



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว)

ปริญญา

เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง คุณสมบัติเชิงกล แสง และการช้ำของลำไย

Mechanical, Light Properties and Bruising of a Longan Fruit

نامผู้วิจัย นายธีรพงศ์ ผลโพธิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์สมศิริ แสงโชติ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญาธิระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติเชิงกล แสง และการช้ำของลำไย

Mechanical, Light Properties and Bruising of a Longan Fruit

โดย

นายธีรพงศ์ ผลโพธิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธีรพงศ์ ผลโพธิ์ 2557: คุณสมบัติเชิงกล แสง และการเข้าของลำไย ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว) สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว
โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, Ph.D. 139 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เบ๊ยเขียวที่ตลาดขายส่ง และศึกษาสมบัติทางกายภาพเชิงกล แสง และการเข้าของผลลำไยที่สัมพันธ์กับการคัดคุณภาพ

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์พบว่าค่าของความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์ (Packing Density) ของพันธุ์อีดอมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.38 ± 0.01 มากกว่าของอีกสองสายพันธุ์ แสดงว่าลำไยพันธุ์อีดอมีปริมาณผลลำไยที่ครอบครองภาชนะได้มากกว่า และยังพบว่าค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ของพันธุ์อีดอมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.09 ± 0.93 N/mm น้อยกว่าของอีกสองสายพันธุ์ ซึ่งบ่งบอกว่ามีความนุ่ม (Softness) ของผลมากกว่านั่นเอง จึงทำให้เกิดความเสียหายได้ง่ายกว่า สอดคล้องกับค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 15.50% ซึ่งสูงกว่าอีกสองสายพันธุ์ ความเสียหายเชิงกลที่พบมากที่สุดเกิดกับบรรจุภัณฑ์ท้ายชั้นบนสุดของรถบรรทุกที่ขนส่ง ซึ่งภาชนะบรรจุลำไยเป็นแบบสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal) และสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) ความเสียหายส่วนใหญ่ของเป็นผลถูกแทงทะลุ ผลชำรุด ผลแตก ผลร่วง ผลเปลี่ยนรูปร่าง ผลเน่า และผลดำซึ่งถูกรวมด้วยกัมมะถันมากเกินไป ตามลำดับ ผลการศึกษาคู่สมบัติน้ำหนักด้วยแรงกดและแรงกระแทก พบว่าทั้งพลังงานกด (E_c) ที่เกิดจากแรงกด และพลังงานกระแทก (E_t) ที่เกิดจากแรงกระแทก มีผลต่อการเกิดพื้นที่รอยชำ 100% ของผลลำไยที่พลังงาน 0.027 จูล (J) และ 0.034 จูล (J) ตามลำดับ และพบว่าของค่าเปอร์เซ็นต์แสงสะท้อนที่มองเห็นได้ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร สามารถจำแนกการเข้าและไม่เข้าผลลำไยสด พบว่าโมเดล PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis) สามารถจำแนกได้ 100% ดีกว่าโมเดล SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy)

Teerapong Pholpo 2014: Mechanical, Light Properties and Bruising of a Longan Fruit.
Doctor of Philosophy (Postharvest Technology), Major Field: Postharvest Technology,
Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Assistance Professor Siwalak
Pathaveerat, Ph.D. 139 pages.

This study aimed to investigate the properties of longan fruit of E-dor, Si Chomphu, and Biew Khieo varieties: 1) some physical properties; 2) mechanical property based on compression and impact; 3) damage forms of longans; and 4) reflective visible spectrum indicating bruise on fresh longans.

