒนาเป็นระบบทำนายน้ำมันจากทะลายปาล์มเพื่อในงานรับซื้อขายผลปาล์มได้จริงเพื่อเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรปาล์มและลานรับซื้อปาล์ม ให้ความยุติธรรมในการรับซื้อปาล์มโดยพิจารณาจากคุณภาพของปาล์มน้ำมัน และในที่สุดเกษตรกรจะให้ความสำคัญอย่างยิ่งต่อการใช้แนวทางวิชาการในการทำเกษตรกรรมด้านปาล์มน้ำมันตั้งแต่การเพาะปลูกจนถึงการดูแลผลผลิตหลังเก็บเกี่ยว

รองศาสตราจารย์ มิตรชัย จงเขียวชำนาญ

หัวหน้าโครงการวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	5
สารบัญ.....	6
รายการตาราง.....	7
รายการภาพประกอบ.....	8
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	9
บทนำ.....	10
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
ระเบียบวิธีวิจัย.....	14
วิธีการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	15
การประมวลผลภาพเบื้องต้น.....	15
- กระบวนการการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น.....	15
- ประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสี.....	18
ลักษณะสีของผลปาล์มและทะเลายปาล์มน้ำมัน.....	21
การตัดแยกระดับความสุกและทำนายปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมัน.....	22
- แบบจำลองการแบ่งระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน.....	23
- ประสิทธิภาพของแบบจำลองการตัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน.....	24
- กระบวนการทำนาย OER.....	24
- ประสิทธิภาพของกระบวนการการทำนาย OER.....	27
การทำนาย OER ในทะเลายปาล์มน้ำมัน.....	28
- กระบวนการทำนาย OER ในทะเลายปาล์มด้วยภาพสามมิติ.....	28
- ประสิทธิภาพของกระบวนการการทำนาย OER ในทะเลายปาล์ม.....	29
การออกแบบโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์มบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่.....	30
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	32
บรรณานุกรม.....	33
งบประมาณ.....	36
ภาคผนวก.....	36
- ร่าง Manuscript ที่ส่งไปยัง Elsevier Computers and Electronics in Agriculture	
- คำขอรับสิทธิบัตร พร้อมหลักฐานเลขที่คำขอ "อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม"	
- หนังสือสัญญาโอนสิทธิขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร "เครื่องวัดปริมาณน้ำมัน ในทะเลายปาล์ม"	

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1	ค่าสีอ้างอิงบนปริภูมิ RGB จากแผ่น STANDARD GRETAGMACBETH COLOR CHECKER.....	16
2	ประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสีจากการเปรียบเทียบค่าของผลรวมระยะทางแบบยุคลิด.....	20
3	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงระหว่างค่าสีอ้างอิงกับค่าสีต้นฉบับและค่าสีที่ถูกชดเชย.....	21
4	ช่วงปริมาณน้ำมันของผลปาล์มในแต่ละระดับความสุก.....	24
5	ค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมัน.....	27
6	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม.....	27
7	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทำนายปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์ม.....	29
8	ระยะเวลาการประมวลผลของโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์ม.....	31

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น.....	15
2 แผ่นภาพสีอ้างอิง.....	16
3 ภาพแสดงการทดลองกระบวนการชดเชยสีด้วยวิธีการ DDC.....	18
4 ภาพถ่ายของแผ่นภาพสีอ้างอิงจากกล้องดิจิทัล 3 รุ่น.....	19
5 สีของผลปาล์มขณะผลปาล์มสุก.....	22
6 สีของทะเลลายปาล์มขณะทะเลลายปาล์มสุก.....	22
7 ภาพรวมของอัลกอริทึมสำหรับคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน.....	23
8 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับตัวคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม.....	23
9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันกับค่าเฉลี่ยสีฮิวของผลปาล์มทั้งผล.....	25
10 ผลปาล์มที่ถูกปกปิดด้วยก๊อบผล.....	25
11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันในผลปาล์มของ 45 ผลตัวอย่าง.....	26
12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันในผลปาล์มกับค่าเฉลี่ยสีฮิวบนพื้นที่ส่วนล่างในแต่ละระดับความสุก.....	26
13 กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม.....	27
14 แบบจำลองการทดลองหาปริมาตรทะเลลายปาล์มด้วยกล้องวัดระยะ.....	28
15 การคำนวณหาความหนาของทะเลลายปาล์มจากเส้นแบ่งครึ่งที่จุดใดๆ.....	28
16 การวัดปริมาตรทะเลลายปาล์ม.....	29
17 โครงสร้างของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม.....	30
18 ตัวอย่างโปรแกรมบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่.....	31



## ตัวย่อและสัญลักษณ์

$\check{R}, \check{G}, \check{B}$  ค่าสีอ้างอิงของสีแดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ

$R, G, B$  ค่าสีจากภาพถ่ายของสีแดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ

$\alpha_{R,i}, \alpha_{G,i}, \alpha_{B,i}$  ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเซตสีบนระนาบ แดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ

$\check{x}_i$ , และ คือ ค่าสีอ้างอิงบนระนาบสี  $x$

$x_i$  ค่าสีที่ได้จากภาพถ่ายบนระนาบสี  $x$

$\alpha_{x,i}$  ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเซตสีบนระนาบสี  $x$

$e_i$  ค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการถดถอย

$n$  จำนวนสีทั้งหมด

$\alpha$  เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเซตสี

$\mathbf{X}$  เมตริกซ์แวนเดอร์มอนด์ (Vandermonde matrix) ของค่าสีที่ได้จากภาพถ่ายผ่านภาพสีอ้างอิง

$\check{\mathbf{X}}$  เวกเตอร์ของค่าสีอ้างอิง

$R'_j, G'_j, B'_j$  ค่าสี แดง เขียว และน้ำเงิน ของช่องสี  $j$

$\mathbf{E}_T$  ค่าของผลรวมระยะทางแบบยุคลิด

$m, c$  ค่าความชันและจุดตัดแกน  $y$  ตามลำดับ

$k$  จำนวนส่วนของพื้นที่ผิวผลปาล์ม

$y$  ระดับความสุขของผลปาล์ม

$f^1, f^2$  ฟังก์ชันซิกมอยด์ของเวกเตอร์ (sigmoid)

$\mathbf{p}$  เวกเตอร์ของสีผิวของผลปาล์ม

$\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2$  เมตริกซ์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

$\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2$  เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

$\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2$  ค่าน้ำหนักผลลัพธ์ของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

$g_i$  สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนาย

$h$  ค่าเฉลี่ยสี่อิวของบริเวณพื้นที่ส่วนล่าง

$D$  ระยะห่างระหว่างกล่องกับเส้นแบ่งครึ่ง

$d_i$  ระยะทางที่กล่องวัดระยะอ่านได้

$d'_i$  ความหนาของทะเลลายปาล์มที่จุดใดๆ

$v_o$  ปริมาณน้ำมันปาล์ม

$\rho_p$  ความหนาแน่นรวมของทะเลลายปาล์ม

$\rho_o$  ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม

$c$  สัดส่วนของมวลเนื้อปาล์มชั้นนอกต่อทะเลลาย

## บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยและของโลกเนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงที่สุดในบรรดาจากกลุ่มพืชน้ำมันทั้งหมด ผลผลิตจากปาล์มน้ำมันคือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ทั้งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสินค้าอุปโภคและบริโภค อาทิเช่น สบู่ เนยเทียม ครีมเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ ผลผลิตของน้ำมันดิบจากปาล์มยังสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกทดแทนการใช้น้ำมันจากซากฟอสซิลที่นับวันจะหมดไปจากโลก ในประเทศไทย ปาล์มน้ำมันสายพันธุ์เทอร์เนรา (*var. Tenera*) เป็นสายพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดเนื่องจากสามารถให้ผลผลิตน้ำมันสูงและไม่เป็นหมัน เกษตรกรมีรายได้โดยการตัดทะลายปาล์มที่สุกแล้วไปขาย

เมื่อเกษตรกรนำผลผลิตทะลายปาล์มไปขาย โดยหลักการซื้อขายที่เป็นธรรม การซื้อขายปาล์มควรกำหนดราคาตามคุณภาพของทะลายปาล์มที่ซื้อขายนั่น คุณภาพของทะลายปาล์มอาจวัดจากปริมาณน้ำมันปาล์มที่หีบได้ (OER-Oil Extraction Rate) ของทะลายปาล์มนั้น อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณน้ำมันปาล์มนี้จะได้ต่อเมื่อนำทะลายปาล์มไปหีบที่โรงหีบปาล์มซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังการซื้อขาย ดังนั้น การให้ราคาตามปริมาณน้ำมันจึงแทบจะเป็นไปไม่ได้เพราะผู้ขายไม่ได้ไปขายทะลายปาล์มกับโรงหีบโดยตรง นอกจากนี้ หากโรงหีบรับซื้อปาล์มก็ไม่สามารถหีบทะลายปาล์มที่ทะลายได้เนื่องจากสิ้นเปลืองเวลาและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจโดยเหตุนี้เอง การให้ราคาโดยวัดปริมาณน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มจึงเป็นไปได้ยาก วิธีการที่ใช้ในปัจจุบันในตลาดซื้อขายปาล์มคือใช้การคัดแยกคุณภาพทะลายปาล์มสดจากการประเมินระดับความสุกด้วยผู้เชี่ยวชาญผู้เชี่ยวชาญจะวิเคราะห์และประเมินจากลักษณะสีของผลปาล์ม ซึ่งสีผลปาล์มจะมีความสัมพันธ์กับระดับความสุกรวมถึงมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะของผลปาล์มส่วนอื่นๆ อย่างไรก็ตาม วิธีการที่อาศัยผู้เชี่ยวชาญมีความคลาดเคลื่อนจากความไม่แน่นอนสูงเนื่องจากอ้างอิงกับการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญที่อาจมีอคติโดยตั้งใจหรือเกิดจากภาวะอารมณ์

โดยเหตุที่กล่าวข้างต้นนี้เอง ในรอบหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีงานวิจัยนำเสนอกระบวนการวัดความสุกของปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น การทำนายปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์มโดยใช้คลื่นเสียงในแก๊บอลตราโซนิก (Ultrasonic) เทคนิคนี้สามารถวัดปริมาณน้ำมันในผลปาล์มจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่จัดวางเครื่องมืออย่างรอบคอบ จากบทความของงานวิจัยดังกล่าวพบว่าเทคนิคนี้ให้ความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 2.2 ในช่วงปริมาณน้ำมันปาล์มในผลปาล์มร้อยละ 20-60 อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกเป็นการวัดด้วยคลื่นเชิงกล (Mechanical wave) ที่ต้องออกแบบแท่นเพื่อยึดจับผลปาล์มให้นิ่งและในตำแหน่งการวางผลปาล์มที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น การใช้วิธีการวัดดังกล่าวต้องจัดวางอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้ผลปาล์มที่ต้องการวัดนี้ จึงทำให้ระบบการวัดค่อนข้างซับซ้อนและไม่เหมาะสมต่อการนำไปวัดจริงในภาคสนาม ในงานวิจัยอีกงานเป็นการวิเคราะห์แยกระดับความสุกของผลปาล์มด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ เทคนิคนี้จะวัดปริมาณความชื้นภายในผลปาล์มซึ่งสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric) ในบทความจะเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกที่วัดได้กับแบบจำลองไดอิเล็กตริกและนำมาประมวลผลเพื่อทำนายค่าปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้เป็นวิธีการที่

อาจคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากผลปาล์มมีความโค้งและค่าความชื้นในผลปาล์มกระจายในผลไม่สม่ำเสมอ ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกที่วัดได้ไม่สอดคล้องกับค่าความชื้นในผลปาล์มจริง นอกจากนี้ เทคนิคในบทความเป็นวิธีการทำลายผลิตผลเนื่องจากต้องปาดที่ตำแหน่งท้ายผลปาล์มเพื่อวัด

การทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสีภายนอกของผลปาล์ม ในหลายกรณีพบว่า สภาพภายนอกของผลิตผลทางการเกษตร ( สีส้ม ลักษณะรูปผล ฯลฯ) สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตผลทางเกษตรนั้นได้ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายคุณภาพของผลิตผลจากคุณลักษณะสีผิวซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นเทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายผลิตผล มีการนำเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลและเทคนิคการคัดแยกกลุ่มตัวอย่างมาใช้เป็นกระบวนการหลักสำหรับทำนายคุณภาพผลิตผลดังกล่าว เทคนิคดังกล่าวมีการนำข้อมูลความเข้มของสีสามสี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) หรือ ความเข้มของสีเชิงสเปกตรัมหรือฮิว (Hue) มาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ งานวิจัยเหล่านี้เช่นการทำนายคุณภาพของมังคุดหลังการเก็บเกี่ยวโดยหาความสัมพันธ์ของค่าสีฮิวของเปลือกมังคุดกับองค์ประกอบของสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) การทำนายสีของเนื้อลูกพีชคลิงสโตน (Clingstone peach) จากความสัมพันธ์ระหว่างสีฮิวของเนื้อและสีของเปลือก การคัดแยกคุณภาพของผลมันฝรั่งด้วยการสร้างดัชนีค่าสี 1 ขนาดมิติ (1-Dimensional Index) บนปริภูมิสีสามมิติของสีแดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่แปลงค่าสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของผลแอปเปิ้ลเป็นโทนสีเทา (Gray scale) และนำไปวัดคุณภาพของผลแอปเปิ้ล ดังนั้น หากใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลอื่นๆจะสามารถนำไปคัดแยกระดับความสุกรวมถึงทำนายปริมาณน้ำมันปาล์มในผลและทะลายปาล์มได้

เนื่องจากในปัจจุบัน วงจรประมวลผล (Processor) มีสมรรถนะการทำงานที่ระดับสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง สามารถประมวลผลข้อมูลได้เร็ว นอกจากนี้ ด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้ผู้ผลิตสามารถพัฒนาเซ็นเซอร์รับภาพและซีโมส (Digital CMOS sensor) ที่มีความละเอียดสูง ราคาถูก และขนาดเล็กได้ ทำให้อุปกรณ์กล้องเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ติดตั้งในอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ยุคใหม่ (Smart device) เช่น แท็บเล็ต (tablet) โทรศัพท์มือถือ (mobile phone) รวมถึงเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ค (Notebook) การติดตั้งอุปกรณ์กล้องดิจิทัลพร้อมหน่วยประมวลผลสมรรถนะสูงทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อปรับแต่งภาพตลอดจนการชดเชยสีได้ และยังเปิดโอกาสในการพัฒนาฟังก์ชันรองรับการใช้งานในด้านเกษตรอิเล็กทรอนิกส์ได้

เนื่องจากภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักสามส่วนคือ ตัวกล้อง สภาวะแสง และลักษณะวัตถุที่ถ่าย กรณีส่วนของตัวกล้อง อุปกรณ์เซ็นเซอร์รับภาพ เลนส์ ตลอดจนไปถึงโปรแกรมประมวลผลภาพในกล้อง เช่น กระบวนการปรับสมดุลสีขาวอัตโนมัติ (Automatic white-balance หรือ AWB) ล้วนส่งผลให้ภาพที่ได้จากกล้องต่างรุ่นจะมีค่าสีที่แตกต่างกัน (Device-dependence effect) แม้ถ่ายภาพวัตถุเดียวกันและที่สภาวะแสงเดียวกัน แม้แต่กระบวนการปรับสมดุลสีขาวอัตโนมัติจากกล้องดิจิทัลแต่ละรุ่นก็ถูกออกแบบมาเฉพาะด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน ดังนั้น สมรรถนะในการชดเชยสภาวะแสงที่แตกต่างกัน (different illuminants) จึงแตกต่าง ในโครงการวิจัยนี้ นอกจากใช้กล้องดิจิทัลเป็นส่วนสำคัญแล้ว จะประยุกต์ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดระยะควบคู่ด้วย โดยจะนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นภาพสามมิติของวัตถุต่างๆ ตลอดจนไปถึงการสร้างแบบจำลองสามมิติของร่างกายมนุษย์

ในงานวิจัยนำเสนอนี้ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอการทำนายปริมาณน้ำมันในผลและทะลายปาล์มด้วยวิธีการประมวลผลภาพ งานวิจัยนำเสนอกระบวนการหลักสี่กระบวนการคือ กระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น กระบวนการคัดแยกระดับความสุขของผลปาล์ม กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม และ กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์ม เฉพาะอย่างยิ่ง คณะผู้วิจัยได้พัฒนากระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มทั้งหมดเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานบนระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทั้งนี้ เพื่อมุ่งหมายให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงโปรแกรมใช้งานในการทำนายปริมาณน้ำมันผลปาล์มดังกล่าวได้

## วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อหาวิธีการทำนายปริมาณน้ำมันของทะเลลายปาล์มจากลักษณะภายนอกด้วยการประมวลผลภาพ

## ระเบียบวิธีวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมงานที่เกี่ยวข้องทั้งบทความวิจัยและสิทธิบัตร ซึ่งประกอบด้วยศิลปวิทยาการเทคนิค การวัดความสุขและการทำนายปริมาณน้ำมันของผลและทะเลายปาล์ม และองค์ความรู้ทางด้านเทคนิค การประมวลผลภาพ
2. ออกแบบระบบชุดเซยสีสำหรับกล้องถ่ายภาพต่างรุ่นกัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของสีที่ได้จากการถ่ายภาพผลปาล์มและทะเลายปาล์มด้วยอุปกรณ์ต่างรุ่นกัน
3. เก็บข้อมูลตัวอย่างของผลปาล์มที่สุ่มมาจากทะเลายปาล์มสด โดยถ่ายภาพผิวด้านข้างของผลปาล์มทุกๆ ด้านด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล จากนั้นส่งผลปาล์มตัวอย่างดังกล่าวไปวัดปริมาณน้ำมันด้วยวิธีการชอกห์เลต
4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสี ขนาด รูปร่าง ของผลปาล์ม กับปริมาณน้ำมัน เพื่อสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจะต้องมีความซับซ้อนน้อยและง่ายต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปบนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก หรือโทรศัพท์สมาร์ทโฟน
5. ออกแบบระบบคำนวณปริมาตรของทะเลายปาล์มด้วยเทคนิคภาพสามมิติ จากนั้นนำข้อมูลปริมาตรที่ได้มาคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาเพื่อสามารถทำนายปริมาณน้ำมันของทะเลายปาล์ม
6. พัฒนาโปรแกรมโดยเน้นการนำไปใช้งานบนอุปกรณ์แบบพกพา
7. ทดสอบโปรแกรมกับข้อมูลตัวอย่าง พร้อมทั้งปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น
8. เขียนบทความทางวิชาการ และเขียนสิทธิบัตร
9. เขียนรายงานความก้าวหน้า และรายงานฉบับสมบูรณ์

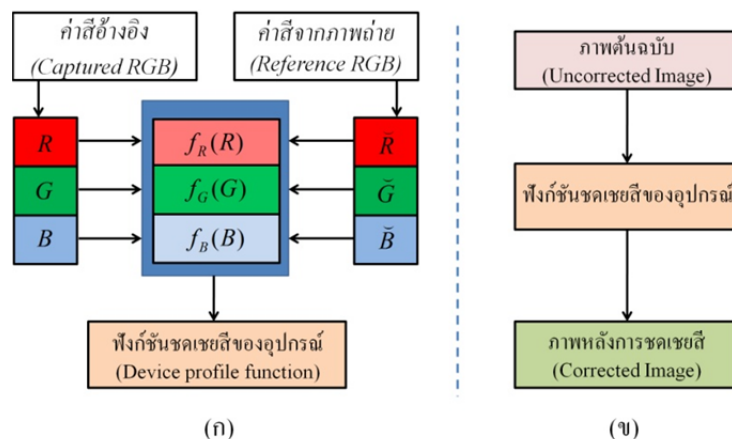
# วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

## 1. การประมวลผลภาพเบื้องต้น

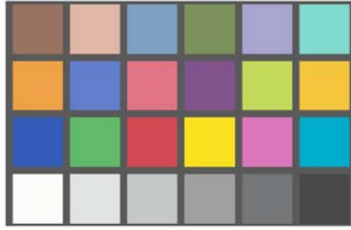
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น โดยมีการนำเสนอกระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่นกัน (Device-dependence effect color correction, DDC) อย่างละเอียดรวมถึงกรรมวิธีการทดสอบกระบวนการและประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการดังกล่าว กระบวนการชดเชยสีเป็นกระบวนการสำคัญมากเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำให้ค่าสีของภาพถ่ายจากกล้องทุกกล้องและทุกสภาวะมาอยู่ในระบบมาตรฐานอ้างอิงเดียว เมื่อภาพสีมาอยู่ในค่ามาตรฐานอ้างอิงเดียวแล้ว การประมวลผลเพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจค่าสีของผลปาล์มที่กล้องถ่ายจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเดียวได้ ดังนั้น แนวคิดของกระบวนการชดเชยค่าสีนี้จะปรับค่าสีของภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพใดๆและในทุกสภาวะแสงใดๆให้มาอยู่ในระบบค่าสีเดียวและมีขั้นตอนการจัดการให้มีระบบสีเดียวกันนี้โดยใช้ค่าสีของภาพมาตรฐานเป็นค่าอ้างอิงในการชดเชย

### 1.1. กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น

กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่นกันที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้มีสองขั้นตอน คือ การหาฟังก์ชันอุปกรณ์ (Device profile function) ฟังก์ชันอุปกรณ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะเลนส์ดิจิทัลในกล้อง อัลกอริทึมสำหรับประมวลผลภาพของกล้อง เป็นต้น รายละเอียดขั้นตอนของวิธีการคำนวณฟังก์ชันอุปกรณ์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 1(ก) ขั้นตอนหาฟังก์ชันจะใช้อัลกอริทึมคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์นี้จะคำนวณจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าสีอ้างอิงกับค่าสีที่ได้จากการถ่ายภาพที่อ้างอิงได้ ขณะที่ขั้นตอนที่สองจะเป็นการชดเชยสีด้วยฟังก์ชันอุปกรณ์ที่สังเคราะห์จากขั้นตอนที่ 1 ฟังก์ชันของกล้องที่ได้จะนำมาสังเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สำหรับชดเชยและบันทึกในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ควบคุมกล้องในอุปกรณ์แบบพกพา ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจะถูกประมวลโดยฟังก์ชันสังเคราะห์จากสัมประสิทธิ์มาชดเชยค่าสีของภาพ ผลลัพธ์ของภาพสีที่ได้จะเป็นภาพที่มีค่าสีที่ผ่านการชดเชยแล้วตามขั้นตอนแสดงในรูปที่ 1(ข)



รูปที่ 1 กระบวนการชดเชยสีสำหรับอุปกรณ์กล้องต่างรุ่น  
(ก) การหาฟังก์ชันชดเชยสีของอุปกรณ์ และ (ข) กระบวนการชดเชยสี



รูปที่ 2 แผ่นภาพสีอ้างอิง (Standard GretagMacbeth color checker)

ในโครงการวิจัยนี้ ข้อมูลอ้างอิงสำคัญสำหรับการสังเคราะห์ฟังก์ชันชดเชยสีของกล้องคือค่าสีบนปริภูมิ RGB (RGB space) ของแผ่นภาพสีอ้างอิง (Reference color template) รูปที่ 2 แสดงแผ่นภาพสีอ้างอิง (Standard GretagMacbeth color checker) ซึ่งเป็นแผ่นสีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับและใช้งานเทียบเคียงเพื่อวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนสีของภาพ แผ่นมาตรฐานนี้ประกอบด้วยแผ่นสีเหลี่ยมเล็กๆที่แถวหกคอลัมน์รวมทั้งสิ้น 24 สี ค่าสีบนปริภูมิ RGB ของแต่ละแผ่นภาพได้ถูกกำหนดไว้แล้วทั้ง 24 สีเพื่อใช้ในการอ้างอิง ค่าสีดังกล่าวแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสีอ้างอิงบนปริภูมิ RGB จากแผ่น Standard GretagMacbeth color checker

[116,81,67]	[199,147,129]	[91,122,156]	[90,108,64]	[130,128,176]	[92,190,172]
[224,124,47]	[68,91,170]	[198,82,97]	[94,58,106]	[159,189,63]	[230,162,39]
[35,63,147]	[67,149,74]	[180,49,57]	[238,198,20]	[193,84,151]	[0,136,170]
[245,245,243]	[200,202,202]	[161,163,163]	[121,121,122]	[82,84,86]	[49,49,51]