The study revealed the physical properties of the three varieties that the packing density of the E-dor variety, with a mean of 0.38 ± 0.01 more than the other two varieties. This indicated that the E-dor varieties of fruits can occupy container volume more than the other two varieties. It was also found that the fruit firmness of the E-dor varieties, with a mean of 5.09 ± 0.93 N/mm was less than the other two varieties, which indicated the softness of the fruit, resulting easier damage. It was corresponded to the highest percentage of damage after harvesting (15.50%), compared to the other varieties. Mechanical damage of longans in containers was most occurred at the top most trapezoidal and rectangular container laid at the rear of the truck. Most damages were in the forms of punctured, bruise, cracked, detached, deformed, decompose, and black (too much sulfur fumigation), respectively. The study of mechanical property based on compression and impact revealed that compression energy (E_c) and impact energy (E_i) had an effect on 100% bruise area occurrence of longans at 0.027, and 0.034 J, respectively. And it also found that the reflective spectrum observed at 400-700 nanometers could differentiate bruise and non-bruise of fresh longans. The PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis) model could correctly classify it for 100 percent and it was better than SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) model.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย การนำเสนอผลงานทางวิชาการ ดีพิมพ์การเผยแพร่ผลงาน ในระดับนานาชาติ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะดีพิมพ์การเผยแพร่ผลงาน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วง พร้อมด้วยกันนี้ขอขอบคุณ Professor Dr. Pictiew Chen ที่ให้คำปรึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส สิริสมบุญ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ในการดีพิมพ์และนำเสนอผลงานทางวิจัยในระดับนานาชาติ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักศึกษาศึกษาและวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (PHTICKU) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณพระครูสมุห์ ทรงวิทย์ อธิวโร (ผลโพธิ์) ที่ให้ทุนในการเรียนเพิ่มเติมพร้อมให้คำชี้แนะต่อข้าพเจ้า และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ และคุณแม่ ที่ล่วงลับไปแล้วนั้น ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ และสุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณ ภรรยา บุตร และญาติๆ ที่ให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้คุณความดีที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้พึงสำเร็จขออุทิศให้แด่ ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต จริโมภาส

ธีรพงศ์ ผลโพธิ์
กันยายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
สรุป	56
ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	59
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูล	69
ภาคผนวก ข การเผยแพร่ผลงาน	103
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	139

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่	18
2	ขนาดของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	41
3	คุณสมบัติทางกายภาพของลำไยทั้งสามสายพันธุ์	44
4	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์อีดอในบรรจุภัณฑ์ แบบที่ 1 และแบบที่ 2	46
5	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์สีชมพูในบรรจุภัณฑ์ แบบที่ 1 และแบบที่ 2	46
6	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์เปี้ยวเขียวในบรรจุภัณฑ์ แบบที่ 1 และแบบที่ 2	46
7	ค่าการจำแนกของผลลำไยที่แบบซ้ำและแบบไม่ซ้ำโดยใช้สเปกตรัมระหว่าง 400-700 นาโนเมตร โดยวิธี PCA, SIMCA และ PLS_DA	54
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาตรของตะกร้าแบบทรงปริามิด (Trapezoidal)	70
ก2	ปริมาตรของตะกร้าแบบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle)	71
ก3	ปริมาตรของทรงแบบรถกระบะบรรทุก (Pick-up track bed)	72
ก4	ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของผลลำไยพันธุ์อีดอ	73
ก5	ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของผลลำไยพันธุ์เปี้ยวเขียว	77
ก6	ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของผลลำไยพันธุ์สีชมพู	82
ก7	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก8	ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (Porosity, η) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	88
ก9	ค่ามุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	90
ก10	ค่าความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	92
ก11	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ของลำไยพันธุ์อู๊ดอ	93
ก12	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ของลำไยพันธุ์เปี้ยวเขียว	95
ก13	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ของลำไยพันธุ์สีชมพู	97
ก14	ความแน่นเนื้อ (Firmness) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์	98
ก15	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์อู๊ดอในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ แบบที่ 2	101
ก16	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์เปี้ยวเขียวในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ แบบที่ 2	101
ก17	ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์สีชมพูในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ แบบที่ 2	102