หมายเหตุ: ตำแหน่งของตารางจะตำแหน่งแผ่นสีในรูปที่ 2

ในการพัฒนากระบวนการชดเชยสีภาพของกล้อง ค่าสีอ้างอิงจากแผ่น Standard GretagMacbeth color checker จะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำบนคอมพิวเตอร์ควบคุมกล้องที่ต้องการชดเชย จากนั้น จะถ่ายภาพแผ่น Standard GretagMacbeth color checker ด้วยกล้องที่ต้องการชดเชย แล้วนำค่าสีบนปริภูมิ RGB ของภาพแผ่น Standard GretagMacbeth color checker ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าสีอ้างอิงบนปริภูมิ RGB ทั้งนี้ สภาวะการถ่ายภาพแผ่นในขณะนั้นจะต้องถูกควบคุม เนื่องจากแต่ละภาพถ่ายที่ได้จากกล้องแต่ละรุ่นต่างมีความละเอียดของจุดภาพ (Resolution image) แตกต่างกัน ค่าสีบนปริภูมิ RGB ของภาพถ่ายแผ่น Standard GretagMacbeth color checker ในแต่ละแผ่นสีจากกล้องจะมีหลายค่า การเปรียบเทียบค่าสีของแผ่นสีจากภาพถ่ายอ้างอิงในตารางที่ 1 ซึ่งมีเพียงค่าเดียวกับในแต่ละแผ่นภาพตามตารางที่ 1 กับค่าสีของแผ่นสีที่ถ่ายจากกล้องจะกระทำไม่ได้ทันทีเนื่องจากมิติของขนาดข้อมูลไม่เท่ากัน ในโครงการวิจัยนี้นำเสนอให้ใช้ค่าเฉลี่ยของจุดสีในปริภูมิมิติของแผ่นสี (Spatial mean) ดังนี้ กำหนดให้ เวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยจุดสีแต่ละแผ่นสีที่ถ่ายจากกล้องที่ต้องการชดเชยถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $[R, G, B]$  ในโครงการวิจัยนี้จะเรียกค่าเวกเตอร์สีนี้ว่า RGB บันทึก(captured RGB) สำหรับเวกเตอร์ของค่าสีอ้างอิง (Reference RGB) จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $[\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B}]$  ฟังก์ชันของอุปกรณ์ของแต่ละแกนสี ( $f_R(\cdot), f_G(\cdot)$  และ  $f_B(\cdot)$ ) จะถูกคำนวณแยกตามแต่ละระนาบสีดังสมการที่ (1)



$$\begin{aligned}\check{R} &= f_R(R) \\ \check{G} &= f_G(G) \\ \check{B} &= f_B(B)\end{aligned}\tag{1}$$

ในโครงการวิจัยนี้เลือกสมการแบบพหุนามอันดับที่สอง (Second-order polynomial) สำหรับอธิบายฟังก์ชันอุปกรณ์เนื่องจากผลการวิจัยเบื้องต้นพบว่าสมการแบบพหุนามอันดับที่สองเหมาะสมที่สุดในประเด็นความแม่นยำและความง่ายต่อการพัฒนา สมการพหุนามอันดับสองของฟังก์ชันแต่ละระนาบสีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned}\check{R} &= \alpha_{R,2}R^2 + \alpha_{R,1}R + \alpha_{R,0} \\ \check{G} &= \alpha_{G,2}G^2 + \alpha_{G,1}G + \alpha_{G,0} \\ \check{B} &= \alpha_{B,2}B^2 + \alpha_{B,1}B + \alpha_{B,0}\end{aligned}\tag{2}$$

เมื่อ  $\alpha_{R,i}$ ,  $\alpha_{G,i}$  และ  $\alpha_{B,i}$  คือค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเขยสีบนระนาบ แดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถเขียนให้ในรูปของเมตริกซ์ของสมการถดถอย (Regression equation) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\begin{bmatrix} \check{x}_1 \\ \check{x}_2 \\ \check{x}_3 \\ \vdots \\ \check{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{x,0} \\ \alpha_{x,1} \\ \alpha_{x,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}\tag{3}$$

เมื่อ  $\check{x}_i$  คือค่าสีอ้างอิงแต่ละระนาบสีของแผ่นภาพที่  $i$   
 $x_i$  คือค่าสีของแต่ละระนาบสีจากการเฉลี่ยค่าสีที่ถ่ายได้จากแผ่นภาพที่  $i$   
 $\alpha_{x,i}$  คือค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเขยสีสำหรับระนาบสีนั้นบนแผ่นภาพที่  $i$   
 $e_i$  คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการชดเชยไม่สมบูรณ์ของแผ่นภาพที่  $i$  และ  
 $n$  คือจำนวนแผ่นภาพ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้มี 24 แผ่นภาพ

ในโครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีการถดถอยแบบกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least-square regression) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha_{x,i}$  วิธีการถดถอยแบบนี้เป็นวิธีคำนวณเชิงเมตริกซ์ที่นิยม แม้ว่าจะมีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนเนื่องจากต้องประยุกต์ใช้อัลกอริทึมทางเมตริกซ์ แต่เป็นวิธีการมาตรฐานและให้ความแม่นยำสูงภายใต้สมมติฐานของความเป็นออร์ทอกอรัล (Orthogonality) ระหว่างปริภูมิของข้อมูลและความคลาดเคลื่อน รูปแบบของการวิเคราะห์ดังปรากฏในสมการที่ (4)

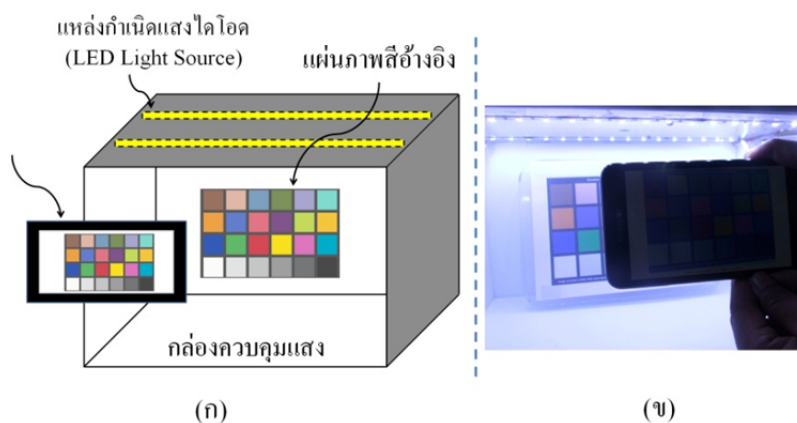
$$\alpha = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \check{\mathbf{x}}\tag{4}$$

โดยที่  $\alpha$  คือเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์สำหรับชุดเขยสี  
 $\mathbf{X}$  คือเมตริกซ์แวนเดอร์มอนด์ (Vandermonde matrix) ของค่าสีที่ได้จากภาพถ่ายแผ่นภาพสีอ้างอิงและ  
 $\check{\mathbf{x}}$  คือเวกเตอร์ของค่าสีอ้างอิง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปแทนในสมการที่ (2) จะได้ฟังก์ชันชดเชยสีของอุปกรณ์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการชดเชยสีดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ต่อไป

## 1.2. ประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสี

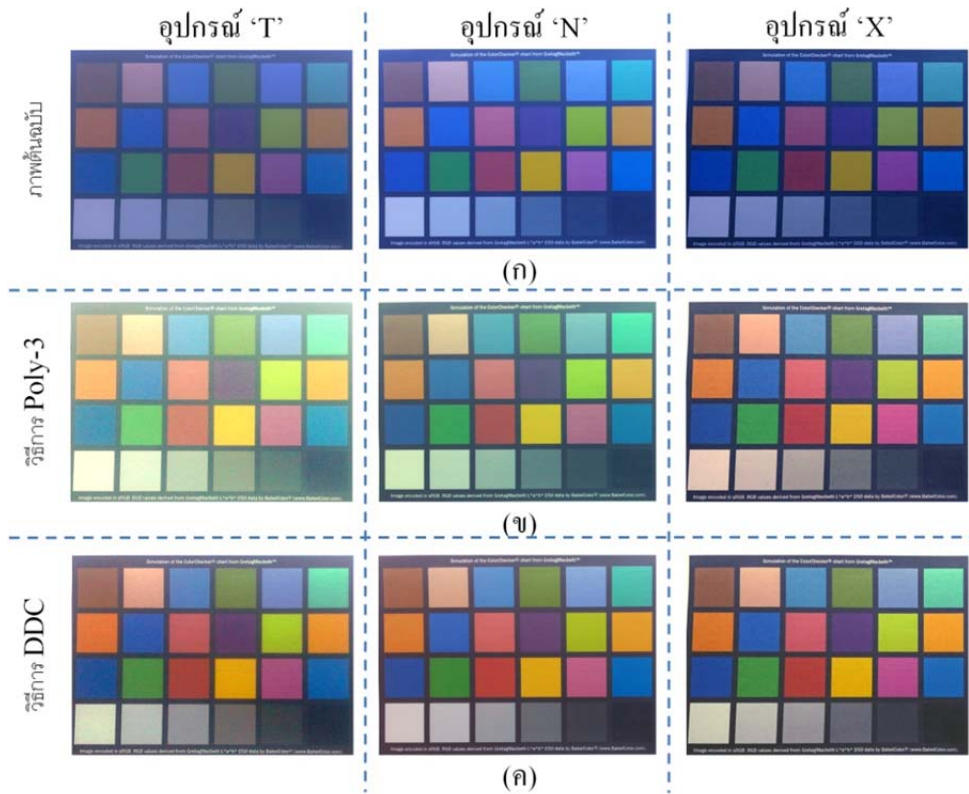
ในหัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการทดสอบและนำเสนอประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสีที่นำเสนอโดยอ้างอิงกับแผ่นภาพสีอ้างอิง GretagMacbeth ColorChecker จำนวน 24 สี โปรแกรมที่พัฒนาตามกระบวนการที่นำเสนอในรูปที่ 1ก และ ข จะติดตั้งในคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมอุปกรณ์กล้อง ระบบกล้องที่ใช้ทดสอบในโครงการวิจัยนี้ได้ติดตั้งมาพร้อมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3 รุ่นได้แก่ Samsung GT-P1000 (T), Samsung Galaxy Note (N) และ Sony Xperia Z (X) ทั้งระบบมีการกำหนดค่าการวัดแสงอัตโนมัติ ปรับสมดุลสีขาวอัตโนมัติ สำหรับการควบคุมการรบกวนจากแสงภายนอก ในโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการควบคุมด้วยชุดกล้องควบคุมแสงดังแสดงในรูปที่ 3(ก) กล้องควบคุมแสงดังกล่าวมีแหล่งกำเนิดแสงไดโอด (Light emitting diode, LED) จำนวน 2 แถวติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของกล่องควบคุมแสง ณ ผนังด้านในของกล่องควบคุมจะติดแผ่นภาพสี GretagMacbeth ColorChecker ซึ่งจะเป็นภาพสำหรับให้กล้องของด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสามรุ่นที่จะทดลองถ่าย ระยะระหว่างกล้องกับกล่องควบคุมจะกำหนดไว้และลักษณะการทดลองในโครงการวิจัยนี้แสดงดังภาพถ่ายจริงในรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 3 ภาพแสดงการทดลองกระบวนการชดเชยสีด้วยกระบวนการชดเชยสี DDC

(ก) แบบจำลองการทดลอง (ข) การทดลองจริง

รูปที่ 4(ก) แสดงภาพถ่ายของแผ่นภาพสีอ้างอิงจากกล้องทั้งสามรุ่นโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะสีที่แตกต่างกันเฉพาะตัวอุปกรณ์ เปรียบเทียบกับภาพสีหลังจากชดเชยสีด้วยวิธีการ Poly-3 (Wang and Zhang, 2010) และกระบวนการ DDC ที่นำเสนอ ผลลัพธ์ของภาพสีที่ได้จากสองกรณีหลังจากการชดเชยแล้วแสดงดังรูปที่ 4(ข)-(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4 ภาพถ่ายของแผ่นภาพสีอ้างอิงจากกล้องดิจิทัล 3 รุ่น (ก) ภาพต้นฉบับจากกล้อง (ข) ภาพที่ถูกชดเชยด้วยกระบวนการ Poly-3 และ (ค) ภาพที่ถูกชดเชยด้วยกระบวนการ DDC

สำหรับการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสีสามารถทำได้โดยการหาผลรวมของระยะทางแบบยูคลิด (Total Euclidian distance,  $E_T$ ). ค่า  $E_T$  สามารถแสดงในสมการที่ (5)

$$E_T = \sum_{j=1}^n \sqrt{(R'_j - \check{R}_j)^2 + (G'_j - \check{G}_j)^2 + (B'_j - \check{B}_j)^2} \quad (5)$$

เมื่อ  $R'_j, G'_j, B'_j$  คือค่าสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของช่องสี  $j$  ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับค่าสีอ้างอิง จากสมการ (5) หากสีภาพไม่ผิดเพี้ยน ค่าผลรวมของระยะทางแบบยูคลิดควรจะมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่หากค่าสีของภาพผิดเพี้ยนมากที่สุด ค่าผลรวมของระยะทางแบบยูคลิดจะมีค่าถึง 7511

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากแผ่นภาพสีอ้างอิงจำนวน 24 สี ( $n=24$ ) จากผลในตารางที่ 1 ค่า  $E_T$  ที่ได้กรณีค่าสีจากภาพที่ไม่ได้ชดเชยด้วยกระบวนการชดเชยจะมีค่ามาก กล้องจากอุปกรณ์ Sony Xperia Z ให้ค่า  $E_T$  ที่มากที่สุดในกลุ่มกล้องทั้ง 3 ตัวบ่งถึงค่าสีจากกล้องนี้ผิดเพี้ยนเพื่อเทียบกับค่าสีอ้างอิงมากที่สุด ขณะที่กล้องจาก Samsung GT-P1000 ให้ค่า  $E_T$  น้อยที่สุด บ่งถึงความเพี้ยนสีจากค่าสีอ้างอิงน้อยที่สุด และเมื่อนำข้อมูลดิจิทัลจากภาพถ่ายที่ได้จากทุกกล้องไปชดเชยด้วยวิธีการชดเชย Poly และ DDC ผลปรากฏว่าวิธีการ DDC ที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ให้ผลรวมระยะทางแบบยูคลิดน้อยกว่าผลที่ได้จากวิธีการ Poly-3 ทั้งสามกล้อง วิธีการ DDC สามารถชดเชยค่าสีให้ใกล้เคียงกับค่าสีอ้างอิงได้ดีที่สุด โดยพบว่าค่าผลรวมระยะทางแบบยูคลิดของค่าสีจากภาพที่ชดเชยด้วยวิธี DDC ลดลงโดยเฉลี่ยถึง 59% นั้นหมายถึงความเพี้ยนของสีลดลงไปจากเดิมมากถึง 59% ทั้งนี้การชดเชยภาพสีที่ดีที่สุดเกิดขึ้นกับกล้อง Sony Xperia Z

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสีจากการเปรียบเทียบค่าของผลรวมระยะทางแบบยุคลิด

รุ่นของกล้อง	ค่าของผลรวมระยะทางแบบยุคลิด ( $E_T$ )				
	ไม่ชดเชย	วิธีการ Poly-3		วิธีการ DDC	
		$E_T$	อัตราการลด (%)	$E_T$	อัตราการลด (%)
Samsung GT-P1000	1683	827	51	727	57
Samsung Galaxy Note	1771	894	50	783	56
Sony Xperia Z	1920	753	61	690	64
ค่าเฉลี่ย	1791	825	54	734	59

กระบวนการชดเชยสีที่มีประสิทธิภาพจะต้องให้ผลลัพธ์ค่าสีที่ถูกชดเชยแล้วให้ค่าใกล้เคียงกับค่าสีอ้างอิงมากที่สุด โดยสามารถเปรียบเทียบได้ด้วยสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$y = mx + c \quad (6)$$

เมื่อ  $x, y$  คือชุดข้อมูลของค่าสีที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบและค่าสีอ้างอิงตามลำดับ

$m, c$  คือค่าความชันและจุดตัดแกน  $y$  ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $c$  สองค่านี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่ระบุประสิทธิภาพของกระบวนการชดเชยสีได้ หากกระบวนการชดเชยสีที่ประยุกต์ใช้มีประสิทธิภาพ ค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $c$  จะต้องใกล้เคียงกับค่า 1 และ 0 และหากค่า สัมประสิทธิ์  $m$  และ  $c$  มีค่าเป็น 1 และ 0 แล้วหมายความว่ากระบวนการชดเชยสีได้ชดเชยสีอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 2 แสดงผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $c$  ของสมการเส้นตรงที่วิเคราะห์ได้ .ในตารางได้แสดง การเปรียบเทียบระหว่างค่าสีอ้างอิงกับค่าสีของภาพถ่ายจากกล้องทั้งสามกล้องที่ยังไม่ชดเชย ผลลัพธ์ของการ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยสมการเส้นตรงระหว่างค่าสีสองชุดในปริภูมิเวกเตอร์ R G และ B พบว่า ค่าสีที่ ไม่ได้ชดเชยทั้งสามกล้องและสามปริภูมิผิดเพี้ยนจากค่าสีอ้างอิงมาก หากพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทั้ง สามกล้องและทุกปริภูมิในกรณีที่ไม่ได้ชดเชยด้วยกระบวนการชดเชยแล้วพบว่าค่าสีจะผิดเพี้ยนจากค่าสีอ้างอิง มาก โดยเหตุนี้ที่โครงการวิจัยนี้ต้องเสนอกระบวนการชดเชย ในตารางที่ 2 เมื่อประยุกต์ใช้กระบวนการชดเชย ค่าสีด้วยวิธีการ Poly-3 และ DDC แล้ว ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลค่าสีที่ถูกชดเชยแล้วบนปริภูมิ เวกเตอร์ RGB เทียบกับค่าสีอ้างอิงด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ (6) พบว่า วิธีการ DDC ให้ภาพสีจากกล้องทั้ง สามกล้องบนปริภูมิเวกเตอร์ RGB ได้ใกล้เคียงกับค่าสีอ้างอิงมาก โดยสามารถพิจารณาได้จากค่า  $m$  และ  $c$  ที่มี ค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติ ผลลัพธ์ของค่า  $m$  และ  $c$  จากทั้งสามกรณีเทียบเคียงได้แก่ กรณีภาพที่ไม่ได้ชดเชย กรณีชดเชยด้วย Poly-3 และกรณีชดเชยด้วย DDC พบว่ามีระดับความเชื่อมั่นใกล้เคียงกันทั้งนี้ผู้วิจัยได้ วิเคราะห์จากค่าความผิดพลาดสะสมจากการวิเคราะห์ถดถอย นอกจากนี้ ระดับความเชื่อมั่นของค่า  $m$  และ  $c$  ที่ได้จากกรณีชดเชยด้วยกระบวนการ DDC มีมากกว่ากรณีที่ชดเชยด้วยวิธีการ Poly-3 และกรณีที่ไม่ชดเชยด้วย กระบวนการชดเชย ในตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า วิธี DDC ที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ของสีใกล้เคียง มากและค่าสีที่ได้ผิดเพี้ยนน้อยกว่าค่าสีที่ชดเชยแล้วจากกระบวนการชดเชยสีด้วยกระบวนการ Poly-3 อย่าง ชัดเจน นอกจากนี้ กระบวนการชดเชย DDC สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตารางเชื่อมโยงข้อมูล (Look up table) เพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลได้อีกด้วย

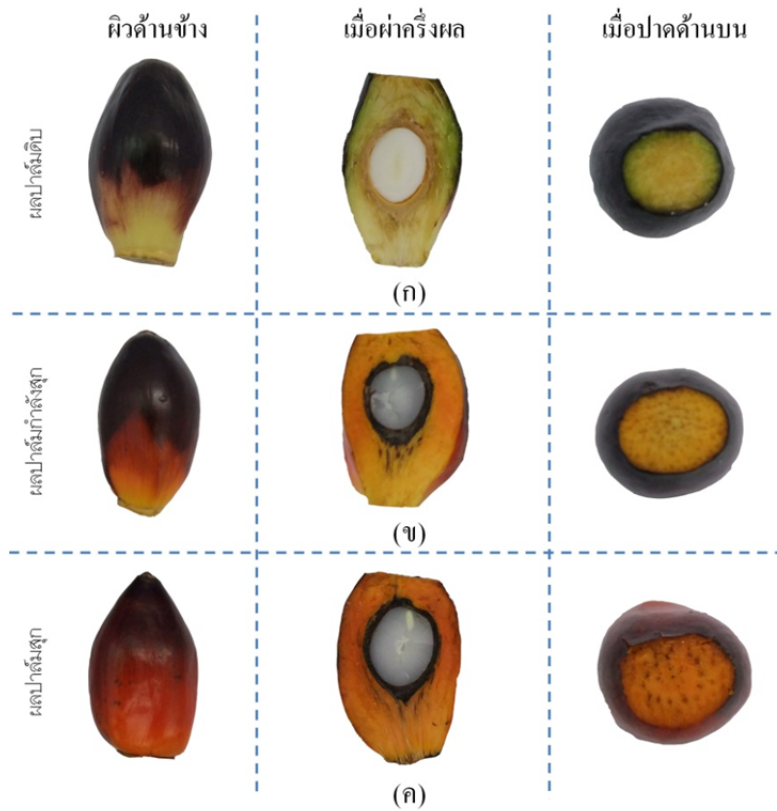
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงระหว่างค่าสีอ้างอิงกับค่าสีต้นฉบับและค่าสีที่ถูกชดเชย

กล่อง		ภาพที่ไม่ชดเชย			วิธีการ Poly-3			วิธีการ DDC		
		Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual
T	R	1.79	-33.25	93.68	1.03	-5.19	90.1	1	-0.13	93.32
	G	2.02	-83.9	100.93	1.23	-31.81	112.32	1	0.16	95.76
	B	1.41	-86.6	101.52	1.2	-26.52	112.28	1	-0.12	95.95
N	R	1.12	21.05	108.12	0.95	8.5	110.91	1	-0.06	87.85
	G	1.13	-11.9	112.45	1.01	-0.79	106.57	1	0.01	112.69
	B	0.93	-37.47	121.83	1.27	-37.74	120.28	1	0.16	102.35
X	R	1.46	25.98	91.26	0.96	6.94	91.26	1	0	90.92
	G	1.49	-7.66	103.32	1.02	-2.89	102.98	1	0.12	100.77
	B	1.09	-32.18	94.85	1.16	-21.76	100.31	1	0.23	92.24
เฉลี่ย		1.38	-27.33	103.11	1.09	-12.36	105.22	1.00	0.04	96.87

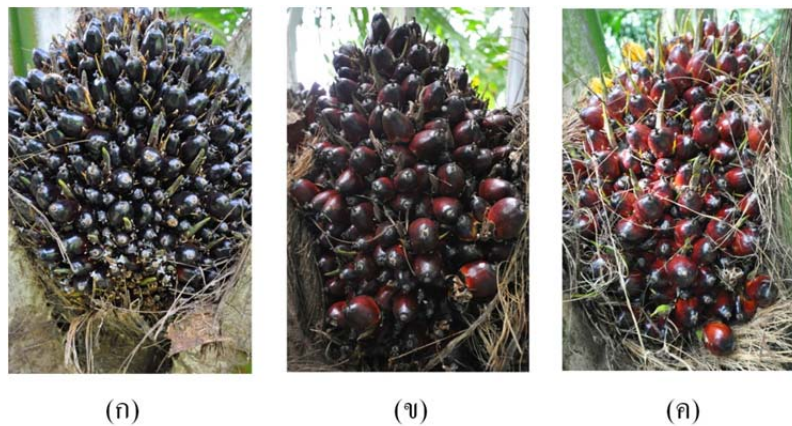
## 2. ลักษณะสีของผลและทะลายปาล์มน้ำมัน (Color characteristics of oil palm fruit and bunch)

รงควัตถุ (Natural pigment) คือองค์ประกอบพื้นฐานของสีในสิ่งมีชีวิตที่ปรากฏ เช่น สีใบ ดอก ผลของพืช รวมถึงผิวหนังของสัตว์ สำหรับผลปาล์มน้ำมันมีรงควัตถุคือคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และ แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) คลอโรฟิลล์คือสารสีเขียวที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของพืชที่ดูดซับคลื่นแสงในช่วง 430 และ 670 นาโนเมตร แคโรทีนอยด์เป็นสารสีส้มแดงสามารถสกัดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเรียกว่าแคโรทีน เช่น อัลฟา-แคโรทีน และ เบต้า-แคโรทีน สำหรับรงควัตถุพื้นฐานสุดท้ายคือแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ซึ่งสีที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับสภาวะกรดหรือด่าง สำหรับในผลปาล์ม รงควัตถุแอนโทไซยานินจะผสมกับสารฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และปรากฏเป็นสีเหลืองส้มโดยจะดูดกลืนคลื่นแสงในย่าน 530 นาโนเมตร

ในขณะที่ผลปาล์มกำลังสุกดังแสดงในรูปที่ 5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตจะลดลงและจะเปลี่ยนไปเป็นกรดกลีเซอไรด์ (Glyceride acid) นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงจะทำให้สีผลปาล์มเปลี่ยนจากเหลืองเป็นแดงส้มซึ่งจะถูกดูดซับคลื่นในช่วง 430 และ 670 นาโนเมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีอิว (Hue) ซึ่งอยู่บนปริภูมิ HSV (Hue Saturation Value) แล้ว พบว่าสีของผลปาล์มจะเปลี่ยนแปลงในช่วง -10 ถึง 70 องศา และค่าสีอิวจะเข้าใกล้ 0 องศา (ซึ่งเป็นสีแดง) มากที่สุดเมื่อผลปาล์มสุกเต็มที่ ส่งผลให้ลักษณะสีของทะลายปาล์มเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6 ค.



รูปที่ 5 สีของผลปาล์มขณะผลปาล์มสุก (ก) ผลปาล์มดิบ (ข) ผลปาล์มกำลังสุก และ (ค) ผลปาล์มสุก



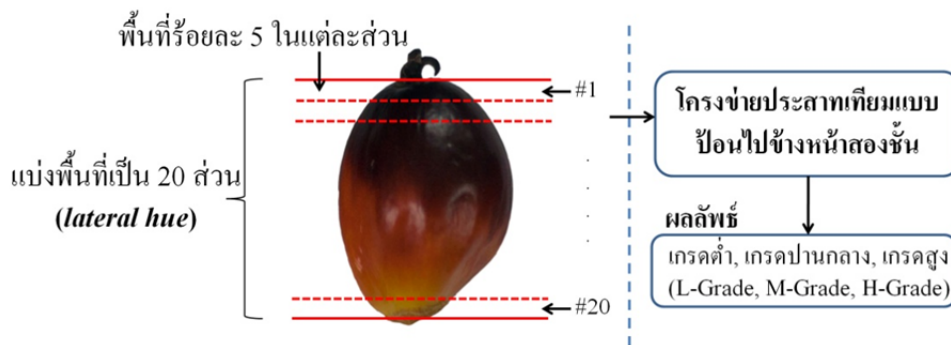
รูปที่ 6 สีของทะลายปาล์มขณะทะลายปาล์มสุก (ก) ทะลายดิบ (ข) ทะลายกำลังสุก และ (ค) ทะลายสุก

### 3. การคัดแยกระดับความสุกและทำนายปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมัน

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงกระบวนการคัดแยกระดับความสุกและทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มน้ำมัน (Oil Extraction Rate : OER) กระบวนการทั้งหมดเริ่มต้นจากการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน เป็น 3 ระดับ เมื่อคัดแยกระดับความสุกแล้ว ผลลัพธ์จะต่อไปยังกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมัน ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยมุ่งศึกษาที่ปาล์มน้ำมันสายพันธุ์ เทอนาร่าลูกสีดำ (var. Negrescens Tenera) เนื่องจากเป็นสายพันธุ์ที่ให้ปริมาณน้ำมันมากที่สุด นอกจากนี้ พันธุ์ปาล์มน้ำมันนี้ได้รับความนิยมเพาะปลูกอย่างมากในหลายประเทศเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประเทศที่เป็นผู้นำการส่งออกของโลก เช่น ไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย เป็นต้น

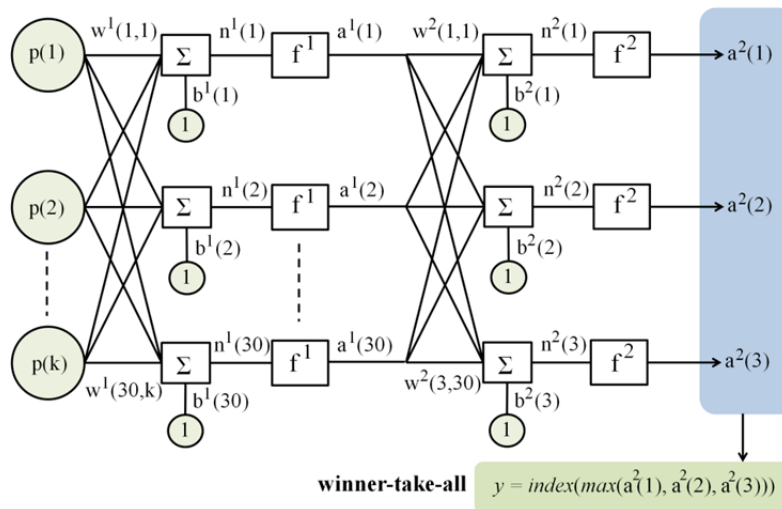
### 3.1. แบบจำลองการแบ่งระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน (Ripeness Degree Classifier: RDC)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC) โดยใช้คุณลักษณะเด่น (Feature) จากสีผิวของผลปาล์มดังแสดงในแผนผังกระบวนการในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพรวมของอัลกอริทึมสำหรับคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 7 สีผิวของผลปาล์ม (Lateral hue) ถูกแบ่งออกเป็น 20 ส่วน ( $k=20$ ) ตามแนวความสูงของผลปาล์มเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าสีผิวในแต่ละส่วน จากนั้นผลลัพธ์จะส่งต่อไปยังตัวคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC) ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าสองชั้น (Two-layer feedforward neural network) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม (RDC)

โครงการวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบซ่อนเลเยอร์ (Layer) ขนาด 30 โหนด(Node) ในรูปที่ 8 โครงข่ายที่นำเสนอประกอบด้วยเลเยอร์ผลลัพธ์ (Output layer) 3 โหนดตามค่าระดับความสุกได้แก่ ระดับความสุกน้อย (L-Grade) ระดับสุกปานกลาง (M-Grade) และระดับสุกมาก (H-Grade) ระดับความสุกของผลปาล์มจะวิเคราะห์จากเทคนิค “winner take all” ซึ่งเลือกค่าน้ำหนักของเลเยอร์ผลลัพธ์ที่ให้ค่ามากที่สุดจากทั้งหมด กำหนดให้ค่าน้ำหนักผลลัพธ์ของแต่ละเลเยอร์คือ  $\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2$  และระดับความสุกของผลปาล์ม  $y$  จะสามารถนิยามได้จากสมการ (7)-(9)

$$\mathbf{a}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1\mathbf{p} + \mathbf{b}^1) \quad (7)$$

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2\mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^2) \quad (8)$$

$$y = \text{index}(\max\{\mathbf{a}^2\}) \quad (9)$$

เมื่อ  $\mathbf{f}^1, \mathbf{f}^2$  คือฟังก์ชันซิกมอยด์ของเวกเตอร์ (Sigmoid function vector) ของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

$\mathbf{p}$  คือเวกเตอร์ของสีผิวของผลปาล์ม

$(\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2)$  คือเมตริกซ์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์ และ

$(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$  คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของเลเยอร์ซ่อนและเลเยอร์ผลลัพธ์

ค่า  $(\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2)$  และ  $(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$  จะคำนวณจากรวมวิธีการเรียนรู้แบบ SCG (Scaled Conjugate Gradient Back propagation training process) ผลลัพธ์ค่าระดับความสุกของผลปาล์ม  $y$  จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อกำหนดเลือกฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่า OER ในกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มในขั้นตอนต่อไป

### 3.2. ประสิทธิภาพของแบบจำลองการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน (RDC Performances)

การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการแบ่งระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมันที่นำเสนอซึ่งใช้หลักการโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนด้านหน้าสองเลเยอร์จะใช้ตัวอย่างผลปาล์มน้ำมันเทอร์ราไรร์สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี 2 จำนวน 45 ตัวอย่างซึ่งผลปาล์มแต่ละผลมีค่า OER ที่วัดได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบซอกท์เลต (Soxhlet extraction, ISO9001:2008) ในการทดลองพบว่าผลปาล์มที่นำมาเป็นตัวอย่างทั้ง 45 ตัวอย่างมีค่า OER ในช่วงร้อยละ 30-73 ตารางที่ 3 กำหนดระดับความสุกของผลปาล์ม 3 ระดับโดยสัมพันธ์กับค่า OER ในกลุ่มตัวอย่าง 45 ตัวอย่างพบว่ามียกระดับความสุกระดับละ 15 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ช่วงปริมาณน้ำมันของผลปาล์มในแต่ละระดับความสุก

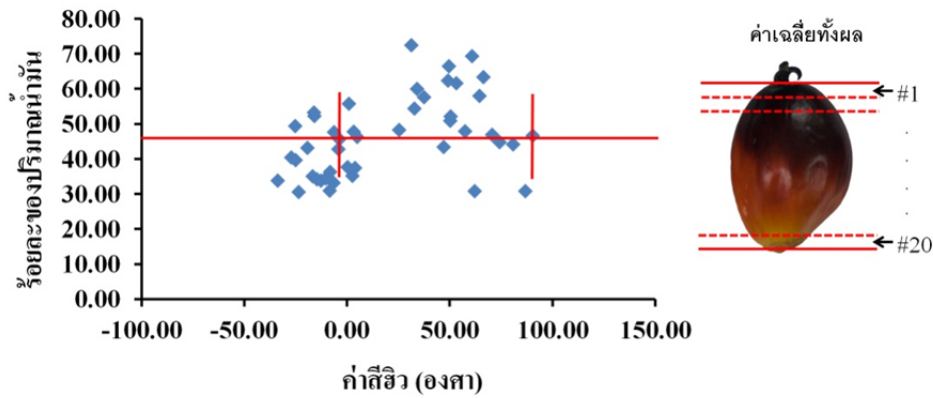
ระดับความสุก	เกรดต่ำ	เกรดปานกลาง	เกรดสูง
OER	30.01-40.00	40.01-50.00	>50.00

ผลการทดสอบพบว่าค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเรียนรู้เท่ากับ 0.0042 ในระหว่างกระบวนการเรียนรู้ไม่พบการจำแนกระดับความสุกผิด นอกจากนี้ เมื่อทดสอบเพิ่มเติมกับผลปาล์ม 64 ผลที่ยังไม่เคยถูกนำไปใช้ในกระบวนการเรียนรู้ไม่พบการจำแนกระดับความสุกที่ผิดพลาดเช่นกัน

### 3.3. กระบวนการทำนาย OER (OER Determination Algorithm)

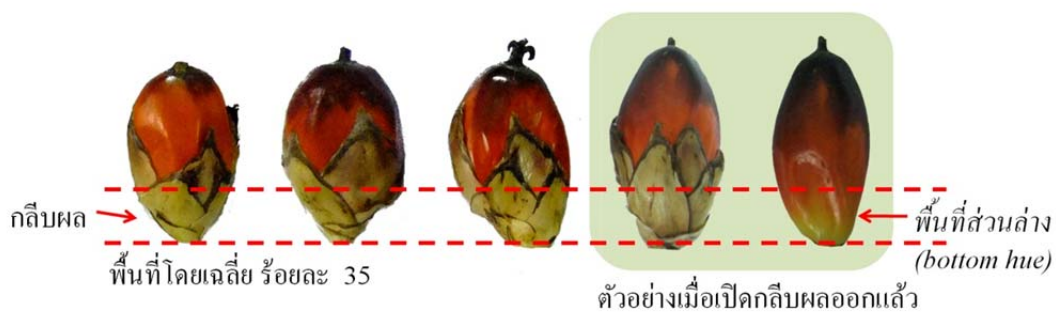
โครงการวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่า OER สามแบบจำลองแยกตามระดับความสุกของผลปาล์มน้ำมัน คณะผู้วิจัยนำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบสมการพหุนามเพื่อให้ระบบทั้งหมดมีความซับซ้อนน้อยที่สุด คุณลักษณะเด่นที่นำมาประยุกต์ใช้คือค่าสีผิวของผลปาล์ม ในการศึกษาครั้งนี้จะค้นคว้าตำแหน่งสีผิวที่เหมาะสมของผลปาล์มในการทำนายโดยจะวิเคราะห์จากภาพถ่ายผลปาล์ม 45 ตัวอย่าง เนื่องจากสีของผลปาล์มมีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเสนอแบ่งภาพผลปาล์มเป็นบริเวณย่อยทั้งสิ้น 20 บริเวณ ค่าสีผิวเฉลี่ยของแต่ละบริเวณจะถูกสมมติให้เป็นตัวแทนของสีผิวในบริเวณนั้น ภายใต้สมมติฐานที่ว่าความแปรปรวนของค่าสีผิวน้อย (กรณีนี้ จะเป็นจริงได้ต่อเมื่อผลปาล์มไม่เน่า ไม่มีตำหนิหรือไม่มีแผล) ทั้งนี้ ในกระบวนการของโครงการวิจัยนี้ ภาพถ่ายผลปาล์มที่มีตำหนิจะถูกคัดออกไปและไม่นำมาศึกษา





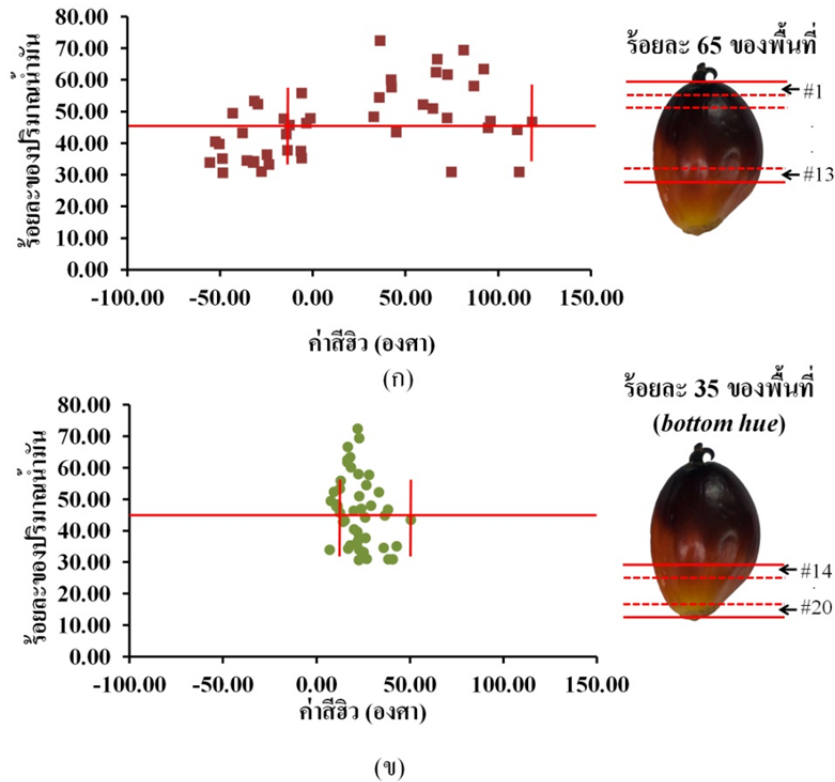
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันกับค่าเฉลี่ยสีอิฐของผลปาล์มทั้งผล

รูปที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยของสีอิฐทั้ง 20 บริเวณของผลปาล์มทั้ง 45 ผลเทียบกับค่า OER ของแต่ละผล กำหนดหมายเลขบริเวณผลปาล์มเป็นหมายเลข #1, #2,...,#19, #20 จากรูปที่ 9 คุณลักษณะเด่นที่นำมาใช้คือ ค่าสีอิฐของทั้งผลปาล์ม การวาดกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยสีอิฐเมื่อเทียบกับค่า OER จาก รูปที่ 9 คณะผู้วิจัยพบการกระจายตัวของข้อมูลสูง ข้อมูลค่าสีอิฐกระจายตั้งแต่ -45 ไปจนถึง 90 -ขณะที่ ข้อมูล OER อยู่ในช่วง 30-73 การสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยคุณลักษณะนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนสูงและอาจไม่เหมาะต่อการพัฒนาลงอุปกรณ์พกพา คณะผู้วิจัยศึกษาแนวทางกลุ่มข้อมูลลักษณะอื่น ๆ ที่มีการกระจายตัวน้อยกว่า เมื่อพิจารณาจากพื้นฐานข้อมูล พบว่าการกระจายของข้อมูลค่าสีอิฐมากเนื่องจากการกระจายของสีทั้งผลปาล์มมาก ดังนั้น แนวทางคือการ จำกัดขอบเขตบริเวณจากทั้งผลเป็นบางส่วนของผลปาล์ม คณะผู้วิจัยแบ่งแนวทางการศึกษาผลปาล์มเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่นอกกลีบ (พื้นที่ส่วนบน, #1-#13) และส่วนที่ถูกปกปิดอยู่ภายใต้กลีบผลปาล์ม (พื้นที่ส่วนล่าง , #14-#20) ส่วนของพื้นที่ที่ปกปิดอยู่ภายในกลีบพบว่า มีพื้นที่ประมาณร้อยละ 35 ของพื้นที่ทั้งหมดดังแสดงใน รูปที่ 10 พื้นที่ดังกล่าวถูกปกปิดด้วยกลีบทำให้ไม่ให้อุณหภูมิภายนอก สภาพแวดล้อมภายนอก เช่น แสงแดด ฝน เป็นต้น และผู้วิจัยพบว่าค่าสีของผลปาล์มในบริเวณนี้มีความแปรปรวนของสีน้อย



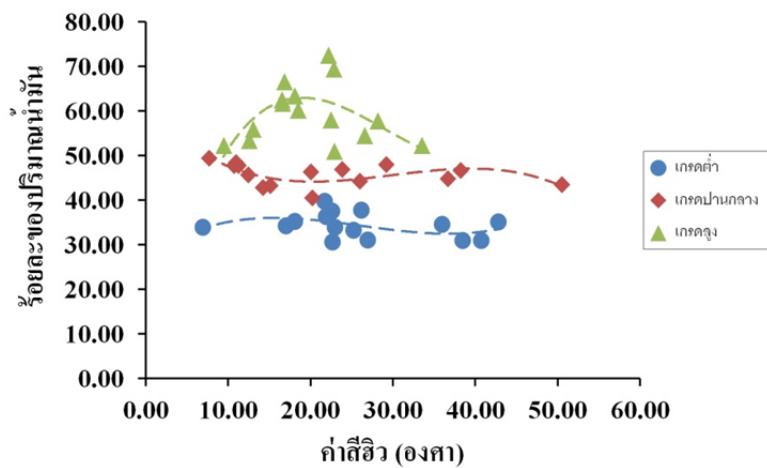
รูปที่ 10 ผลปาล์มที่ถูกปกปิดด้วยกลีบผล

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง OER กับค่าเฉลี่ยของสีอิฐจากบริเวณพื้นที่ส่วนบนและส่วนล่างของ ผลปาล์มจำนวน 45 ผล จากรูป กลุ่มที่มีการกระจายของข้อมูลน้อยที่สุดคือกลุ่มของพื้นที่ส่วนล่างเนื่องจากถูก ปกป้องการรบกวนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้ในการเป็นแบบจำลองเพื่อ ทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันในผลปาล์มของ 45 ผลตัวอย่าง  
(ก) พื้นที่ส่วนบน และ (ข) พื้นที่ส่วนล่าง

จากรูปที่ 11(ข) เมื่อแบ่งชุดข้อมูลออกตามระดับความสูง 3 ระดับตามตารางที่ 3 พบว่ามีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลทั้งสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 12 และสามารถนิยามด้วยสมการพหุนามอันดับสาม (Third order polynomial, cubic function) ดังแสดงในสมการที่ 10

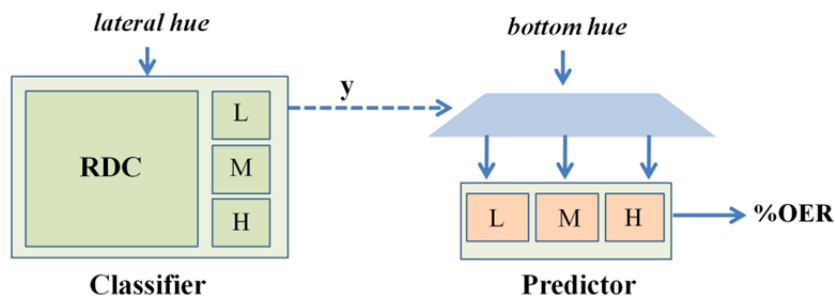


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันในผลปาล์มกับค่าเฉลี่ยสีอิฐบนพื้นที่ส่วนล่างในแต่ละระดับความสูง

$$OER = \sum_{i=0}^3 g_i h^i \quad (10)$$

เมื่อ  $g_i$  คือสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนาย และ  
 $h$  คือค่าเฉลี่ยสีอิฐของบริเวณพื้นที่ส่วนล่าง (bottom hue)

รูปที่ 13 แสดงภาพรวมของกระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม คณะผู้วิจัยสังเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามสำหรับทำนาย OER ในผลปาล์มด้วยการอิงกับค่าผลลัพธ์  $y$  ตามระดับความสุกซึ่งอธิบายไปแล้วในหัวข้อ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามเวกเตอร์มี 3 ฟังก์ชันตามระดับความสุก 3 ระดับ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4 การทำนาย OER ของผลปาล์มใดๆจะต้องผ่านกระบวนการคัดแยกระดับความสุก และเลือกฟังก์ชันและสัมประสิทธิ์ตามกลุ่มระดับความสุก จากนั้น จะต้องคำนวณค่าเฉลี่ยสี่ฮิวเฉพาะบริเวณส่วนล่างของผลปาล์ม นำค่าเฉลี่ยสี่ฮิวที่ได้ไปคำนวณ OER ตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชันในสมการ (10) และสัมประสิทธิ์ใช้ตามระดับความสุกที่นิยามในตารางที่ 4



รูปที่ 13 กระบวนการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมัน

เวกเตอร์	สัมประสิทธิ์			
	$\varrho_3$	$\varrho_2$	$\varrho_1$	$\varrho_0$
เกรดต่ำ	$8.00 \times 10^{-4}$	-0.06	1.30	27.21
เกรดปานกลาง	$-8.00 \times 10^{-4}$	0.07	-2.00	60.93
เกรดสูง	$3.60 \times 10^{-3}$	-0.31	8.03	-0.95

### 3.4. ประสิทธิภาพของกระบวนการทำนาย OER

การทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการทำนาย OER จะทดสอบกับผลปาล์ม 64 ผลที่ไม่เคยนำมาใช้ในกระบวนการเรียนรู้มาก่อน ผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงดังในตารางที่ 5 จากตารางพบว่าค่าปริมาณน้ำมันคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.30 และกระบวนการทำนาย OER ทั้งหมดที่นำเสนอมีความซับซ้อนน้อยและสามารถนำไปประยุกต์พัฒนาบนอุปกรณ์แบบพกพาที่กินไฟต่ำ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ แท็บเล็ต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำมัน			
เฉลี่ย	เกรดต่ำ	เกรดปานกลาง	เกรดสูง
3.30	3.06	1.39	3.82

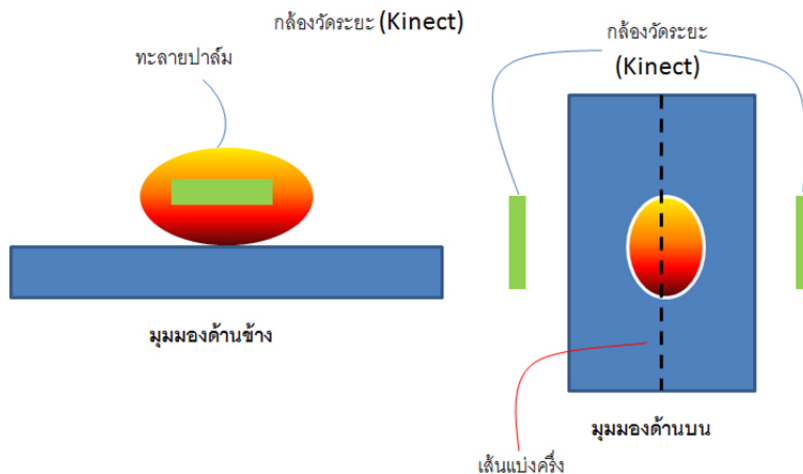
## 4. การทำนาย OER ในทะเลาะปาล์มน้ำมัน

การทำนาย OER ในทะเลาะปาล์มน้ำมันมีหลักการสำคัญคือการคำนวณค่าปริมาตรของทะเลาะปาล์มและเชื่อมโยงไปสู่ค่าน้ำหนักของทะเลาะปาล์ม จากนั้นจะประยุกต์วิธีการวิเคราะห์จากสีของทะเลาะปาล์มและคำนวณหา OER ในที่สุด หากกล่าวโดยละเอียด กระบวนการจะเริ่มค้นหาปริมาตรของทะเลาะปาล์มน้ำมันจาก