สารบัญภาพ

ภาพผนวกที่	หน้า
1 ผล เนื้อ และเมล็ดของลำไย	4
2 ลักษณะกราฟของการกระทำแบบกระแทก	11
3 การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับวัดระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน	12
4 ระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทก	13
5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	17
6 กราฟการตอบสนองเป็นสเปกตรัมแสงสว่างของส้ม	18
7 บรรจุภัณฑ์แบบต่างๆของผลลำไยสด	26
8 การทดลองมูมก่องพื้นของวัสดุแบบบรรจุ (Filling)	31
9 การทดลองมูมก่องพื้นของวัสดุแบบแบบถ่ายเท (Emptying)	32
10 การทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียหายบนแผ่นพื้นผิวสแตนเลส	33
11 การทดลองหาความแน่นเนื้อของผลลำไย	34
12 รูปบรรจุภัณฑ์ (ก) ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็ก (ข) ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ (ค) กระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน	35
13 การกดผลลำไยสดของเครื่อง Texture Analyzer	37
14 การทดลองการกระแทกผลลำไยสดของเครื่องแบบใช้สนามแม่เหล็กที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ	38
15 การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ชำ (D, mm)	39
16 เครื่อง Spectrophotometer	40
17 ความเสียหายแบบต่างๆของผลลำไยสด	47
18 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความชำของลำไยสดกับ	48
19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความชำของลำไยสดกับ	49
20 ลักษณะพื้นที่ชำ ก) ลักษณะพื้นที่ชำเป็นวงกลม ข) ขนาดพื้นที่ที่ชำ	49
21 ค่าความสัมพันธ์พื้นที่ชำกับพลังงานกดที่ทำให้ชำภายใต้แรงกด (Compression)	50
22 ค่าความสัมพันธ์พื้นที่ชำกับพลังงานกระแทกที่ทำให้ชำภายใต้แรงกระแทก (Impact)	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
23	ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมสะท้อนของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำ	52
24	ค่า X-Loading ของ โมเดล PCA ของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำ	52
25	ค่า Score Plot ของผลลำไยช้ำ (Bruised) และผลลำไยไม่ช้ำ (Non-bruised)	53
26	ตัวอย่างภาพผลลำไยที่ไม่ช้ำ	53
27	ตัวอย่างภาพผลลำไยที่ช้ำ	54

คำอธิบายสัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

GMD	=	Geometer Mean Diameter
Sp	=	Sphericity
SG	=	Specific Gravity
PD	=	Packing Density
AR	=	Angle of Repose
μ	=	Coefficient of static friction
η	=	Porosity
BA	=	Bruise Area
PCA	=	Principal Component Analysis
PLS-DA	=	Partial Least Squares Discriminant Analysis
SIMCA	=	Soft Independent Modeling of Class Analog

คุณสมบัติเชิงกล แสง และการซ้ำของลำไย

Mechanical, Light Properties and Bruising of a Longan Fruit

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และเป็นผลไม้ที่ทางรัฐบาลโดยกรมวิชาการเกษตรได้จัดให้อยู่ในกลุ่มสินค้าส่งออก ซึ่งปฏิบัติกันหลายรูปแบบ กล่าวคือ ลำไยสด ลำไยอบแห้ง ลำไยแช่แข็งจนแข็ง และลำไยบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้ ในปี พ.ศ. 2556 มีพื้นที่เพาะปลูกลำไยทั่วประเทศจำนวน 1,092,739 ไร่ เป็นพื้นที่ที่ให้ผลจำนวน 1,036,977 ไร่ ได้ผลผลิตจำนวน 861,926 ตัน ในปีเดียวกันมีปริมาณการส่งออกลำไยสด 413,399,581 กิโลกรัม มีมูลค่า 8,503,246,383.00 บาท ลำไยอบแห้งจำนวน 140,232,430 กิโลกรัม มีมูลค่าการส่งออก 4,026,272,275.00 บาท ลำไยแช่เย็นจนแข็งจำนวน 55,101 กิโลกรัม มีมูลค่าการส่งออก 9,343,573.00 บาท ลำไยลำไยบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้ จำนวน 12,273,752 กิโลกรัม มีมูลค่าการส่งออก 633,159,450.00 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) พันธุ์ที่นิยมปลูกคือ อีดอ ชมพู เบี้ยวเขียว และแก้ว ผลผลิตลำไยที่บริโภคภายในประเทศมีเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือส่งออกต่างประเทศในรูปผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูป (มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2557)

ผลผลิตเกษตรส่วนใหญ่เกิดความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยเกิดในระหว่างกระบวนการ การบรรจุ การลำเลียง และการขนส่ง จากสวนไปยังตลาด ความเสียหายของลำไยในบรรจุภัณฑ์มีประมาณ 9.6% - 14.8% (Jarimopas, 1985) สาเหตุเนื่องจากบรรจุภัณฑ์ได้รับการะเชิงกล อันได้แก่ การกระแทก และการสั่นสะเทือน กระทำต่อภาชนะบรรจุ และส่งผลให้ผักและผลไม้ภายในภาชนะบรรจุชำเสียหาย (Mohsenin, 1996) การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวก่อให้เกิดการเสียหายแก่ผลไม้เช่น มะละกอ มะม่วง (Chonhenchob and Singh, 2003, 2005) ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เชิงกล แสง และการซ้ำของผลลำไย ออกเผยแพร่เลย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพเชิงกล แสง และการซ้ำของลำไยที่สัมพันธ์กับการคัดคุณภาพ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เปี้ยวเขียว ที่ตลาดขายส่ง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพเชิงกล แสง และการซ้ำของลำไยที่สัมพันธ์กับการคัดคุณภาพ