การสร้างภาพสามมิติและนำไปคำนวณเป็นน้ำหนักของทะเลายปาล์ม นำค่าของน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของผลปาล์มและ OER ที่ทำนายได้จากกลุ่มตัวอย่างผลปาล์มในทะเลาย

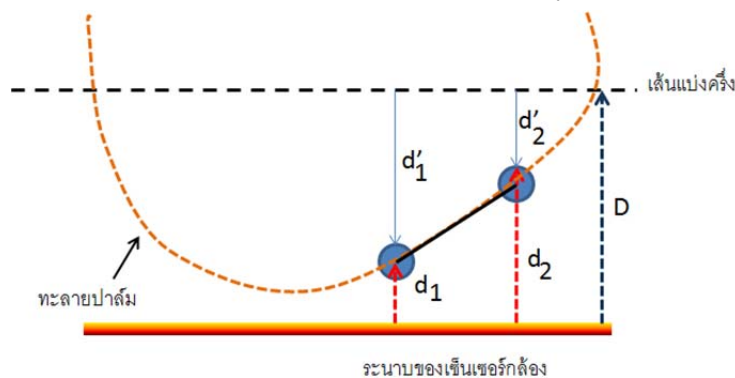
#### 4.1. กระบวนการการทำนาย OER ในทะเลายปาล์มด้วยภาพสามมิติ

เนื่องจากทะเลายปาล์มมีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน การสร้างภาพสามมิติจึงต้องอาศัยวิธีการรวมระยะความลึกจากกล้องวัดระยะเข้าด้วยกัน สำหรับการออกแบบเพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยที่สุด คณะผู้วิจัยเสนอจึงใช้กล้องวัดระยะ (Kinect depth sensor) จำนวน 2 ตัว ถ่ายภาพทะเลายปาล์มทั้งสองด้านมาประกอบกัน โดยมีเส้นแบ่งครึ่งเป็นเส้นอ้างอิงของการวัดระยะของกล้องแต่ละตัว ซึ่งแบบจำลองการทดลองแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แบบจำลองการทดลองหาปริมาตรทะเลายปาล์มด้วยกล้องวัดระยะ

เมื่อพิจารณาเพียงด้านใดด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 15 ความหนาของทะเลายปาล์ม  $d'_i$  ที่วัดจากเส้นแบ่งครึ่งที่จุดใดๆ สามารถคำนวณจากระยะที่อ่านค่าได้จากกล้องวัดระยะ  $d_i$  ดังแสดงในสมการที่ 11



รูปที่ 15 การคำนวณหาความหนาของทะเลายปาล์มจากเส้นแบ่งครึ่งที่จุดใดๆ

$$d'_i = D - d_i \quad (11)$$

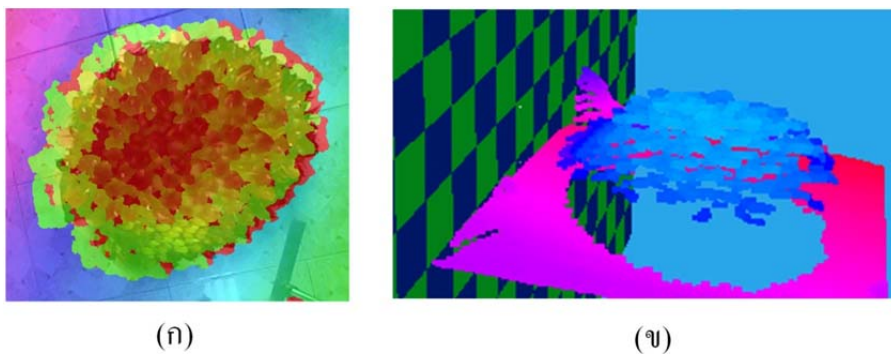
- เมื่อ  $D$  คือระยะห่างระหว่างกล้องกับเส้นแบ่งครึ่ง  
 $d_i$  คือระยะทางที่กล้องวัดระยะอ่านได้ และ  
 $V_p$  คือปริมาตรของทะเลายปาล์ม

จากแบบจำลองสามมิติดังแสดงในรูปที่ 16 สามารถคำนวณปริมาตรของผลปาล์มจากผลรวมของ  $d'_i$  ที่คำนวณได้จากกล้องสองที่ติดตั้ง ค่าปริมาตรคำนวณจากสมการที่ 12 และ OER คำนวณจากสมการที่ 13

$$V_p = \sum d'_i \quad (12)$$

$$v_o = \frac{c\rho_p v_p(OER)}{\rho_o} \quad (13)$$

- เมื่อ  $v_o$  คือปริมาณน้ำมันปาล์ม  
 $\rho_p$  คือความหนาแน่นรวมของทะลายปาล์ม (957.3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)  
 $\rho_o$  คือความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม (887.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)  
 $c$  คือสัดส่วนของมวลเนื้อปาล์มชั้นนอกต่อทะลาย (ร้อยละ 59 ของมวลทะลาย) และ  
 $OER$  คือปริมาณน้ำมันในผลปาล์มที่ถูกสู้ออกไปทำนายด้วยวิธีการดังที่นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ 3



รูปที่ 16 การวัดปริมาตรทะลายปาล์ม (ก) แบบจำลองสามมิติบนทะลายปาล์ม และ (ข) ระยะห่างที่วัดได้

#### 4.2. ประสิทธิภาพของกระบวนการทำนาย OER ในทะลายปาล์ม

คณะผู้วิจัยทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการทำนาย OER ในทะลายปาล์มกับทะลายปาล์มจำนวน 12 ทะลาย ผลลัพธ์ของการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำมันคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 10.29 ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความคลาดเคลื่อนในการหาปริมาตรและการถ่วงน้ำหนักของระดับความสุกในทะลายปาล์มโดยประมาณ อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวโดยเฉลี่ยยังอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้ต่อไป

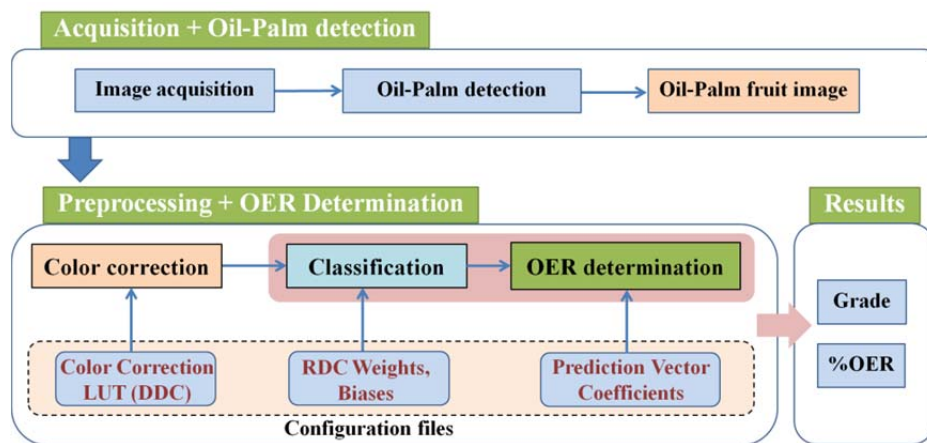
ตารางที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการทำนายปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์ม

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำมัน			
เฉลี่ย	เกรดต่ำ	เกรดปานกลาง	เกรดสูง
10.29	11.06	10.39	9.43

#### 5. การออกแบบโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์มบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่

ในหัวข้อนี้คณะผู้วิจัยได้นำเสนอ การประยุกต์กระบวนการชดเชยสี คัดแยกระดับความสุก ตลอดจนถึงกระบวนการทำนาย OER เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ โปรแกรมดังกล่าวถูกพัฒนาบนพื้นฐานระบบโค้ดแบบเปิดเผย (Open source) ประกอบด้วย OpenCV, JAMA (A java matrix package) และ ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) โครงสร้างของโปรแกรมทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 17 โดยแบ่งเป็น

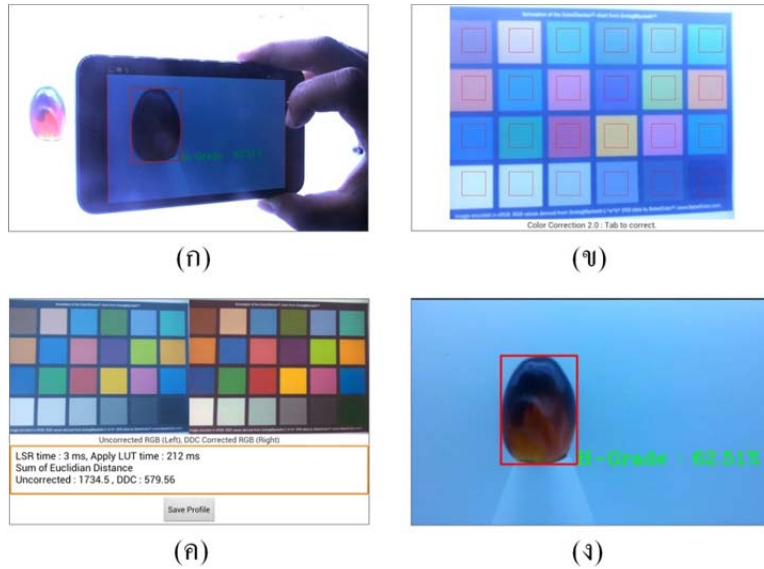
3 ส่วนหลักๆ คือกระบวนการจับภาพผลปาล์ม กระบวนการชดเชยสี และกระบวนการคำนวณ OER ในกระบวนการจับภาพของผลปาล์ม ภาพผลปาล์มจะถูกแยกออกจากพื้นหลังด้วยเทคนิคการหาเส้นรอบรูปของผลปาล์มที่อยู่ในฉาก การประมวลผลภาพจะพัฒนาโดย OpenCV เป็นหลักใน และจะประยุกต์ใช้ JAMA เป็นหลักในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์และสร้างขึ้นบนพื้นฐานระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่มีลักษณะหน้าจอการทำงานแบบโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านทางจอภาพแบบสัมผัส (Graphic user interface, GUI)



รูปที่ 17 โครงสร้างของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม

สำหรับกระบวนการชดเชยสี จะใช้ JAMA เป็นหลักในการประมวลผล โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอยสำหรับสมการชดเชยสีของอุปกรณ์ (device profile function) ซึ่งสามารถลดเวลาในการประมวลผลได้อย่างมาก เนื่องจากพื้นฐานการคำนวณเมตริกซ์มีการเรียกใช้ชุดคำสั่ง แบบ SIMD (Single instruction, multiple data) บนหน่วยประมวลผลกลาง เช่น สถาปัตยกรรม ARM 11 นอกจากการลดเวลาการประมวลผลด้วยชุดคำสั่ง SIMD แล้ว การคำนวณตารางเทียบสีไว้ล่วงหน้าสำหรับกระบวนการชดเชยสีบนพื้นฐานของฟังก์ชัน LUT (Lookup Table) ยังช่วยลดเวลาการประมวลผลเป็นอย่างมาก ทำให้เวลารวมของการประมวลผลโดยรวมต่ำกว่าวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration)

ในกระบวนการคัดแยกระดับความสุกสำหรับผลปาล์ม ค่าน้ำหนักทั้งหมดสำหรับเวกเตอร์ทำนายปริมาณน้ำมันถูกเก็บลงในไฟล์ตั้งค่า โดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งโปรแกรมแล้วแสดงดังรูปที่ 18(ก) ซึ่งมีหน้าจอโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 18(ข-ง)



รูปที่ 18 ตัวอย่างโปรแกรมบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ (ก) ตัวอย่างการใช้งาน (ข) โปรแกรมชดเชยสี (ค) ผลลัพธ์การชดเชยสี (ง) ผลลัพธ์ของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมัน

#### ตารางที่ 8 ระยะเวลาการประมวลผลของโปรแกรมทำนาย OER ในผลปาล์ม

วิธีการคำนวณ	เวลาประมวลผล (มิลลิวินาที)		
	เตรียมภาพถ่าย	คำนวณปริมาณน้ำมัน	รวมเวลา
วนรอบ	$35.80 \times 10^3$	164	$35.96 \times 10^3$
SIMD + LUTs	215	158	373

ผู้เขียนได้ทำการวัดประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม โดยทดสอบบนอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ Samsung Galaxy Note (ARM Cortex A9 Dual Core 1.4GHz, RAM 1 GB) ด้วยภาพถ่ายขนาด 2048x1536 พิกเซล ในรูปแบบ ARGB-8888 ความเร็วในการประมวลผลดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า วิธีการ SIMD + LUTs สามารถลดเวลาประมวลผลได้ร้อยละ 98.94 เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณแบบวนลูปปกติ แต่อย่างไรก็ตามเวลาการประมวลผลที่นำเสนอดังกล่าว ยังไม่รวมเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ อ่าน-เขียน ไฟล์ภาพ ซึ่งเวลารวมทั้งหมดอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมอื่นๆภายในระบบปฏิบัติการอีกมากมาย ซึ่งผลรวมของเวลาประมวลผลในโปรแกรมที่นำเสนอ ใช้เวลาเพียง 379 มิลลิวินาที ซึ่งถือว่าเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับโปรแกรมประมวลผลด้วยเวลาจริง (Real time processing)

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กรรมวิธีการทำนายน้ำมันในผลปาล์มและทะลายปาล์มด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพที่นำเสนอ อยู่บนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ โดยมีกระบวนการหลักที่กระบวนการคือ กระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น กระบวนการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม กระบวนการทำนายน้ำมันในผลปาล์ม และ กระบวนการทำนายน้ำมันในทะลายปาล์ม โดยในกระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้นสามารถลดผลรวมของระยะทางแบบยุคลิดได้ร้อยละ 59 ในกระบวนการคัดแยกระดับความสุกของผลปาล์ม มีพื้นฐานอยู่บนโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าสองชั้นโดยใช้ค่าสีฮิวที่ได้มาจากผิวของผลปาล์มสามารถคัดแยกได้โดยไม่มีผิดพลาด ในกระบวนการทำนายน้ำมันในผลและทะลายปาล์ม มีพื้นฐานอยู่บนสมการพหุนาม และใช้เทคนิคการคำนวณปริมาตรจากภาพสามมิติ ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบด้วยตัวอย่างผลปาล์มจำนวน 64 ผล และทะลายปาล์มน้ำมัน 10 ทะลาย เปรียบเทียบกับวิธีการชอกท์เลต พบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนaylor้อยละของปริมาณน้ำมันในผลและทะลายปาล์มโดยเฉลี่ย 3.30 และ 10.29 ตามลำดับ ในช่วงของปริมาณน้ำมันที่ทดสอบร้อยละ 30-73 โดยในส่วนของกระบวนการทำนายน้ำมันในปาล์ม ได้พัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งติดตั้งอยู่บนโทรศัพท์มือถือเพื่อให้เกษตรกรใช้งานได้ง่าย

คณะผู้วิจัยมีความเห็นว่า ผลสำเร็จของโมเดลและโปรแกรมดังกล่าวดังกล่าวที่นำเสนอ เป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเชิงระบบเครื่องวัดปริมาณน้ำมันในผลและทะลายปาล์มลงบนอุปกรณ์ขนาดเล็ก ใช้งานง่าย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรชาวสวนปาล์มไทยต่อไป



## บรรณานุกรม

- Abbas, Z., Yeow, Y.K., Shaari, A.H., Khalid, K., Hassan, J., Saion, E., 2005. Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor. *IEEE Sensors Journal* 5, 1281–1287.
- Abdullah, M.Z., Guan, L.C., Mohamed, A.M.D., Noor, M. a. M., 2002. Color Vision System for Ripeness Inspection of Oil Palm *Elaeis Guineensis*. *Journal of Food Processing and Preservation* 26, 213–235.
- Abdullah, M.Z., Guan, L.C., Mohd Azemi, B.M.N., 2001. Stepwise Discriminant Analysis for Colour Grading of Oil Palm Using Machine Vision System. *Food and Bioproducts Processing* 79, 223–231.
- Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Shafri, H.Z.M., Saaed, O.M.B., Eshanta, O.M., 2008. Oil palm fruit bunch grading system using red, green and blue digital number. *Journal of Applied Sciences* 8, 1444–1452.
- Balasundram, S.K., Robert, P.C., Mulla, D.J., 2006. Relationship between oil content and fruit surface color in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Plant Sciences* 1, 217–227.
- Barnard, K., Martin, L., Coath, A., Funt, B., 2002. A comparison of computational color constancy Algorithms. II. Experiments with image data. *IEEE Transactions on Image Processing* 11, 985– 996.
- Chiu, L.-C., Fuh, C.-S., 2010. Calibration-based auto white balance method for digital still camera. *Journal of Information Science and Engineering* 26, 713–723.
- Delgado-Vargas, F., Jiménez, A.R., Paredes-López, O., 2000. Natural Pigments: Carotenoids, Anthocyanins, and Betalains — Characteristics, Biosynthesis, Processing, and Stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 40, 173–289.
- Edem, D.O., 2002. Palm oil: Biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological aspects: A review. *Plant Foods Hum Nutr* 57, 319–341.
- Forsyth, D.A., Ponce, J., 2002. *Computer Vision: A Modern Approach*, 1st ed. Prentice Hall.
- Gijsenij, A., Gevers, T., van de Weijer, J., 2011. Computational Color Constancy: Survey and Experiments. *IEEE Transactions on Image Processing* 20, 2475–2489.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L., 2003. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Pearson Prentice Hall.
- Granzier, J.J.M., Brenner, E., Smeets, J.B.J., 2009. Can illumination estimates provide the basis for color constancy?. *Journal of Vision* 9.
- Hagan, M.T., Menhaj, M.B., 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks* 5, 989 –993.
- Hazir, M.H.M., Shariff, A.R.M., Amiruddin, M.D., 2012. Determination of oil palm fresh fruit bunch ripeness—Based on flavonoids and anthocyanin content. *Industrial Crops and Products* 36, 466–475.
- Hsu, E., Mertens, T., Paris, S., Avidan, S., Durand, F., 2008. Light mixture estimation for spatially varying white balance. *ACM Trans. Graph.* 27, 70:1–70:7.

- Huo, J., Chang, Y., Wang, J., Xiao-xia Wei, 2006. Robust automatic white balance algorithm using gray color points in images. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 52, 541–546.
- Junkwon, P., Takigawa, T., Okamoto, H., Hasegawa, H., Koike, M., Sakai, K., Siruntawinetti, J., Chaeychomsri, W., Vanavichit, A., Tittinuchanon, P., Bahalayodhin, B., 2009. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of internal qualities for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq. var. *tenera*). *Agricultural Information Research* 18, 130–141.
- Lam, E.Y., 2005. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography, in: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics, 2005. (ISCE 2005)*. Presented at the Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics, 2005. (ISCE 2005), IEEE, pp. 134–139.
- Lee, D.-J., Archibald, J.K., Xiong, G., 2011. Rapid Color Grading for Fruit Quality Evaluation Using Direct Color Mapping. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 8, 292–302.
- Liu, Y.-C., Chan, W.-H., Chen, Y.-Q., 1995. Automatic white balance for digital still camera. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 41, 460–466.
- Luengarpapong, P., 1980. *Oil Palm*, 1st ed. Department of Plant Science Prince of Songkla University.
- Mohd Hafiz, M.H., Abdul Rashid, M.S., 2011. Oil palm physical and optical characteristics from two different planting materials. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 3, 953–962.
- Mohd. Hudzari Razali, Wan Ishak, Wan Ismail, Abd. Rahman Ramli, Md. Nasir Sulaiman, Mohd. Haniff B. Harun, 2011. Prediction Model for Estimating Optimum Harvesting Time of Oil Palm Fresh Fruit Bunches. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 9, 570–575.
- Mortensen, A., 2006. Carotenoids and other pigments as natural colorants\*. *Pure Appl. Chem.* 78, 1477–1491.
- Palapol, Y., Ketsa, S., Stevenson, D., Cooney, J.M., Allan, A.C., Ferguson, I.B., 2009. Colour development and quality of mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) fruit during ripening and after harvest. *Postharvest Biology and Technology* 51, 349–353.
- Pamornnak, B., Limsirorattana, S., Chongcheawchamnan, M., 2013. Oil Extraction Rate Determination Technique Based on Dielectric Constant of Palm Fruit. *Applied Mechanics and Materials* 303-306, 498–501.
- Park, T.Y., Lee, M.Y., Kim, J.M., Ha, Y.H., 2005. Design and implementation of digital photo kiosk system with auto color-correction module. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 51, 1067 – 1073.
- Razali, M.H., Wan Ismail, W.I., Ramli, A.R., Sulaiman, M.N., Harun, M.H., 2009. Development of Image Based Modeling for Determination of Oil Content and Days Estimation for Harvesting of Fresh Fruit Bunches. *International Journal of Food Engineering* 5.

- Rennick, G., Attikiouzel, Y., Zaknich, A., 1999. Machine grading and blemish detection in apples, in: Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 1999. ISSPA '99. Presented at the Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 1999. ISSPA '99, IEEE, pp. 567–570 vol.2.
- Slaughter, D.C., Crisosto, C.H., Tiwari, G., 2013. Nondestructive determination of flesh color in clingstone peaches. *Journal of Food Engineering* 116, 920–925.
- Suwannarat, S., Khaorapapong, T., Chongcheawchamnan, M., 2012. Prediction of Oil Content in Fresh Palm Fruit based on an Ultrasonic Technique. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 318–324.
- Tan, Y.A., Low, K.W., Lee, C.K., Low, K.S., 2010. Imaging technique for quantification of oil palm fruit ripeness and oil content. *European Journal of Lipid Science and Technology* 112, 838–843.
- Wang, X., Zhang, D., 2010. An Optimized Tongue Image Color Correction Scheme. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on* 14, 1355–1364.
- Wrolstad, R.E., Durst, R.W., Lee, J., 2005. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science & Technology* 16, 423–428.
- Yee, L.K., Abbas, Z., Jusoh, M.A., Yeow, Y.K., Meng, C.E., 2011. Determination of Moisture Content in Oil Palm Fruits Using a Five-Port Reflectometer. *Sensors* 11, 4073–4085.
- Yeow, Y.K., Abbas, Z., Khalid, K., 2010. Application of microwave moisture sensor for determination of oil palm fruit ripeness. *Measurement Science Review* 10, 7–14.

ภาคผนวก

Manuscript Number:

Title: Oil Content Determination Scheme of Oil Palm for Mobile Devices

Article Type: Original Research Paper

Keywords: Oil palm, classification, ripeness degree, oil extraction rate, color correction, RGB, mobile, camera, image processing

Corresponding Author: Dr. Mitchai Chongcheawchamnan,

Corresponding Author's Institution: Prince of Songkla University

First Author: Burawich Pamornnak

Order of Authors: Burawich Pamornnak; Somchai Limsiroratana; Mitchai Chongcheawchamnan

Abstract: In this paper, a simple scheme based on an image processing technique for determining oil content in oil palm fruit implemented for a mobile device is proposed. The scheme has three main algorithms for color correction, classification and oil extraction rate (OER) determination. The color correction algorithm can correct image color from the device-dependence effect in the RGB color model by the device profile function. The classification process is developed on a two-layer feedforward neural network by using features from the hue values of oil palm fruits. The OER determination function is modeled by using the polynomial regression model. The results demonstrate that the proposed scheme can classify and determine the OER with a simple calculation. The scheme is implemented on a mobile device/phone and tested with 64 oil palm fruit samples. Comparing with the standard Soxhlet extraction measurement, the scheme achieves a mean error of OER 3.30 with the OER range of 30-73.

Suggested Reviewers: Dah-Jye Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University, Provo, UT 84602 USA  
djlee@byu.edu

He is an active researcher who currently is working on rapid fruit grading using image processing

Abdul Rashid Mohamed Shariff

Spatial and Numerical Modeling Lab, Institute of Advanced Technology, Universiti Putra Malaysia, Serdang, 43400, Selangor, Malaysia

Rashid@eng.upm.edu.my

He proposed an LED matrix to grade palm quality which is relevant to the subject in the submitted manuscript.

Tomohiro Takigawa

Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tshkaba, Ibaraki, 305-8572, Japan

tobora@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

His research is on Non-destructive determination of internal qualities for oil palm, which is very relevant to the submission.

Ha Yeong Ho

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University, 1370

Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea

yha@ee.knu.ac.kr

He is a researcher who works on color correction device and can make somevaluable suggestions.

October 31, 2013

**Dear, Editor**

Subject: **RESUBMISSION OF MANUSCRIPT FOR EVALUATION (COMPAG-D-13-00128)**

I am enclosing herewith a resubmission manuscript (**COMPAG-D-13-00128**) entitled “Oil Content Determination Scheme of Oil Palm for Mobile Devices” submitted to *Computers and electronics in agriculture* for consideration. Having carefully considered all comments from reviewers and Editor, the manuscript has been considerably enhanced. We made new experimental improvement and characterized with the improved model the reviewers and editor suggested. We rewrote the new submission considerably. In addition, to clearly show what we respond to the comments from three reviewers, we summarize all their comments in the Table and also highlight our responds in the manuscript.

With the resubmission of this manuscript I would like to undertake that the above mentioned manuscript has not been published elsewhere, accepted for publication elsewhere or under editorial review for publication elsewhere.

Sincerely,

Mitchai Chongcheawchamnan

**Editor Comments to Author:**Reviewer #1 (Remarks for the Author):

Title: Oil Content Determination Scheme of Oil Palm for Mobile Devices

*Burawich Pamornnak, Somchai Limsiroratana and Mitchai Chongcheawchamnan*

<b>Reviewer #1 comment</b>	<b>Authors action</b>
1. Please define "RGB" term in the manuscript.	In line 50-51: "RGB" term has been defined.
2. In Figure 11, there is no data between 1% <% OER <30, it will have a high uncertainty in the polynomial modeling.	In section 3: The methodology in this section has been revised.
3. Reviewer suggests that the data for the 0% OER removed from Figure 11, Figure 12 and Figure 13.	We follow what reviewer suggested. In classification process, we designed new classification threshold that grading into three groups, 30-40 % (L-Grade), 40-50% (M-Grade) 50-60% (H-Grade) as shown in Table 3 and new fitting function in OER determination process for each group as shown in Figure 11.
4. In Figure 11, after 40% OER, the hue values seem to be constant with % OER.	
5. Please put the experiment setup photos in the manuscript that the reader will more clearly how these devices work.	The experiment setup photos were added into Figure3 and Figure 14 for mobile device.
6. Is this proposed equipment only can take the image for a single fruit or one bunch of fruit?	This proposed equipment performs on single fruit only.
7. Writing in the "Introduction" section can be further improved.	In line 29-88: Introduction section is improved as the reviewer suggested.
8. The data in Figure 11, Figure 12 and Figure 13 are quite scattered, but how the proposed device can archives mean error of 1.38 % with the OER range of 0.29 % to 56.03% ?	For our new experiment results, the proposed device can achieves OER error of 3.06, 1.39 and 3.82 for L,M and H-Grade, respectively where the absolute OER error (average) is 3.30
9. In the "Introduction" section, author mentioned that the complex permittivity measurement of the oil palm fruit is unable to determine the ripeness degree. This statement is not true, because the ripeness degree can be found from the relationship between the oil content, water content, complex permittivity and week after anthesis as shown in following Figure (available in attached file). The complex permittivity value of oil palm fruits is proportional to water content in the oil palm fruits	Line 43-47: The microwave technique is discussed.



Reviewer #2 (Remarks for the Author):

<b>Reviewer #2 comment</b>	<b>Authors action</b>
<p>In general this paper is good and covered the scope of journal. The mobile application and computing for determination of oil palm content was similarly run as below references which must be cite by author and include in his paper.</p> <p>1. Razali M.H., Wan Ismail W.I., Ramli A.R. Sulaiman M.N. and Harun M.H. (2009), "Development of Image Based Modeling for Determination of Oil Content and Days Estimation for Harvesting of Fresh Fruit Bunches," International Journal of Food Engineering, Vol. 5(2), pp 1633 - 1637</p> <p>2. Mohd. Hudzari Razali,Wan Ishak Wan Ismail, Abd. Rahman Ramli, Md. Nasir Sulaiman, and Mohd. Haniff B. Harun (2011). "Prediction Model for Estimating Optimum Harvesting Time of Oil Palm Fresh Fruit Bunches". Journal of Food, Agriculture &amp; Environment, 9(3&amp;4), pp.570-575. 2011</p>	<p>Line 62: These references are included in this paper.</p>

Reviewer #3 (Remarks for the Author):

<b>Reviewer #3 comment</b>	<b>Authors action</b>
<p>This paper presents three algorithms for evaluating oil palm maturity and oil content. This is a very interesting problem and has values for the palm oil industry. The paper could use a lot of editing. Better writing quality and organization and presentation of the paper are to be desired. There are many redundant and duplicate sentences throughout the paper. Often the presentation is out of order. For example, the authors would raise a question but with no answer and then present the answers in a later section without the question. It makes it hard for a reader to follow. There are typos throughout the paper, e.g., "We a present simple ..." in the Highlights section.</p>	<p>All sections have been revised</p>
<p>Introduction section should be rearranged better. Each paragraph should have its focus point(s). The first two paragraphs are super long paragraphs. Lines 47-50 are redundant. Everyone knows what vision technology can do. Even if the authors feel this discussion is necessary, the references cited are far from being qualified as representations of those fields. Should focus more on the agriculture applications that are related to fruit/vegetable quality grading. Color correction is very important especially for hand-held devices.</p>	<p>In section 1: Line 48-62, this section has been revised.</p>
<p>Line 73: "different illuminants"?</p> <p>Line 75: What is the definition of "device-dependence effect"?</p>	<p>In section 1: Line 73-79 has been revised; "different illuminants" mean the illuminations from light sources are different such as light temperature. "Device-dependence effect" means the color correction algorithm such as automatic white balance which embedded in camera device designed for correct color from different illuminants only. This produces different color tones for different devices.</p>
<p>Lines 80-85 are duplicated in the abstract, introduction, and conclusion. They are redundant and can be removed.</p>	<p>The redundant part has been removed.</p>
<p>The entire Section 2.1 is redundant. Not much useful information is presented. Physically independent does not mean they are actually independent. Each individual channel is still affected by light from different color spectra.</p>	<p>In section 2.1: This section has been revised. As explained in line 114-116, RGB channels in a digital camera are assumed to be physically independent which appropriate to implement for mobile device.</p>
<p>Section 2.2 need to be edited. Lines 119-122 explain a process that should include the Figure 8. This is a good example of poor organization. Questions such as what image information (color pattern) were used and how often must this process be done are without answers. Section 4 actually has better explanation. Sentence in Line 120 is wrong.</p>	<p>In section 2: The preprocessing and their performance section are reorganized.</p>
<p>Lines 141-142 could be explained better with Figure 8.</p>	<p>In section 2: This section is reorganized. For beer explanation, Figure 8 (previous) is moved to shown as Figure 2.</p>
<p>Line 162: is this specifically 530 nm or a range of spectrum?</p>	<p>Line 198: 530 nm is specifically absorbed.</p>
<p>Lines 164-169: A lot of detail on biology only to explain that they have different colors for different maturity level. It is hard to see any value to include this information.</p>	<p>Section 3.1, Line 185-206 is revised.</p>
<p>Sentence in Lines 178-179 does not make any</p>	<p>Section 3.2 is revised and the reference is removed.</p>

sense. References should not be included without a meaningful discussion.	
Line 203: This feature is not nondestructive why include it?	In section 3.2 and 3.4: Destructive feature is not included to classify.
What does Equation (8) mean? Is it based on a polynomial regression? What is the ground truth?	From Equation (10), by our investigation, we have found that each grade is well characterized with cubic function as shown in Figure 11.
Lines 247-249 and Figure 8 should be included in Section 2.1.	In section 2.1: This section is reorganized.
Lines 254-278: The authors first use visual inspection to blindly claim that DDC algorithm works better than others and then propose to use L-2 norm as a more objective similarity measure. The authors then in Lines 276-278 mention the proposed similarity measure is not to be trusted and reverse back to visual inspection. Visually, the three images in Figure 9 (c) captured by three different cameras still appear very different and the proposed similarity measure confirms that. The three images in Figure 10 (c) are also very different. At this point, it is very hard to continue to read the rest.	<p>In section 2: Improved experiment set up is performed. We used auto-exposure and prescribed white-balance functions under while LED source in light-controlled box for all mobile camera devices as shown in Figure 3 to validate our technique.</p> <p>The new ColorChecker results as shown in Figure 4 and the results obtained from DDC as shown in Table 1 are better than others..</p> <p>From the relation between the <i>corrected RGB</i> and the <i>reference RGB</i>, we justify with linear function, from the results are shown in Table 2. DDC algorithm produce linearly function with slope = 1 and offset = 0.04.</p> <p>Finally, DDC algorithm can correct the color information much better than the Poly-3 algorithm. Our DDC algorithm is very appropriate method for mobile implementation with look-up table technique.</p>

## Highlights

- We present a simple oil content determination scheme for palm fruit based on an image processing technique.
- The scheme can be widely implemented in various mobile devices since it includes a color correction algorithm.
- The scheme is practically used since it is designed on an open source platform, hence suitable for a low-cost mobile device.
- The scheme can fast determine oil content in palm fruit and provides high accuracy results.

1 **Oil Content Determination Scheme of Oil Palm for Mobile Devices**

2 **Authors**

3 Burawich Pamornnak<sup>a</sup>, Somchai Limsiroratana<sup>a</sup>, and Mitchai Chongcheawchamnan<sup>a</sup>

4 <sup>a</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
5 Hatyai, Songkhla, Thailand, 90112

6 **Corresponding Author**

7 Mitchai Chongcheawchamnan

8 Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
9 Hatyai, Songkhla, Thailand, 90112

10 E-mail : mitchai@coe.psu.ac.th, Tel +66(0)74287075, Mobile +66(0)864982343

11 Fax +66(0)74287076

12 **Abstract**

13 In this paper, a simple scheme based on an image processing technique for determining oil  
14 content in oil palm fruit implemented for a mobile device is proposed. The scheme has three main  
15 algorithms for color correction, classification and oil extraction rate (OER) determination. The color  
16 correction algorithm can correct image color from the device-dependence effect in the RGB color  
17 model by the device profile function. The classification process is developed on a two-layer  
18 feedforward neural network by using features from the hue values of oil palm fruits. The OER  
19 determination function is modeled by using the polynomial regression model. The results  
20 demonstrate that the proposed scheme can classify and determine the OER with a simple  
21 calculation. The scheme is implemented on a mobile device/phone and tested with 64 oil palm fruit  
22 samples. Comparing with the standard Soxhlet extraction measurement, the scheme achieves a  
23 mean error of OER 3.30 with the OER range of 30-73.

24 **Keywords**

25 Oil palm, classification, ripeness degree, oil extraction rate, color correction, RGB, mobile,  
26 camera, image processing

27

## 28        **1. Introduction**

29            OIL PALM is an important global economic plant because it produces higher oil content  
30 than other oil produced crops. Palm oil is used as a crucial substance to produce several consumer  
31 products including soap, diesel engine fuel, etc. Generally the palm fruit, *var. Tenera*, is most likely  
32 to be chosen to farm due to its being the highest oil producing palm fruit. Farmers can gain much  
33 revenue by trading palm fruit for its oil product. The degree of oil palm fruit ripeness and its oil  
34 content, defined in terms of oil extraction rate (OER), are the key indicators for determining product  
35 quality and pricing. Thus a grading process for palm fruit is required in palm trading markets  
36 nowadays. Currently, this grading process is performed by human experts who can classify palm  
37 fruit quality from color, shape, texture and some other profiles of oil palm. However, human errors  
38 can occur due to work overload. For this reason, numerous nondestructive techniques have been  
39 proposed for classifying palm fruit. A transmission-mode ultrasonic technique has been proposed to  
40 predict oil content in oil palm fruit (Suwannarat et al., 2012). Based on the neural network model, it  
41 was reported that the technique achieved a mean absolute error of 2.2 within the OER range of 20-  
42 60. However, a measurement setup for this ultrasonic technique is required to be installed and hence  
43 difficult for in-field applications. A microwave technique was proposed to measure the moisture  
44 content of oil palm. This is accomplished by measuring the complex permittivity of the palm fruit  
45 (Abbas et al., 2005; Yee et al., 2011; Yeow et al., 2010). Based on dielectric constant permittivity,  
46 the OER determination function is related to average spatial dielectric constant of oil palm fruit  
47 (Pamornnak et al., 2013). Nevertheless, this technique is both complicated and destructive method.

48            Since qualities of agricultural products are related to their peel color information, various  
49 research works on image based nondestructive testing have been continuously reported. An image  
50 classification/recognition algorithm is normally used as a core algorithm where RGB (Red, Green and  
51 Blue) and hue color are usually adopted to characterize color information. For example; a post harvest  
52 quality of mangosteen can be determined from relationship between pericarp hue color and  
53 anthocyanin composition (Palapol et al., 2009), a rapid flesh color determination for clingstone peach  
54 was proposed by forming a relationship between peel and flesh hue degree (Slaughter et al., 2013), a

55 quality grading system for tomato was proposed by forming a color of interest in RGB to a one-  
56 dimensional index color space (Lee et al., 2011). The RGB colors of an apple were transformed to  
57 monochrome prior to applying a feature extraction algorithm for grading apple quality (Rennick et al.,  
58 1999). For image processing applied to oil palm, a machine vision system was applied to classify and  
59 predict oil content in a palm fruit as well as in a palm bunch. Several systems were proposed for  
60 automated industry production by using color feature models such as RGB, HSI, relative reflectance,  
61 etc. (Abdullah et al., 2002, 2001; Alfatni et al., 2008; Balasundram et al., 2006; Junkwon et al.,  
62 2009; Mohd. Hudzari Razali et al., 2011; Razali et al., 2009; Tan et al., 2010).

63 As high performance processor and digital CMOS sensors are commonly embedded in smart  
64 mobile devices (mobile tablet, phone, embedded computer, etc.), many image processing applications  
65 has been continuously applied for various applications. However, it is well known that image color  
66 obtained from a digital camera unavoidably depends on three important factors. These factors include  
67 the camera device, the illumination condition (Barnard et al., 2002; Granzier et al., 2009; Wang and  
68 Zhang, 2010), and the snapshot scene. For a camera device factor, image sensor, lens, as well as  
69 preprocess algorithm embedded in a camera device affect to image color obtained. Consequently, a  
70 preprocess algorithm is needed to correct image color information (Gijzenij et al., 2011; Park et al.,  
71 2005). Color information, if uncorrected, can be distorted and subsequently deteriorate performances  
72 of the core image processing algorithm. Thus from a practical viewpoint, an algorithm called *color*  
73 *correction* has to be implemented. An automatic white balance algorithm (Chiu and Fuh, 2010; Hsu  
74 et al., 2008; Huo et al., 2006; Lam, 2005; Liu et al., 1995) has been implemented and embedded in  
75 camera device to correct color information suffering from different illuminants. Several algorithms  
76 have been proposed such as Gray World, a calibration based technique, and white object purification,  
77 etc. Unfortunately, such methods fail to correct color information suffering from the different camera  
78 device (device-dependence effect). As the author's knowledge, none of them can correct the image  
79 color from device- and illumination-dependence problems simultaneously with a simple calculation.

80 For our application, we proposed a simple scheme which can be implemented on a mobile  
81 device to predict the OER of oil palm fruit using hue color features. The algorithms implemented in

82 our scheme consist of three algorithms for color correction, palm fruit classification and OER  
83 prediction.

84 This paper is organized by addressing the preprocessing process which includes color  
85 correction algorithm and their performances in Section 2. The methodology which includes  
86 classification algorithm, prediction function and their performances will be illustrated in Section 3.  
87 A proposed system design and mobile device implementation are demonstrated in Section 4.  
88 Finally, the conclusion will be drawn in Section 5.

## 89 **2. Preprocessing Process and Performance**

90 This section describes a preprocessing technique proposed in this paper. A color correction  
91 algorithm will be illustrated, followed with their performances.

### 92 **2.1. Device-Dependence Color Correction (DDC)**

93 In this subsection, we present an algorithm which corrects color information for each color  
94 channel from an image from the *device-dependence effect* called DDC (Device-Dependence Color  
95 Correction). It consists of two main steps. The first step, as shown in Figure 1(a), is to estimate the  
96 *device profile function* for the individual R, G and B channels, whereas the second step, shown in  
97 Figure 1(b), is to correct image color with the estimated profile function set.

98 *Figure 1. Here*

99 To estimate a device profile function of a digital camera, reference color information  
100 obtained from GretagMacbeth standard color checker with 24 color patches shown in Figure 2 is  
101 applied as *reference RGB* data set.

102 *Figure 2. Here*

103 First, the color checker is captured by the digital camera required for color correction. The  
104 captured image data was modeled in RGB format. By averaging color information of all pixels in  
105 each color patch area, the captured image information in RGB model called *captured RGB* data set  
106 is obtained. The device profile function is calculated by mapping the *reference RGB* and the  
107 *captured RGB* data sets for the R, G, and B channels as shown in Eq. 1,

108



$$\begin{aligned}
109 \quad & \check{R} = f_R(R) \\
110 \quad & \check{G} = f_G(G) \\
111 \quad & \check{B} = f_B(B)
\end{aligned} \tag{1},$$

112 where  $f_R(\cdot), f_G(\cdot)$  and  $f_B(\cdot)$  are mapping functions,  $[R, G, B]$  is the *captured RGB* data set,  
113  $[\check{R}, \check{G}, \check{B}]$  is the *reference RGB* data set, for R, G and B channels, respectively.

114 In this paper, since RGB channels in a digital camera are assumed to be physically  
115 independent as shown in Figure 1(a), the second order polynomial device profile function for  
116 correcting RGB channels are proposed as shown in Eq. 2,

$$\begin{aligned}
117 \quad & \check{R} = \alpha_{R,2}R^2 + \alpha_{R,1}R + \alpha_{R,0} \\
118 \quad & \check{G} = \alpha_{G,2}G^2 + \alpha_{G,1}G + \alpha_{G,0} \\
119 \quad & \check{B} = \alpha_{B,2}B^2 + \alpha_{B,1}B + \alpha_{B,0}
\end{aligned} \tag{2},$$

120 where  $\alpha_{R,i}, \alpha_{G,i}$  and  $\alpha_{B,i}$  are the coefficients for R, G, and B channels, respectively. These  
121 coefficients can be enumerated by applying the multiple regression technique as shown in Eq. 3,

$$122 \quad \begin{bmatrix} \check{x}_1 \\ \check{x}_2 \\ \check{x}_3 \\ \vdots \\ \check{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{x,0} \\ \alpha_{x,1} \\ \alpha_{x,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \tag{3},$$

123 where  $\check{x}_i, x_i, \alpha_{x,i}$ , and  $e_i$  are the *reference RGB*, *captured RGB*, regression coefficients, and  
124 regression error, respectively. For the second-order polynomial functions,  $n$  is the number of color  
125 patches ( $n = 24$ ). The regression coefficients estimated by using the ordinary least square method  
126 are as shown in Eq. 4,

$$127 \quad \mathbf{\alpha} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \check{\mathbf{x}} \tag{4},$$

128 where  $\mathbf{\alpha}$  is the vector of regression coefficients,  $\mathbf{X}$  is the Vandermonde matrix of *captured RGB*  
129 and  $\check{\mathbf{x}}$  is the vector of *reference RGB*, respectively. Applying to Eq. 2, the device profile function

130 for RGB channels are obtained. Then the color correction process as shown in Figure 1(b) is  
131 utilized.

## 132 2.2. DDC Performance

133 To demonstrate the performance of the DDC algorithm, image information from the  
134 standard GretagMacbeth ColorChecker shown in Figure 2 is used as the *reference RGB* data set.  
135 Three digital cameras equipped on mobile devices; Samsung GT-P1000 (T), Samsung Galaxy Note  
136 (N) and Sony Xperia Z (X); were used. To alleviate different illuminant effect, all experiments were  
137 performed using auto-exposure and prescribed white-balance functions. The experiment setup to  
138 prove the performance of DDC algorithm is depicted in Figure 3(a). Shown in Figure 3(a), two  
139 arrays of white light-emitting diodes (LED) are installed at the top of the light-controlled box while  
140 a standard color checker is posted against the inside wall. A photograph of this experiment setup is  
141 shown in Figure 3(b).

142 *Figure 3. Here*

143 The snapshots of the standard color checker from these three cameras are shown in Figure  
144 4(a). Evidently, the original color information obtained from these three cameras is different due to  
145 the device-dependence effect. Figure 4(b)-(c) shows the corrected image after applying the Poly-3  
146 (Wang and Zhang, 2010) and the DDC algorithms, respectively, called *corrected RGB*.

147 *Figure 4. Here*

148 In this paper, the correction algorithm performance is evaluated by computing the total  
149 distance between the *compared* and *reference* data sets of all 24 patches. This is defined by the  
150 *Total Euclidian distance* ( $E_T$ ) as shown in Eq. 5,

$$151 E_T = \sum_{j=1}^n \sqrt{(R'_j - \tilde{R}_j)^2 + (G'_j - \tilde{G}_j)^2 + (B'_j - \tilde{B}_j)^2} \quad (5),$$

152 where  $(\tilde{R}_j, \tilde{G}_j, \tilde{B}_j)$  and  $(R'_j, G'_j, B'_j)$  are the *reference* and the *compared* data sets of color patch  $j$ ,  
153 respectively. It is noted that a data set  $[R'_j, G'_j, B'_j]$  is obtained from the mean values of R, G, and B  
154 for all pixels in the color patch  $j$ . To compare the performances of the DDC with the Poly-3

155 algorithm for all 24 color patches, the reduction rate in  $E_T$  after applying the correction algorithm is  
156 evaluated. The values of  $E_T$  and the performance comparison between two algorithms are  
157 summarized in Table 1. It is shown that the DDC algorithm corrects color better than the Poly-3  
158 algorithm for all devices.

159 *Table 1. Here*

160 To demonstrate the similarity of the corrected color with the reference color, the relation  
161 between the *corrected RGB* and the *reference RGB* image information is determined. A linear  
162 function is used as follows,

$$163 \quad y = mx + c \quad (6),$$

164 where  $y, x$  are the *reference RGB* and *compared RGB* data sets. Meanwhile  $m$  and  $c$  are the slope  
165 and offset of the linear function. If an algorithm can correct color efficiently, then  $y$  should be  
166 related to  $x$ , with  $m$  and  $c$  being 1 and 0, respectively.

167 Table 2 shows the linear regression results. As shown in the Table 2, correlation parameters  
168 of uncorrected, Poly-3, and the DDC algorithms are detailed. The slope and offset of DDC  
169 algorithm are very near to 1 and 0, implying that the corrected color tones are very close to the  
170 reference ones. On the other hand, slope and offset values of the Poly-3 algorithm are not close to 1  
171 and 0. The average values of slope and offset obtained from the Poly-3 algorithm are 1.09 and  
172 -12.36, whereas those obtained from the DDC algorithm are 1 and 0.04. The residuals from the  
173 DDC algorithm is smaller than the Poly-3 algorithm and uncorrected image. This obviously proves  
174 that the DDC algorithm can correct the color information better than the Poly-3 algorithm.  
175 Moreover, the DDC algorithm is very suitable for mobile device since it is simple enough to  
176 implement using Look Up Table (LUT) technique.

177 *Table 2. Here*

### 178 **3. Methodology and Performances**

179 In this section, two proposed algorithms in OER determination scheme are described. The  
180 first algorithm aims to classify palm fruit into three groups of different ripeness degrees. The second

181 algorithm is devised to predict OER. In this paper, only the palm fruit *var. Negrescens Tenera* is of  
182 interest due to its high oil production and because it is the most cropped palm in the main palm oil  
183 producing countries, which include Malaysia, Thailand, Indonesia and so on.

### 184 **3.1. Color Characteristics of Oil Palm**

185 In this subsection, we describe the color characteristics of oil palm fruit, which is related to the  
186 fruit ripening mechanism. The issue of the natural pigment of palm fruit will be discussed first, followed  
187 with the hue value of the HSV color model of oil palm fruit (Forsyth and Ponce, 2002; Gonzalez et al.,  
188 2003) which represents color in a visible spectrum.