การตรวจเอกสาร

ลำไย

ลักษณะโดยทั่วไป

ลำไย มีชื่อสามัญว่า “Longan” มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Dimocarpus longan* Lour. ลำไย เป็นไม้ผลยืนต้นกึ่งเมืองร้อน มีลำต้นเจริญเต็มที่สูงประมาณ 10 - 12 เมตร ทรงพุ่มแผ่กว้างประมาณ 6 - 8 เมตร ทรงพุ่มต้นลำไยที่ปลูกจากกิ่งตอนมักแผ่กว้างเป็นรูปครึ่งวงกลม เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาล หรือสีเทาปนน้ำตาล เปลือกลำต้นแตกเป็นร่องและมีสะเก็ดเมื่อต้นมีอายุมาก กิ่งกลม ทามุมกับลำต้น แฉก เนื้อไม้เปราะทำให้หักง่าย ใบประกอบแบบขนนก ปลายคู่ มีใบย่อย 2 - 6 ใบ ใบย่อยรูปรี ปลายทู่ถึงติ่งแหลม โคนใบเบี้ยว ใบเกลี้ยง ดอกมีสีขาวถึงสีเหลือง ดอกออกเป็นช่อแบบแยกแขนงที่ ปลายกิ่ง ลำไยอายุตั้งแต่ 3 ปี จะเริ่มให้ผลผลิตและจะให้ผลเต็มที่เมื่ออายุ 7 ปีขึ้นไป ลำไยสามารถให้ ผลผลิตได้มากกว่า 30 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การดูแลรักษา การตัดแต่งกิ่ง ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกถึงเก็บเกี่ยวผลผลิตประมาณ 6 เดือน ผลผลิตเฉลี่ยของลำไยที่โตเต็มที่ประมาณ 200 กิโลกรัม / ต้น ปริมาณของผลผลิตอยู่ระหว่าง 60 - 90 ผลต่อกิโลกรัม ฤดูกาลเก็บเกี่ยว ผลผลิตอยู่ระหว่างเดือนกรกฎาคม - เดือนสิงหาคม พันธุ์ที่ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกคือคอ (อีคอ) เบี้ยวเขียว สีชมพู และแก้ว เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 100 – 1000 เมตร มีความลาดเอียง 10 – 15 % ดินที่มีหน้าดินลึกมากกว่า 50 เซนติเมตร มีอินทรีย์วัตถุมาก มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 5.5 – 6.5 และมีการระบายน้ำดี อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 20 - 25 องศาเซลเซียส และในช่วงก่อนออกดอกต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส นานติดต่อกันประมาณ 2 สัปดาห์ ปริมาณน้ำฝนไม่ต่ำกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี และมีการกระจายของฝนดี (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). สวก. 2557)

เมล็ดลำไยมีรูปร่างกลมหรือกลมแบน เปลือกหุ้มเมล็ดเรียบเป็นมัน สีสน้ำตาลเข้มหรือดำ ส่วนที่ติดขั้วเมล็ดมีวงกลมสีขาว คล้ายกับลูกขนุนดำ และเป็นที่มาของคำว่า “ตามังกร” ขนาดและน้ำหนักเมล็ดแต่ละพันธุ์แตกต่างกันเฉลี่ย 1.91 กรัม (แสดงภาพที่ 1) (เรืองยศ, 2531)



ภาพที่ 1 ผล เนื้อ และเมล็ดของลำไย

ลักษณะประจำพันธุ์

ลำไยที่นิยมบริโภคกันมากในปัจจุบัน เป็นลำไยกะโหลก เพราะให้ผลใหญ่ เนื้อหนา และรสชาติหอมหวาน ปัจจุบันมีพันธุ์ใหม่ๆ มากมาย แต่พันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก ได้แก่ พันธุ์อีดอ เบี้ยวเขียว สีส้มพูและแก้ว ซึ่งมีลักษณะประจำพันธุ์ดังนี้ (ฉลองชัย, 2551)