189 One of the basic roles of organisms is to provide attractive colors for leaves, flowers, fruits,  
190 vegetables, and skin (on animals) by natural pigments (Delgado-Vargas et al., 2000). The principal  
191 pigments that produce color in oil palm are Chlorophyll, Carotenoids and Anthocyanins (Edem,  
192 2002; Mortensen, 2006; Tan et al., 2010). Principally, Chlorophyll is a *green* pigment which is used  
193 in the photosynthesis process. It absorbs light in the range of around 430 and 670 nm (Mortensen,  
194 2006; Tan et al., 2010). Carotenoids, a *yellow-orange-red* pigment, can extract to become the  
195 hydrocarbon compound Carotenes such as  $\alpha$ - and  $\beta$ -Carotenes (Mortensen, 2006). Anthocyanins  
196 have mainly *blue-purple-red* pigments depending on the pH value of the oil palm (Wrolstad et al.,  
197 2005). In oil palm fruit, Anthocyanin is mixed with Flavonoids and produces yellowish-orange  
198 (Delgado-Vargas et al., 2000; Hazir et al., 2012) absorbing visible light in the spectrum of 530 nm  
199 (Tan et al., 2010).

200 From the unripe to fully-ripe stage as shown in Figure 5(a)-(c), Carbohydrate gradually  
201 decrease, while the Glyceride acid increases (Luengarpapong, 1980). This causes the color of the  
202 palm fruit to change from yellow to reddish-orange and absorbs the visible light range of 430 and  
203 670 nm. In addition, the quantity of Chlorophyll decreases along with the Anthocyanins and  
204 Flavonoids, so the colorant of the palm fruit becomes reddish-orange, which is in the 670 nm range.  
205 This is related to the hue value of range which is around -10 to 70 degrees. At the fully-ripe stage,  
206 the hue value of palm fruit is very close to zero, which represents a reddish color (Tan et al., 2010).

207 *Figure 5. Here*

### 208 3.2. Ripeness Degree Classifier (RDC)

209 In this subsection, a ripeness degree classifier (RDC) for oil palm is presented. The selected  
210 features from images of each fruit shown in Figure 6 will be discussed, followed by the  
211 classification process.

212 *Figure 6. Here*

213 In Figure 6, a lateral surface of the palm fruit is divided into 20 subsections ( $k=20$ ) and  
214 mean of hue value for all subsections are calculated. This region of the fruit is called a *lateral hue*.  
215 The RDC algorithm based on a two-layer feedforward neural network (Hagan and Menhaj, 1994) (a  
216 hidden and an output layer) shown in Figure 7 is proposed.

217 *Figure 7. Here*

218 The hidden layer of the RDC is formed with 30 nodes as shown in Figure 7. This node  
219 number in the hidden layer is obtained from our investigation. There are three output nodes in the  
220 output layer. These three outputs are applied to the output layer to classify the ripeness degree of the  
221 fruit, which include low OER (L-Grade), medium OER (M-Grade), and high OER (H-Grade). The  
222 classifier output,  $y$ , is chosen based on “winner take all” technique. The variables  $\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2$  and  $y$  are  
223 defined as shown below,

$$224 \quad \mathbf{a}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1\mathbf{p} + \mathbf{b}^1) \quad (7),$$

$$225 \quad \mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2\mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^2) \quad (8),$$

$$226 \quad y = \text{index}(\max\{\mathbf{a}^2\}) \quad (9),$$

227 where  $\mathbf{f}^1, \mathbf{f}^2$  are the sigmoid function vector,  $\mathbf{p}$  is the input feature vector,  $(\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2)$  are the  
228 weighting coefficient matrixes of the hidden and output layer,  $(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$  are the bias vectors of the  
229 hidden and output layer, and  $(\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2)$  are the output vectors of hidden and output layer. Weighting  
230 coefficient matrixes  $(\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2)$  and bias coefficient vectors  $(\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2)$  in the hidden and output layer  
231 were calculated from the scaled conjugate gradient backpropagation training process (SCG). The  
232 output of the RDC indicating the ripeness degree of the fruit is obtained from the index of the

233 maximum value from the three output nodes in the output layer. The value of  $y$  is subsequently  
234 applied to the OER determination algorithm.

### 235 **3.3. RDC Performance**

236 To evaluate classification performance, the *lateral hue* of 45 postharvest fruit samples (*var.*  
237 *Negrescens Tenera, Suratthani-2*) of different ripeness conditions (15 samples for each class) were  
238 trained on the two-layer feed-forward neural network as explained. The OERs of these fruit samples  
239 obtained from Soxhlet extraction (ISO9001:2008) are in the range of 30-73. These are grouped into  
240 three classes as shown in Table 3. For the training results, the mean square error (MSE) of training  
241 process achieves 0.0042 and no misclassification occurred during the training error.

242 *Table 3. Here*

243 To test the performance of our classification algorithm, 64 untrained samples were chosen.  
244 It should be noted that all 64 samples had not been used to train the algorithm. The classification  
245 algorithm can provide the class correctly without error.

### 246 **3.4. OER Determination Algorithm**

247 To implement as simple as possible, an OER determination algorithm for oil palm is  
248 proposed using a regression function. Again lateral images of 45 palm fruit samples previously  
249 applied in the classification process were used to develop the feature for determination algorithm.  
250 The spatial mean of lateral hue values of each fruit section was computed. A *whole-fruit hue* is  
251 computed by averaging over spatial mean hue values of 20 lateral sections. Figure 8 plots the  
252 whole-fruit hue values of 45 palm fruits and their OERs which are 30-73. Large hue distribution  
253 ranging from -4 to 90 degree is obtained and this causes some difficulties to model the OER-hue  
254 function for determination algorithm based on the *whole-fruit hue*.

255 *Figure 8. Here*

256 To obtain smaller hue distribution, two following cases are investigated. These are obtained  
257 by averaging spatial means of lateral hue values over a) section #1-#13 (called *top-perianths hue*)  
258 and b) section #14-#20 (called *bottom hue*). The second case is the bottom fruit area covered with  
259 perianths. It is worth to clarify that these perianths normally covering around 35% of a whole fruit

260 will protect the fruit from various hazardous environments such as light and rain as shown in Figure  
261 9.

262 *Figure 9. Here*

263 Regarding to *top-perianths* and *bottom hue* cases, Figure 10 plots the average hue values  
264 computed of 45 fruit samples and their OERs. The most compact group is obtained from the *bottom*  
265 *hue* case since the hue information of *bottom hue* is not varied as much as the uncovered area. Since  
266 a well compact feature group offers a simple mathematical modeling, we then select the feature  
267 obtained from the *bottom hue* as shown in Figure 10(b) to formulate a mathematical model for OER  
268 determination algorithm.

269 *Figure 10. Here*

270 In Figure 10(b), we propose to mode the OER function regarding to three fruit grades as  
271 described in Table 3. We have found that each grade is well characterized with a cubic function as  
272 shown in Figure 11. The mathematical model for determining OER is defined in Eq. 10.

273 *Figure 11. Here*

274 
$$OER = \sum_{i=0}^3 g_i h^i \quad (10),$$

275 where  $g_i$  is the prediction vector coefficients, and  $h$  is the average hue value of *bottom hue*. As  
276 shown in Figure 12, our proposed prediction algorithm has three OER prediction functions  
277 (prediction vectors) for three different ripeness degrees. The ripeness degree obtained from the  
278 RDC will indicate which OER prediction function to be applied. With the average value of *bottom*  
279 *hue* of the unknown OER palm fruit, its OER value can be predicted. The prediction vector  
280 coefficients of three functions are shown in Table 4.

281 *Figure 12. Here*

282 *Table 4 Here*

### 283 **3.5. OER Determination Performance**

284 To evaluate the performance of the determination algorithm, other 64 fruit samples were  
285 applied to the OER prediction algorithm. The fitting functions of the *bottom hue* data are related to

286 OER with a third-order polynomial function. The performance of the algorithm proposed to  
287 determine OER is summarized in Table 5. The prediction algorithm achieves an average error of  
288 OER 3.30. In summary, we strongly believe that the performance of the proposed prediction  
289 algorithm and its simplicity can be readily implemented on a mobile device.

290 *Table 5. Here*

#### 291 **4. Mobile Device Implementation**

292 In this section, we present the implementation of the OER scheme on a mobile device. All  
293 proposed algorithms in the scheme are implemented based on open source platforms which include  
294 OpenCV, A Java Matrix Package (JAMA) and Android. This leads our scheme to be applicable on  
295 several mobile devices.

296 For the proposed mobile based OER determination algorithm. The image processing algorithm  
297 is run on an OpenCV core, while the JAMA core supports mathematical processing. Graphical user  
298 interface via a touch screen LCD is developed on an Android platform. For our implementation as  
299 shown in Figure13, the acquisition, oil palm detection, preprocessing, and OER determination processes  
300 were programmed using OpenCV. In acquisition process, an oil palm image was extracted from image  
301 scene by using background subtraction technique (Image threshold and finding an oil palm contour).

302 The JAMA core was used to compute the device profile function and operate the least square  
303 technique for regression analysis. Two speed optimizers were employed in the system. Single  
304 Instruction, Multiple Data (SIMD) was applied to reduce computation time. The matrix computation  
305 can perform faster on SIMD processor types such as ARM11 architecture. The second speed optimizer  
306 is to implement a *device profile function* in the form of a LUT for the color correction process. The  
307 mapping function results are stored in arrays for correcting colors of fruit images, hence the  
308 computation task is considerably simplified.

309 For implementing classification algorithms for palm fruit, neural network weights, biases and  
310 prediction vector coefficients are stored in configuration file. The mobile device which installed  
311 software as shown in Figure 14(a) and graphical user interface of the scheme on a mobile device is  
312 shown in Figure 14(b)-(d).



313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338

*Figure 13. Here*

*Figure 14. Here*

To evaluate the performance of the OER determination system on a mobile device, our proposed experiment was conducted on a Samsung Galaxy Note (ARM Cortex A9 Dual Core 1.4GHz, 1 GB of RAM). The image resolution was 2048x1536 pixels in ARGB-8888 format. The speed performances of the system implemented on a mobile device based on a conventional iteration approach and using two speed optimizers proposed in this paper are shown in Table 6.

*Table 6. Here*

Speed performance when using SIMD and LUTs is 96.41 times faster than a calculation based on iteration. It can reduce calculation time by 98.96%. However, this does not include other operation time such as file operation or image acquisition time. The overall computation time can be changed depending on other factors. In our implementation, the speed of the overall process based on SIMD and LUTs is within 373 milliseconds, which is sufficient for real-time application.

## **5. CONCLUSION**

A simple nondestructive method for classifying and predicting oil content of oil palm from hue color features has been presented. The determination scheme has three main algorithms for color correction, classification and OER prediction processes. The color correction algorithm proposes to correct image color from the effects of device-dependence in an RGB color model with a 59% Euclidian distance reduction rate. The classification process based on a two layer feed-forward neural network is developed by using features from the hue values on an oil-palm surface, while the OER determination process is developed by using a polynomial regression model. The results demonstrated that the proposed method can classify correctly and determine the OER with only 3.30 OER error. Finally, the oil content determination scheme implemented on a mobile system can be conducted with an average speed of 373 milliseconds. The measurement system was applied and tested with several oil palm fruit samples and our experiment was also compared with the Soxhlet extraction measurement.

339           We strongly believe that our method is very appropriate for several practical applications. In  
340 addition, our method can also be applied to portable computing devices in practice.

341 **Acknowledgment**

342           This research is financially supported by the Thai Research Fund and Prince of Songkla  
343 University under the Royal Golden Jubilee Ph.D Program No. PHD/0046/2552, RSA5680056, and  
344 Prince of Songkla University grant number ENG540598S. The first author would like to  
345 acknowledge Mr. Dharatip Choomuakchot, Mr.Silarchai Moongdee, Mr.Kritsada Pongsuwan and  
346 Mr. Sakol Julrat for their suggestions on the experiment setup.

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365 **References**

- 366 Abbas, Z., Yeow, Y.K., Shaari, A.H., Khalid, K., Hassan, J., Saion, E., 2005. Complex permittivity and  
367 moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor. *IEEE Sensors Journal*  
368 5, 1281–1287.
- 369 Abdullah, M.Z., Guan, L.C., Mohamed, A.M.D., Noor, M. a. M., 2002. Color Vision System for Ripeness  
370 Inspection of Oil Palm *Elaeis Guineensis*. *Journal of Food Processing and Preservation* 26, 213–235.
- 371 Abdullah, M.Z., Guan, L.C., Mohd Azemi, B.M.N., 2001. Stepwise Discriminant Analysis for Colour  
372 Grading of Oil Palm Using Machine Vision System. *Food and Bioproducts Processing* 79, 223–231.
- 373 Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Shafri, H.Z.M., Saeed, O.M.B., Eshanta, O.M., 2008. Oil palm fruit bunch  
374 grading system using red, green and blue digital number. *Journal of Applied Sciences* 8, 1444–1452.
- 375 Balasundram, S.K., Robert, P.C., Mulla, D.J., 2006. Relationship between oil content and fruit surface color  
376 in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Plant Sciences* 1, 217–227.
- 377 Barnard, K., Martin, L., Coath, A., Funt, B., 2002. A comparison of computational color constancy  
378 Algorithms. II. Experiments with image data. *IEEE Transactions on Image Processing* 11, 985–996.
- 379 Chiu, L.-C., Fuh, C.-S., 2010. Calibration-based auto white balance method for digital still camera. *Journal*  
380 *of Information Science and Engineering* 26, 713–723.
- 381 Delgado-Vargas, F., Jiménez, A.R., Paredes-López, O., 2000. Natural Pigments: Carotenoids, Anthocyanins,  
382 and Betalains — Characteristics, Biosynthesis, Processing, and Stability. *Critical Reviews in Food*  
383 *Science and Nutrition* 40, 173–289.
- 384 Edem, D.O., 2002. Palm oil: Biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological  
385 aspects: A review. *Plant Foods Hum Nutr* 57, 319–341.
- 386 Forsyth, D.A., Ponce, J., 2002. *Computer Vision: A Modern Approach*, 1st ed. Prentice Hall.
- 387 Gijzenij, A., Gevers, T., van de Weijer, J., 2011. Computational Color Constancy: Survey and Experiments.  
388 *IEEE Transactions on Image Processing* 20, 2475–2489.
- 389 Gonzalez, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L., 2003. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Pearson  
390 Prentice Hall.
- 391 Granzier, J.J.M., Brenner, E., Smeets, J.B.J., 2009. Can illumination estimates provide the basis for color  
392 constancy?. *Journal of Vision* 9.

393 Hagan, M.T., Menhaj, M.B., 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. IEEE  
394 Transactions on Neural Networks 5, 989–993.

395 Hazir, M.H.M., Shariff, A.R.M., Amiruddin, M.D., 2012. Determination of oil palm fresh fruit bunch  
396 ripeness—Based on flavonoids and anthocyanin content. Industrial Crops and Products 36, 466–475.

397 Hsu, E., Mertens, T., Paris, S., Avidan, S., Durand, F., 2008. Light mixture estimation for spatially varying  
398 white balance. ACM Trans. Graph. 27, 70:1–70:7.

399 Huo, J., Chang, Y., Wang, J., Xiao-xia Wei, 2006. Robust automatic white balance algorithm using gray  
400 color points in images. IEEE Transactions on Consumer Electronics 52, 541–546.

401 Junkwon, P., Takigawa, T., Okamoto, H., Hasegawa, H., Koike, M., Sakai, K., Siruntawineti, J.,  
402 Chaeychomsri, W., Vanavichit, A., Tittinuchanon, P., Bahalayodhin, B., 2009. Hyperspectral  
403 imaging for nondestructive determination of internal qualities for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.  
404 var. *tenera*). Agricultural Information Research 18, 130–141.

405 Lam, E.Y., 2005. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital  
406 photography, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics, 2005.  
407 (ISCE 2005). Presented at the Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer  
408 Electronics, 2005. (ISCE 2005), IEEE, pp. 134–139.

409 Lee, D.-J., Archibald, J.K., Xiong, G., 2011. Rapid Color Grading for Fruit Quality Evaluation Using Direct  
410 Color Mapping. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 8, 292–302.

411 Liu, Y.-C., Chan, W.-H., Chen, Y.-Q., 1995. Automatic white balance for digital still camera. IEEE  
412 Transactions on Consumer Electronics 41, 460–466.

413 Luengarpapong, P., 1980. Oil Palm, 1st ed. Department of Plant Science Prince of Songkla University.

414 Mohd. Hudzari Razali, Wan Ishak, Wan Ismail, Abd. Rahman Ramli, Md. Nasir Sulaiman, Mohd. Haniff B.  
415 Harun, 2011. Prediction Model for Estimating Optimum Harvesting Time of Oil Palm Fresh Fruit  
416 Bunches. Journal of Food, Agriculture & Environment 9, 570–575.

417 Mortensen, A., 2006. Carotenoids and other pigments as natural colorants\*. Pure Appl. Chem. 78, 1477–  
418 1491.

419 Palapol, Y., Ketsa, S., Stevenson, D., Cooney, J.M., Allan, A.C., Ferguson, I.B., 2009. Colour development  
420 and quality of mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) fruit during ripening and after harvest.  
421 Postharvest Biology and Technology 51, 349–353.

422 Pamornnak, B., Limsirorattana, S., Chongcheawchamnan, M., 2013. Oil Extraction Rate Determination  
423 Technique Based on Dielectric Constant of Palm Fruit. *Applied Mechanics and Materials* 303-306,  
424 498–501.

425 Park, T.Y., Lee, M.Y., Kim, J.M., Ha, Y.H., 2005. Design and implementation of digital photo kiosk system  
426 with auto color-correction module. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 51, 1067 – 1073.

427 Razali, M.H., Wan Ismail, W.I., Ramli, A.R., Sulaiman, M.N., Harun, M.H., 2009. Development of Image  
428 Based Modeling for Determination of Oil Content and Days Estimation for Harvesting of Fresh Fruit  
429 Bunches. *International Journal of Food Engineering* 5.

430 Rennick, G., Attikiouzel, Y., Zaknich, A., 1999. Machine grading and blemish detection in apples, in:  
431 *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 1999.*  
432 *ISSPA '99.* Presented at the *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing*  
433 *and Its Applications, 1999. ISSPA '99, IEEE, pp. 567–570 vol.2.*

434 Slaughter, D.C., Crisosto, C.H., Tiwari, G., 2013. Nondestructive determination of flesh color in clingstone  
435 peaches. *Journal of Food Engineering* 116, 920–925.

436 Suwannarat, S., Khaorapapong, T., Chongcheawchamnan, M., 2012. Prediction of Oil Content in Fresh Palm  
437 Fruit based on an Ultrasonic Technique. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 318–324.

438 Tan, Y.A., Low, K.W., Lee, C.K., Low, K.S., 2010. Imaging technique for quantification of oil palm fruit  
439 ripeness and oil content. *European Journal of Lipid Science and Technology* 112, 838–843.

440 Wang, X., Zhang, D., 2010. An Optimized Tongue Image Color Correction Scheme. *Information*  
441 *Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on* 14, 1355–1364.

442 Wrolstad, R.E., Durst, R.W., Lee, J., 2005. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products.  
443 *Trends in Food Science & Technology* 16, 423–428.

444 Yee, L.K., Abbas, Z., Jusoh, M.A., Yeow, Y.K., Meng, C.E., 2011. Determination of Moisture Content in  
445 Oil Palm Fruits Using a Five-Port Reflectometer. *Sensors* 11, 4073–4085.

446 Yeow, Y.K., Abbas, Z., Khalid, K., 2010. Application of microwave moisture sensor for determination of oil  
447 palm fruit ripeness. *Measurement Science Review* 10, 7–14.

448

449

450

451 **List of Tables**

452 Table 1 Performance comparison of the correction algorithms for different camera devices

453 Table 2 RGB color correlations between Reference and Uncorrected-Corrected colors

454 Table 3 Classification Grade

455 Table 4 Prediction Vector Coefficients

456 Table 5 Oil Content Prediction Results of 64 samples

457 Table 6 Performances of the OER determination system

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480 **List of Figures**

481 Figure 1. Proposed image color correction algorithm, (a) device profile estimation and (b) color  
482 correction process with an estimated device profile.

483 Figure 2. Standard GretagMacbeth color checker

484 Figure 3. Experimental setup: (a) drawing and (b) a photograph.

485 Figure 4. Image snapshots of standard color templates from three different cameras, (a) uncorrected,  
486 (b) corrected with Poly-3, and (c) corrected with DDC algorithm.

487 Figure 5. Color of oil palm related to pigments (a) unripe, (b) underripe, and (c) ripe.

488 Figure 6. Images for feature selection of lateral surface in the RDC for oil palm classification.

489 Figure 7. Neural network structure for oil palm classification.

490 Figure 8. OER and the whole-fruit hue value of 45 fruit samples.

491 Figure 9. Oil palm fruit with and without perianths.

492 Figure 10. OER and averaging mean of hue value for all 45 fruit samples, (a) 65% of fruit and (b)  
493 bottom hue.

494 Figure 11. OER and means of *bottom hue* for each class.

495 Figure 12. Proposed OER prediction algorithm.

496 Figure 13. Block diagram of mobile OER determination system.

497 Figure 14. The mobile device, (a) which installed software, (b) software user interface of mobile  
498 device, color correction capture screen, (c) color correction results and (d) oil palm OER  
499 determination.

500

501

502

503

504

505

506

## List of Tables

TABLE 1

Performance comparison of the correction algorithms for different camera devices

Device	$E_T$				
	Uncorrected	Poly-3 algorithm		DDC algorithm	
		$E_T$	Reduction rate (%)	$E_T$	Reduction rate (%)
T	1683	827	51	727	57
N	1771	894	50	783	56
X	1920	753	61	690	64
Mean	1791	825	54	734	59

TABLE 2

RGB color correlations between Reference and Uncorrected-Corrected colors

Device		Uncorrected			Poly-3 algorithm			DDC algorithm		
		Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual	Slope	Offset	Residual
T	R	1.79	-33.25	93.68	1.03	-5.19	90.1	1	-0.13	93.32
	G	2.02	-83.9	100.93	1.23	-31.81	112.32	1	0.16	95.76
	B	1.41	-86.6	101.52	1.2	-26.52	112.28	1	-0.12	95.95
N	R	1.12	21.05	108.12	0.95	8.5	110.91	1	-0.06	87.85
	G	1.13	-11.9	112.45	1.01	-0.79	106.57	1	0.01	112.69
	B	0.93	-37.47	121.83	1.27	-37.74	120.28	1	0.16	102.35
X	R	1.46	25.98	91.26	0.96	6.94	91.26	1	0	90.92
	G	1.49	-7.66	103.32	1.02	-2.89	102.98	1	0.12	100.77
	B	1.09	-32.18	94.85	1.16	-21.76	100.31	1	0.23	92.24
Mean	1.38	-27.33	103.11	1.09	-12.36	105.22	1.00	0.04	96.87	

TABLE 3

Classification Grade

Grade	L-Grade	M-Grade	H-Grade
OER	30.01-40.00	40.01-50.00	>50.00

TABLE 4

Prediction Vector Coefficients

Function	Coefficients			
	$g_3$	$g_2$	$g_1$	$g_0$
L Grade	$8.00 \times 10^{-4}$	-0.06	1.30	27.21
M Grade	$-8.00 \times 10^{-4}$	0.07	-2.00	60.93
H Grade	$3.60 \times 10^{-3}$	-0.31	8.03	-0.95

TABLE 5

Oil Content Prediction Results of 64 samples

Average Error (OER)			
L Grade	M Grade	H Grade	All Grades
3.06	1.39	3.82	3.30

TABLE 6

Performances of the OER determination system

Calculation Method	Process Time (ms)		
	Preprocessing	RDC+OER determination	Total
Iteration	$35.80 \times 10^3$	164	$35.96 \times 10^3$
SIMD + LUTs	215	158	373



Figure1

[Click here to download high resolution image](#)

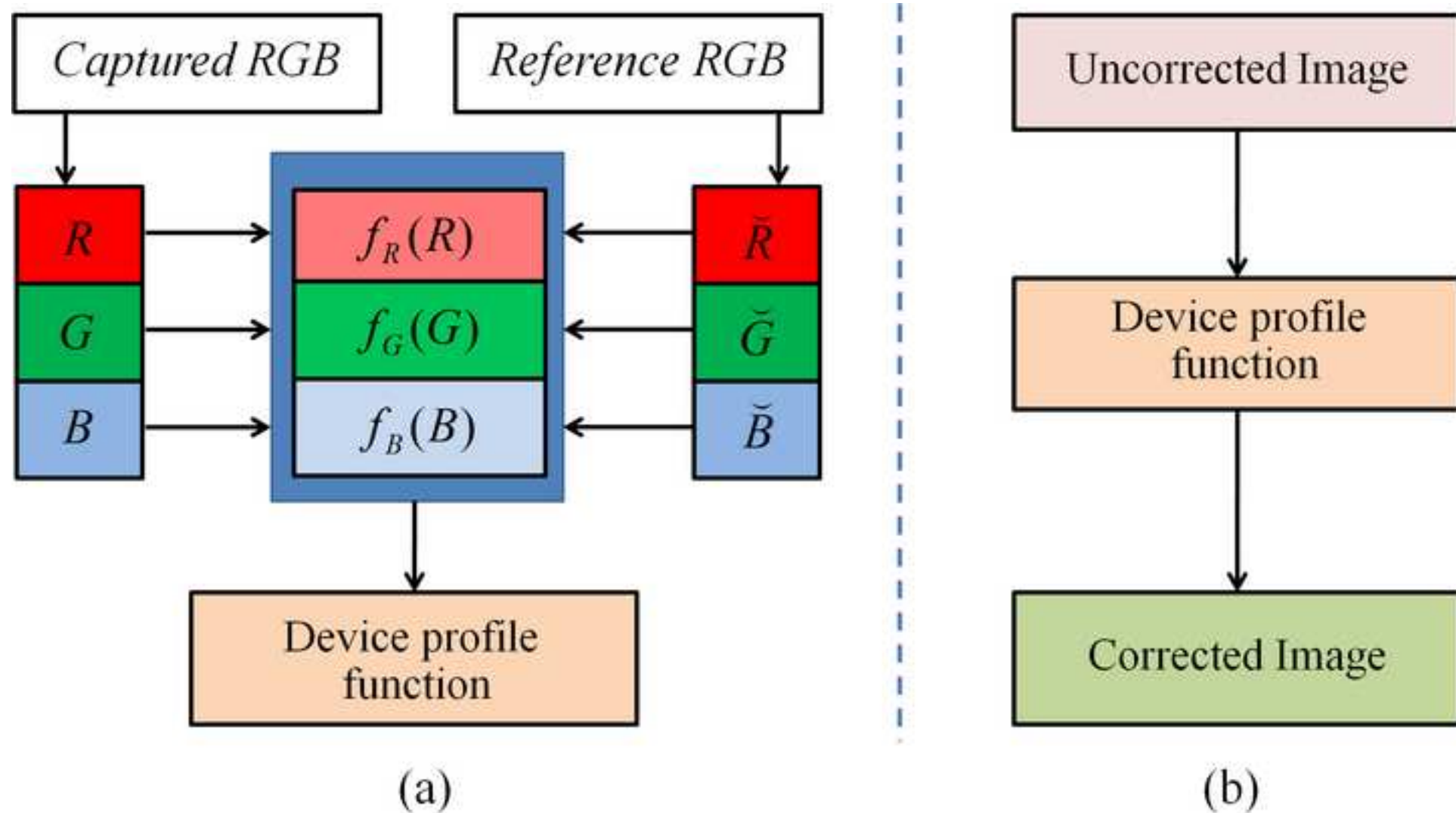


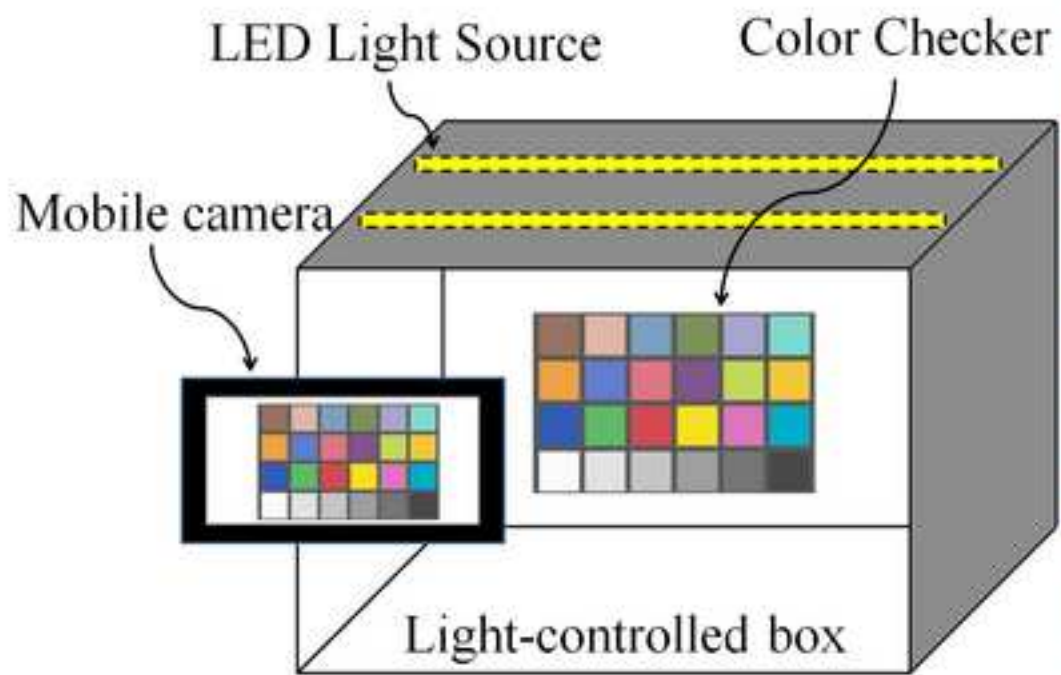
Figure2

[Click here to download high resolution image](#)



Figure3

[Click here to download high resolution image](#)



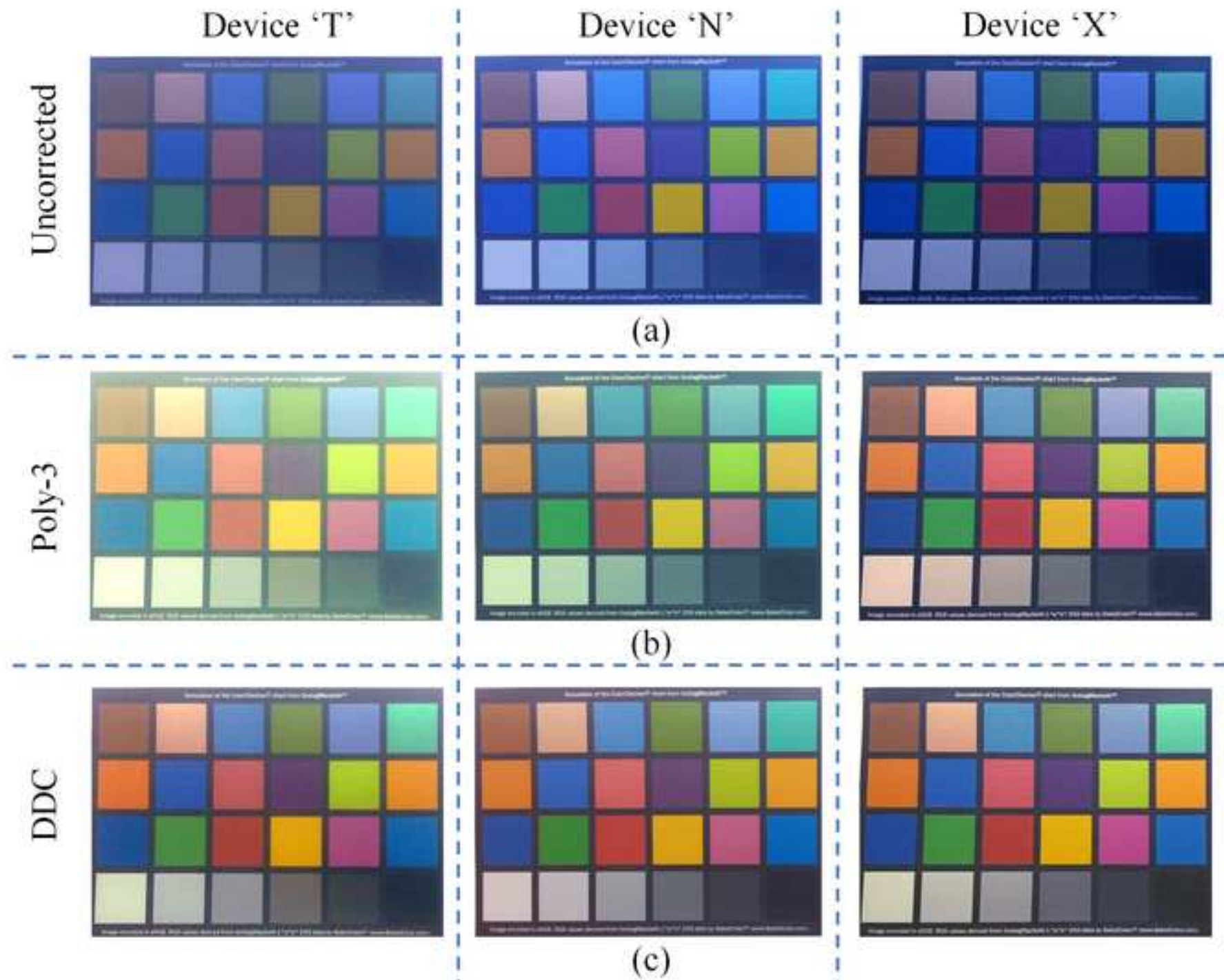
(a)



(b)

Figure4

[Click here to download high resolution image](#)



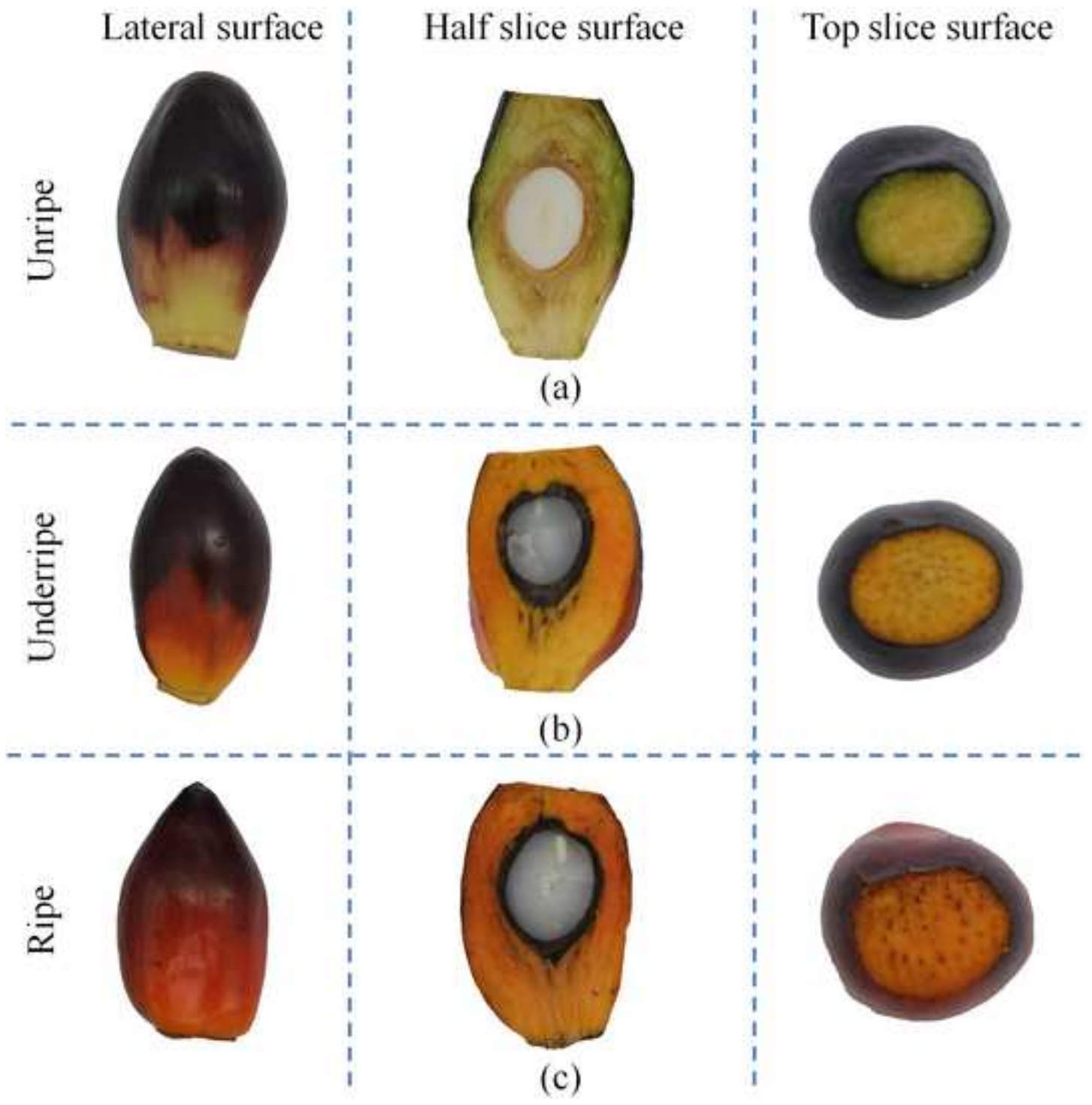


Figure6  
[Click here to download high resolution image](#)

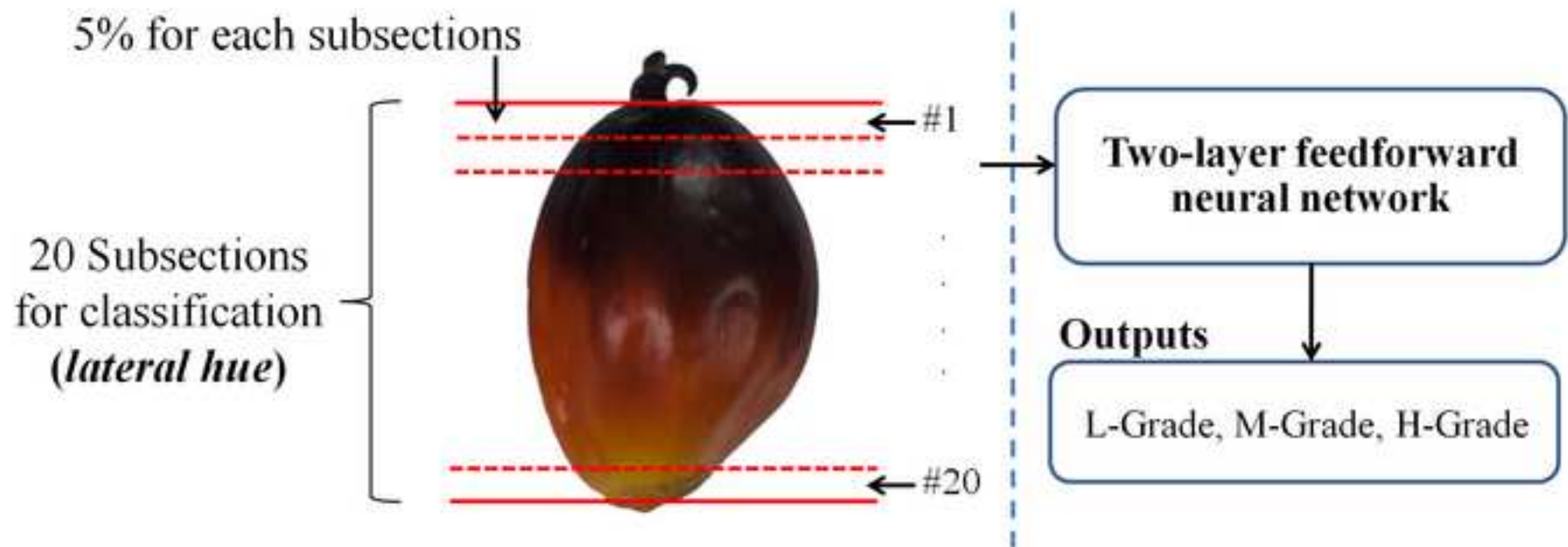


Figure 7

[Click here to download high resolution image](#)

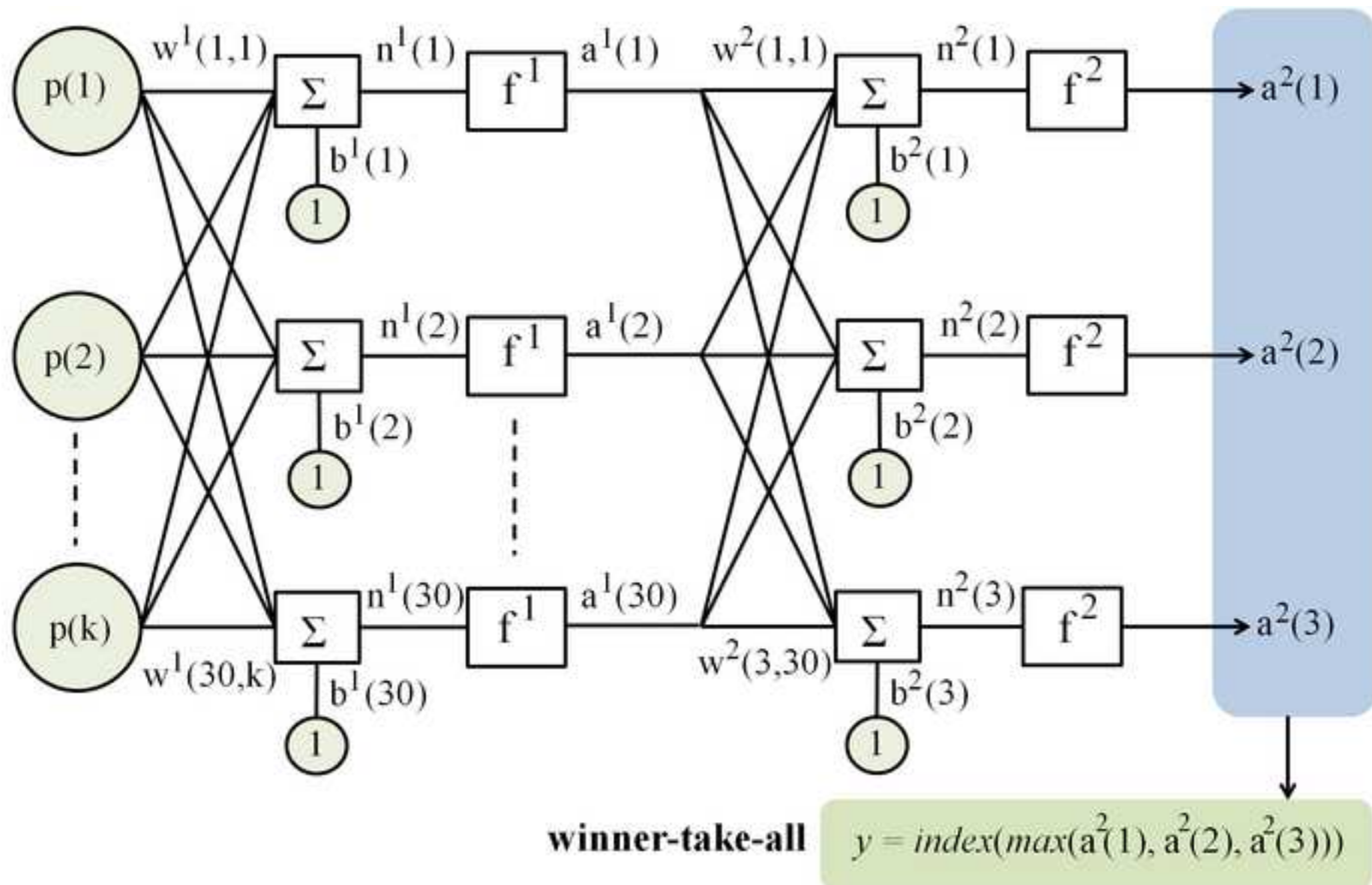


Figure8

[Click here to download high resolution image](#)

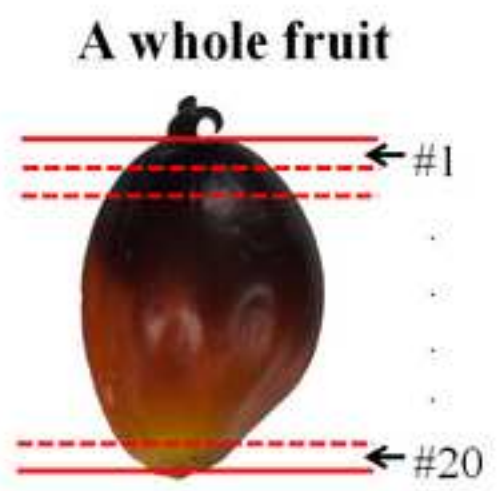
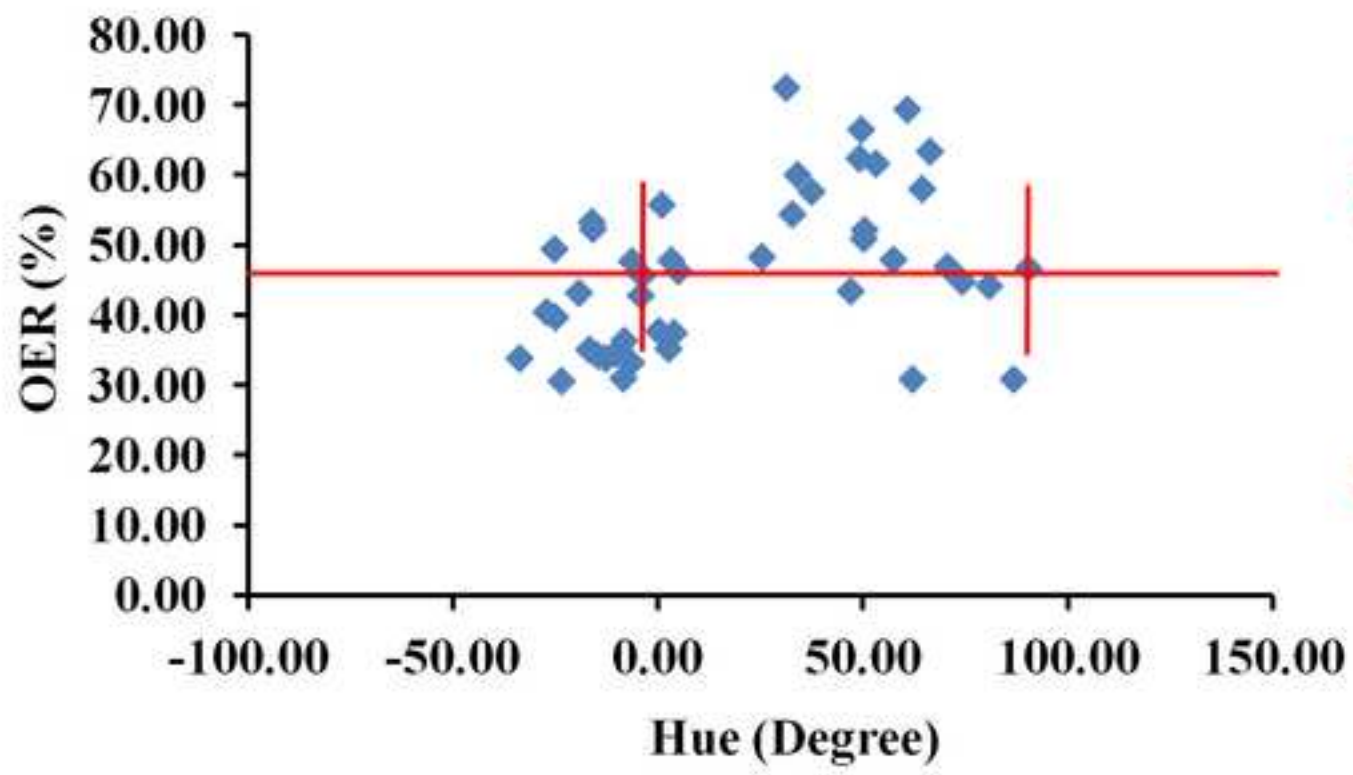




Figure9

[Click here to download high resolution image](#)