1. พันธุ์อีดอ เป็นพันธุ์เบา แก่ก่อนพันธุ์อื่น การเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลสม่ำเสมอ ออกผลทุกปี ผลผลิตดีพอสมควร เป็นพันธุ์ที่มีขนาดผลค่อนข้างใหญ่ รูปทรงผลกลม ด้านขั้วผลนูน เปลือกสีน้ำตาล ผิวเป็นกระหรือตาต่างๆ กระจกสีน้ำตาลเข้ม เนื้อมีสีขุ่นค่อนข้างเหนียว มีกลิ่นคาวเล็กน้อย รสหวาน ของแข็งละลายน้ำได้ 18 บริกซ์ แต่ถ้าเก็บไว้ได้นานจะมีรสจืดลง เนื้อไม่ค่อยกรอบ เมล็ดมีสีน้ำตาลแก่ โดพอประมาณ ค่อนข้างแบน จุกไม่ใหญ่นัก ถ้าปล่อยให้แก่จัดจะขยายใหญ่และแข็ง หรือที่เรียกว่าขึ้นหัว มีแหล่งปลูกที่สำคัญ ได้แก่ ภาคเหนือตอนบน ออกดอกและติดผลง่ายกว่าพันธุ์อื่น ให้ผลผลิตค่อนข้างสม่ำเสมอ เริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุ 4 ปีหลังปลูกออกดอกกลางเดือนมกราคม เก็บผลผลิตเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ลักษณะผลค่อนข้างกลม กว้าง 2.8 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร สีน้ำตาลอ่อน จำนวนผลโดยเฉลี่ย 85 - 94 ผลต่อกิ่งโลกรัม นิยมบริโภคสด และแปรรูป (ฉลองชัย, 2551)

2. พันธุ์สีชมพู ผลขนาดปานกลาง ทรงผลค่อนข้างกลมแต่เบี้ยวเล็กน้อย ผิวเปลือกมีสีน้ำตาลแดง มีกระคล้ายตลอดผล และถ้ายิ่งแก่จัดขึ้นผลจะยิ่งคล้ำ เปลือกหนาแข็งเปราะ แต่ถ้าช่อใดผลตกมากผิวจะบาง เป็นพันธุ์ที่มีคุณภาพการบริโภคดีมาก รสหวานจัดที่สุด เนื้อสีชมพูเรื่อๆ และยิ่งแก่จัดสีจะเข้มขึ้น เนื้อหนาและกรอบ ลักษณะเนื้ออ่อนแต่ไม่ละ ล่อน มีกลิ่นหอม ของแข็งละลาย

น้ำได้ 21 บริกซ์ ช่อยาว ปีใดที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมดี จะให้ผลผลิตสูงมาก เมล็ดค่อนข้างเล็ก เบี้ยวแบนเล็กน้อย สีสน้ำตาลแก่และผิวเรียบเป็นมัน จุกที่ขั้วเล็ก แม้จะแก่จัดก็ไม่ขึ้นหัว เป็นพันธุ์ที่นิยมรับประทานมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับข้อเสียของพันธุ์สีชมพูคือ ดันไม่ค่อยแข็งแรง ต้องการดินที่อุดมสมบูรณ์และการดูแลรักษาที่ดีมีน้ำสม่ำเสมอและความชื้นในอากาศสูง ออกดอกและติดผลยากกว่าพันธุ์ดอ ผลผลิตไม่สม่ำเสมอ เริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุ 4 ปีปลูก ออกดอกปลายเดือนมกราคม เก็บผลผลิตปลายเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ลักษณะผล ค่อนข้างกลม กว้าง 2.9 เซนติเมตร หนา 2.7 เซนติเมตร ยาว 2.7 เซนติเมตร สีสน้ำตาลอ่อน เนื้อกรอบ สีชมพูเล็กน้อย สีเนื้อเข้มขึ้นเมื่อผลแก่จัด รสหวานจัด กลิ่นหอม ขนาดผลโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับพันธุ์อินิยมบริโก (ฉลองชัย, 2551)