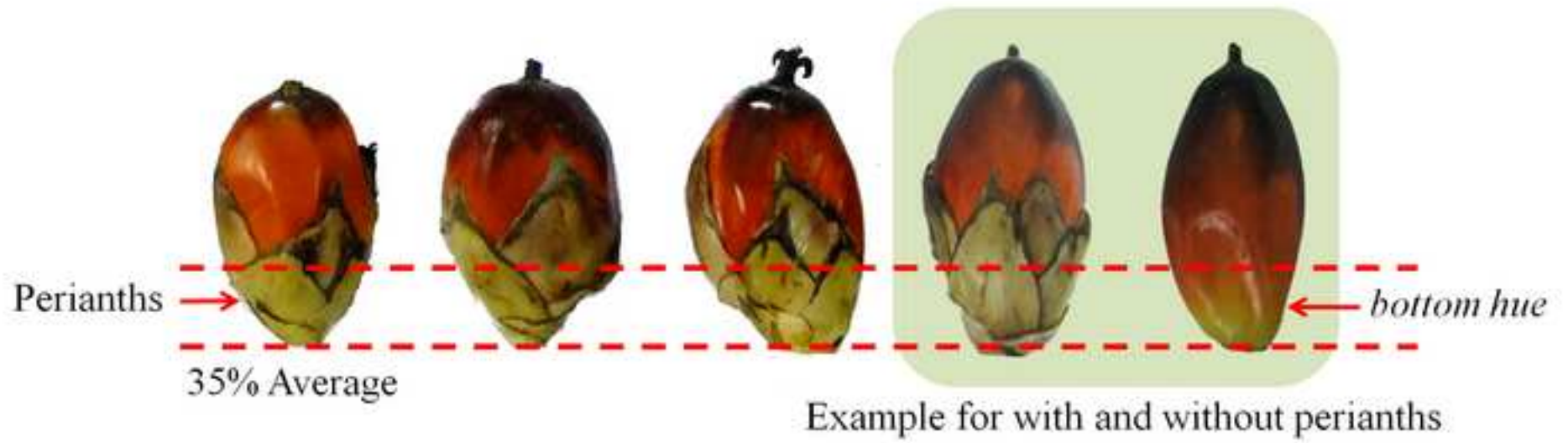
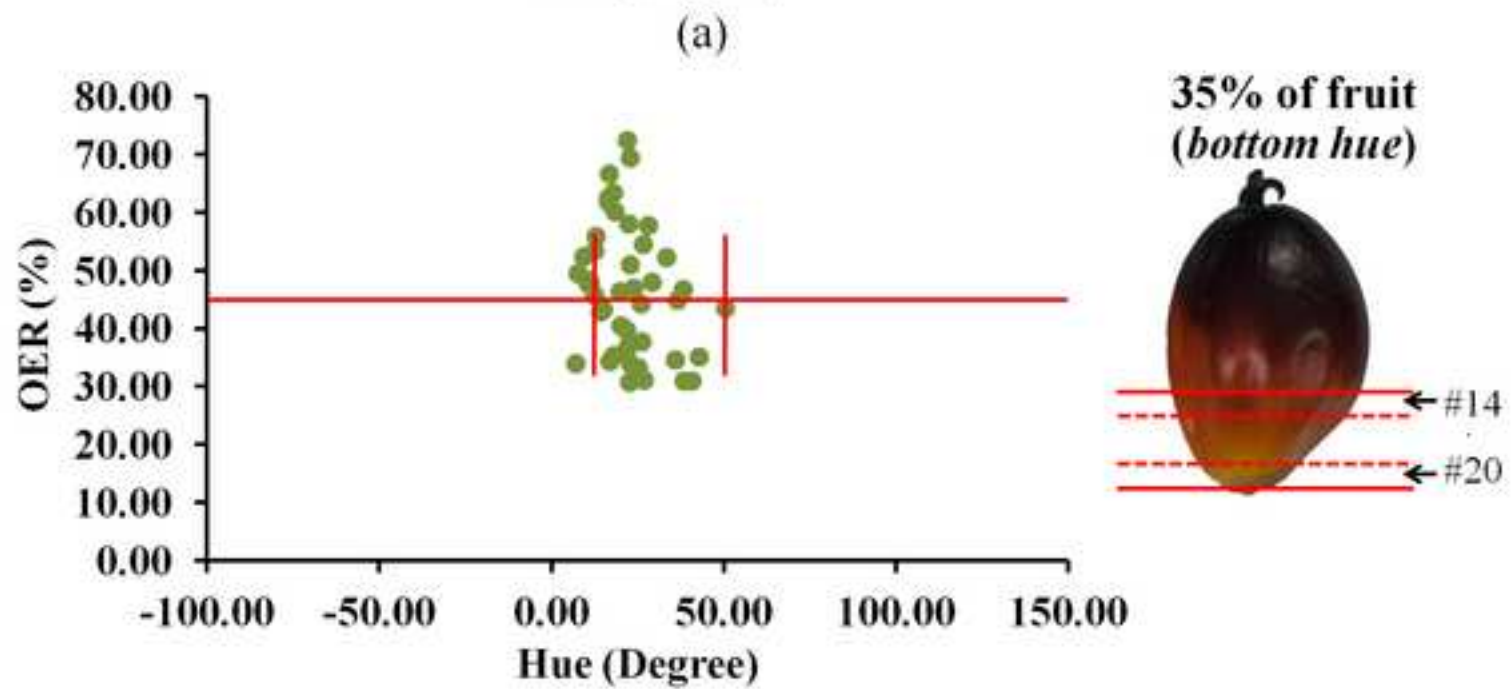
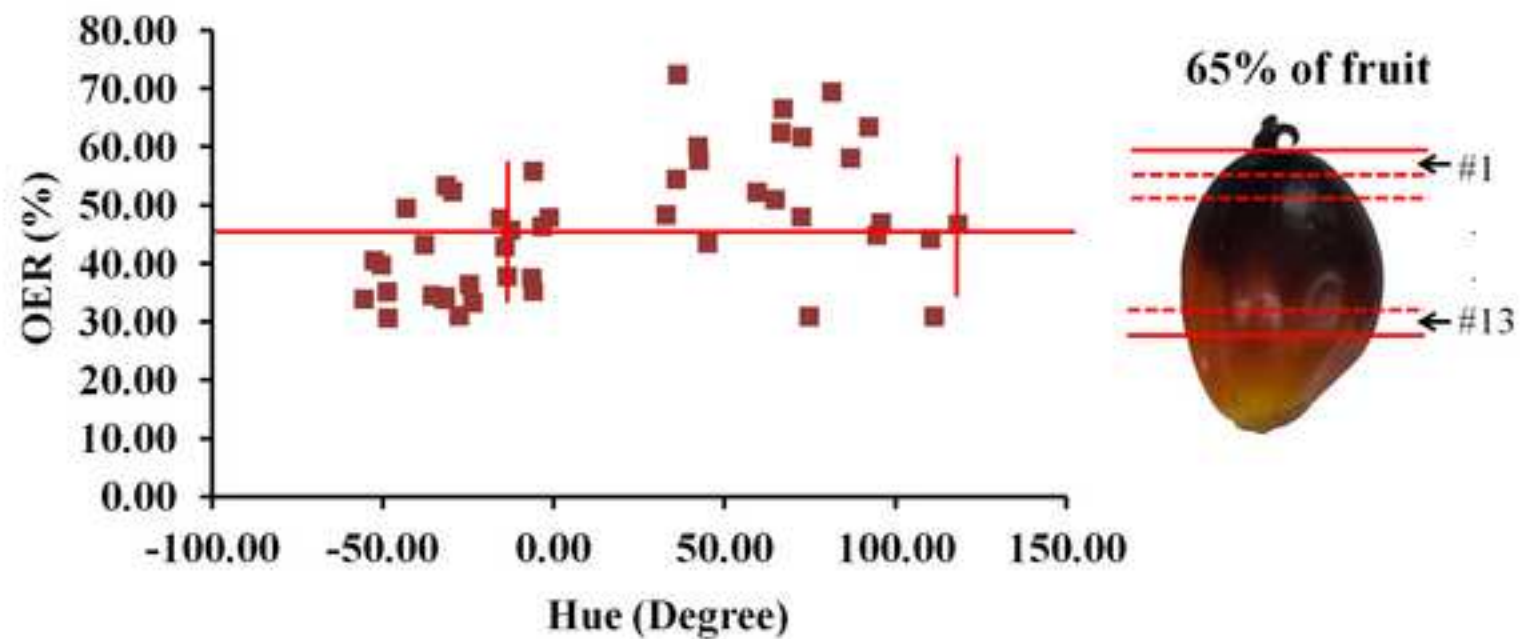


Figure10

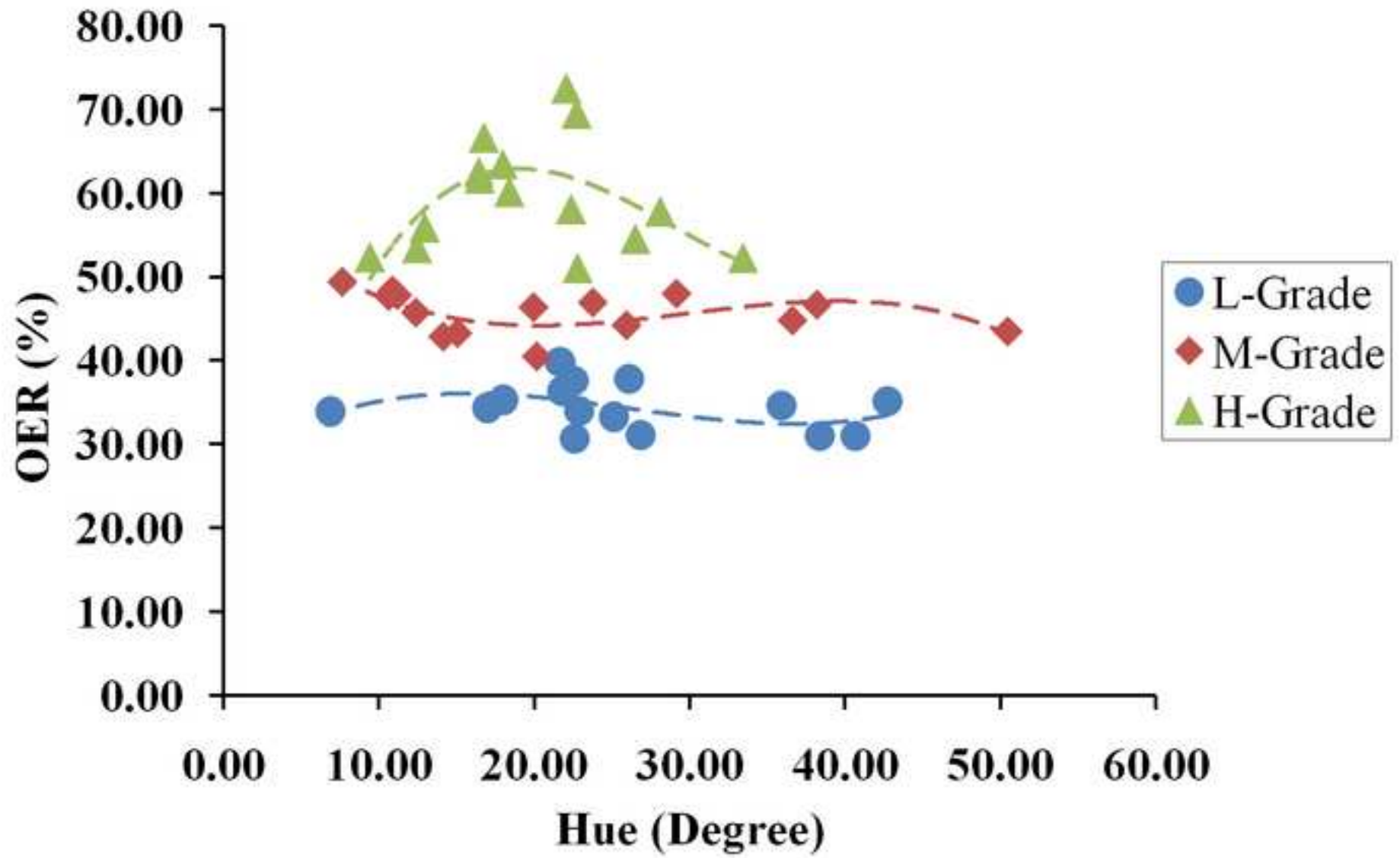
[Click here to download high resolution image](#)



(b)

Figure11

[Click here to download high resolution image](#)



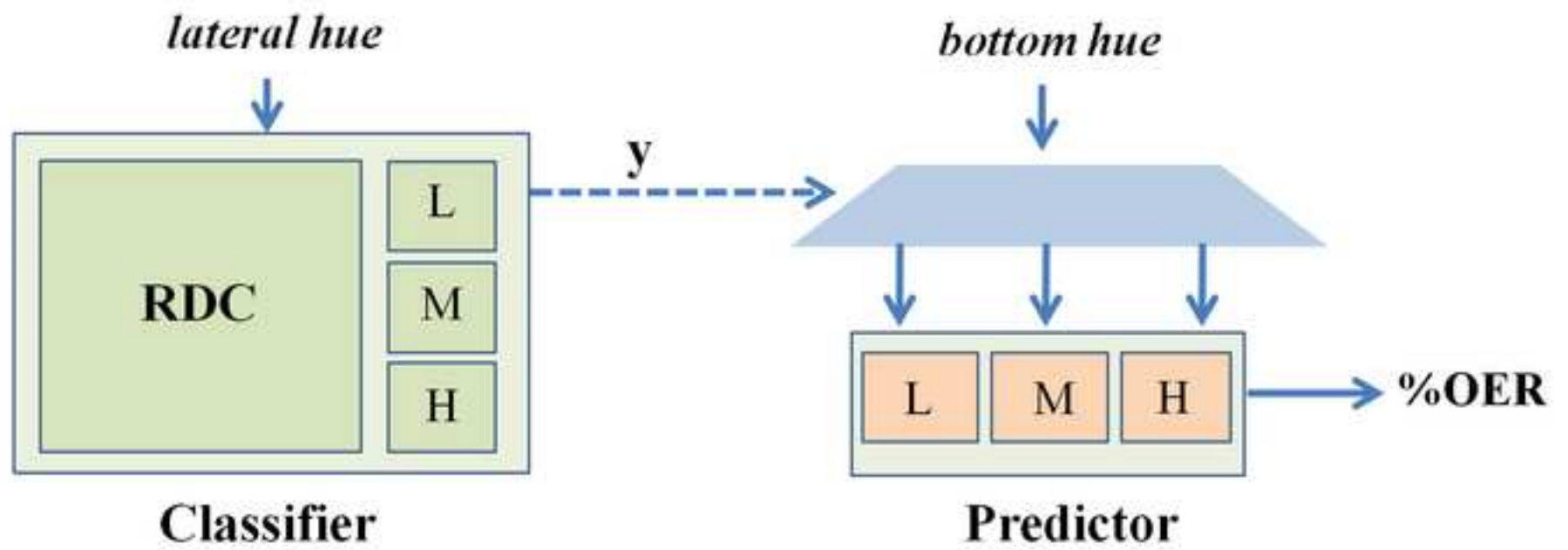


Figure13

[Click here to download high resolution image](#)

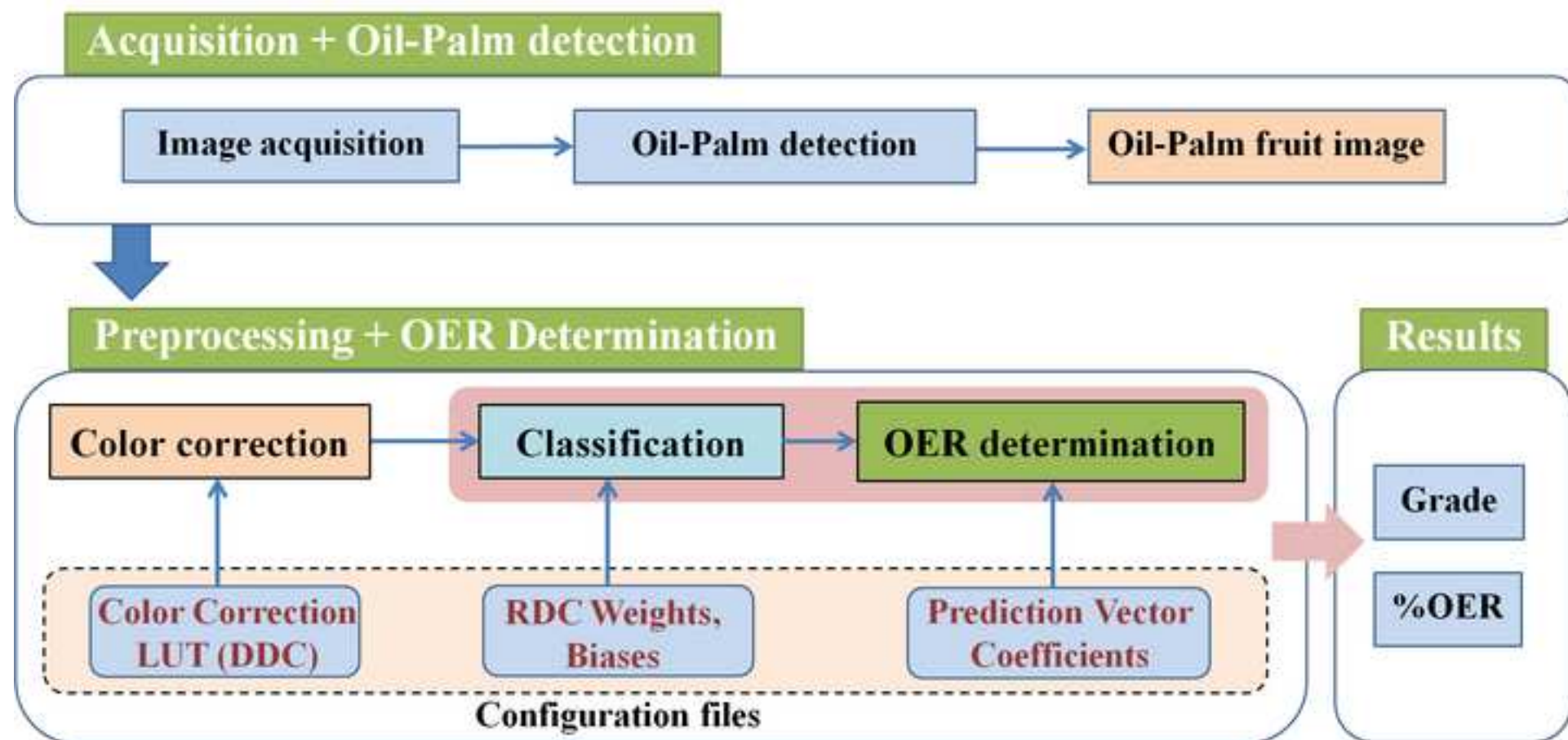


Figure14

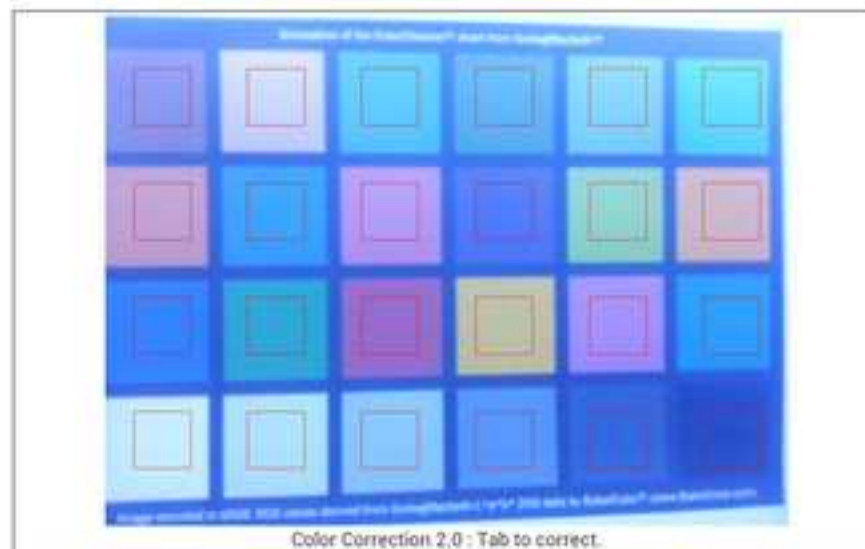
[Click here to download high resolution image](#)

### Mobile device which installed software



(a)

### Color correction



(b)

### Color correction results



(c)

### Oil-Palm OER determination




(d)

# ตำนาน

แบบสป/สผ/อสป/001-ก

หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

 <b>คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</b>  <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์ <input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร	<b>สำหรับเจ้าหน้าที่</b>	
	วันรับคำขอ <b>22</b> ส.ค. 2556	เลขที่คำขอ
	วันยื่นคำขอ <b>15</b> มี.ค. 2556	<b>1301001466</b>
	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์		
ประเภทผลิตภัณฑ์		
วันประกาศโฆษณา		เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร		เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522 แก้ไขเพิ่มเติม โดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2535 และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ.2542		
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม		
2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ ในจำนวน <b>คำขอ</b> ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัด สงขลา 90110 และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่ 979/17-21 ชั้น 14 อาคารเอส เอ็ม ทาวเวอร์ แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กทม. 10400		3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 0-7428-9322 3.3 โทรสาร 0-7428-9339 3.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th
4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด ประเทศ รหัสไปรษณีย์) นายจิตติยุทธ เข็มมยกุล ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110		5.1 ตัวแทนเลขที่ 2266 5.2 โทรศัพท์ 074-289322 5.3 โทรสาร 074-289339 5.4 อีเมล jittiyut.y@psu.ac.th
6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) 1. นายบูรวิษณุ ภมรนาถ 2. รศ.ดร. มิตร์ชัย จงเชี่ยวชำนาญ 3. ดร. สมชัย หลิมศิริโรรัตน์ 4. ผศ.ดร. ธเนศ เคารพพงศ์ และ 4. นายสากล จุฬรัตน์ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้อธิบายได้ว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ วันยื่น <b>เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ</b> <input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ		

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่วางระบุงรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่  
แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

8. การยื่นคำขออนุญาตออกนอกราชอาณาจักร				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ <input type="checkbox"/> ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์ หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ	10.2 วันที่ฝากเก็บ	10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ		
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำ เป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอยื่นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่น ๆ				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ เดือน พ.ศ. <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในการประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย ก. แบบพิมพ์คำขอ 2 หน้า ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์ 7 หน้า ค. ข้อถ้อยสิทธิ 3 หน้า ง. รูปเขียน 5 รูป 3 หน้า จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> รูปเขียน รูป หน้า <input type="checkbox"/> ภาพถ่าย รูป หน้า ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์ 1 หน้า			14. เอกสารประกอบคำขอ <input checked="" type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ <input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ <input type="checkbox"/> เอกสารการขอนับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอในประเทศไทย <input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ <input type="checkbox"/> เอกสารอื่น ๆ	
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก.....				
16. ลายมือชื่อ ( <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร; <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน)  จิตรวิทย์ วัฒนกุล (นายจิตรวิทย์ วัฒนกุล) ตัวแทนผู้รับมอบอำนาจ				

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นคำขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงาน  
เจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ





## หนังสือสัญญาโอนสิทธิขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

เขียนที่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
15 ถนนกาญจนวนิชย์  
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

วันที่ 8 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

สัญญาระหว่างผู้โอน คือ นายบุรวิชัย ภมรนาถ, รศ.ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ, ดร.สมชัย หลิมศิริโรรัตน์ และ นายสากล จุฬรัตน์ ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา และผู้รับโอน คือ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยรองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล ตำแหน่ง รองอธิการบดีฝ่ายระบบวิจัยและบัณฑิตศึกษา อยู่บ้านเลขที่ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110 และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โดย ศาสตราจารย์ นายแพทย์สุทธิพันธ์ จิตพิมลมาศ ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย อยู่ที่ เลขที่ 979/17-21 ชั้น 14 อาคารเอส เอ็ม ทาวเวอร์ แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กทม. 10400

โดยสัญญานี้ ผู้โอนซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์ เครื่องวัดปริมาณน้ำมันในทะเลลายปาล์ม โอนสิทธิในการประดิษฐ์ดังกล่าว ซึ่งรวมถึงสิทธิขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรและสิทธิอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องให้แก่ ผู้รับโอน โดยผู้รับโอนได้จ่ายค่าตอบแทนที่เหมาะสมให้แก่ผู้โอน

เพื่อเป็นพยานหลักฐานแห่งการนี้ ผู้โอนและผู้รับโอนได้ลงลายมือชื่อไว้ข้างล่างนี้

(ลงชื่อ).....ผู้โอน  
(นายบุรวิชัย ภมรนาถ)

(ลงชื่อ).....ผู้โอน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

(ลงชื่อ).....ผู้โอน  
(ดร.สมชัย หลิมศิริโรรัตน์)

(ลงชื่อ).....ผู้โอน  
(นายสากล จุฬรัตน์)

(ลงชื่อ).....ผู้รับโอน  
(ศาสตราจารย์สุทธิพันธ์ จิตพิมลมาศ)

(ลงชื่อ).....ผู้รับโอน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล )

(ลงชื่อ).....พยาน  
(นายจิตติยุทธ เปี่ยมยกกุล)

(ลงชื่อ).....พยาน  
(นายสิทธิานนท์ อมตเวทย์)