3. พันธุ์เบี้ยวเขียว หรืออีเบี้ยวเขียว เป็นพันธุ์ที่รู้จักกันแพร่หลาย ผลค่อนข้างใหญ่ ทรงผลมีลักษณะแบนและเบี้ยวมากเห็นได้ชัดเจน ผิวเปลือกสีน้ำตาลอมเขียว เปลือกหนาและค่อนข้างเหนียว เมื่อบีบดูจะรู้สึกแน่นมือ แห้งกรอบ ล่อน มีกลิ่นหอม รสหวานจัด ของแข็งละลายน้ำได้ 22 บริกซ์ เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็กสีน้ำตาลแดงรูปร่างเบี้ยวและแบนเล็กน้อยจุกที่ขั้วเล็ก ออกดอกและติดผลยาวกว่าพันธุ์สีชมพู เริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุ 4 - 5 ปีหลังปลูก ออกดอกเดือนมกราคม เก็บผลผลิตเดือนสิงหาคม - กันยายน ลักษณะผลแบนและเบี้ยว กว้าง 3.0 เซนติเมตร หนา 2.6 เซนติเมตร ยาว 2.8 เซนติเมตร สีสน้ำตาลอ่อนออกเขียวเล็กน้อย มีบ่าผล ไม่เท่ากัน เนื้อกรอบสีขาวค่อนข้างใส รสหวานจัดกลิ่นหอมนิยมบริโก (ฉลองชัย, 2551)

4. พันธุ์เหั่ว หรือพันธุ์อีเหั่ว มีผลโตขนาดกลางถึงใหญ่ รูปทรงค่อนข้างเบี้ยว หัวบวม ผิวสีน้ำตาล กระจกล้ำตลอดผล สากมือ เป็นพันธุ์ที่มีคุณภาพการบริโภคดีมาก เนื้อแห้งสีขาวขุ่น รสหวานแหลม และกรอบที่สุด ของแข็งละลายน้ำได้ 22 บริกซ์ เปลือกหนาทนทานต่อการขนส่งและเก็บไว้ได้นาน เมล็ดค่อนข้างเล็ก กลม สีสน้ำตาลแก่ ผิวเรียบ จุกที่ขั้วเล็ก แต่ถ้าแก่จัดไปขั้วจะใหญ่สูงและแข็ง สำหรับข้อเสียของลำไยพันธุ์นี้คือ ออกผลไม่สม่ำเสมอและออกผลเว้นปี มีช่วงการเก็บผลสั้น ถ้าเก็บช้ารสชาติจะจืด มีข้อสั้น ก้านแข็งทำให้บรรจุลงภาชนะยาก ผลเบี้ยวเล็กน้อย จึงมักจะปลอมขายเป็นพันธุ์เบี้ยวเขียวซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่ก็เป็นพันธุ์ที่โรงงานต้องการมากเพราะกรอบและทน ออกดอกติดผลยากกว่าพันธุ์ดอ เริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุ 4 - 5 ปีหลังปลูก ออกดอกปลายเดือนมกราคม เก็บเกี่ยวผลผลิตปลายเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม ลักษณะผลค่อนข้างกลมกว้าง 2.8 เซนติเมตร หนา 2.7 เซนติเมตร ยาว 2.7 เซนติเมตร สีสน้ำตาลเนื้อกรอบสีขาวค่อนข้างใส รสหวานจัดกลิ่นหอมนิยมบริโก (ฉลองชัย, 2551)

วิธีการเก็บผลลำไยสด

ลำไยนับตั้งแต่เริ่มออกดอกประมาณ 5 เดือนผลก็จะเริ่มแก่พอที่จะเก็บได้ ซึ่งสังเกตได้จากขนาดของผลจะโตเต็มที่ สีผิวของผลจะมีสีคล้ำขึ้น ผิวที่เปลือกจะเรียบขึ้น ที่ผิวเปลือกด้านในมีร่องคล้ายร่างแห รสหวานและเมล็ดมีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ การเก็บลำไยแต่ละต้นควรทยอยเก็บเป็น 2 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 7 – 10 วัน ในแต่ละปีควรจดบันทึกวันออกดอก วันเก็บ ปริมาณผลผลิตไว้ด้วย สำหรับข้อสำคัญในการเก็บลำไยได้แก่ ไม่เก็บลำไยในวันที่ฝนตก ไม่ควรปล่อยลำไยทิ้งไว้สุกนานเกินไปจนเกิดการขึ้นหัวเพราะจะทำให้ลำไยมีรสจืด ไม่หักก้านขอลำไยลึกเกินไป จะทำให้ต้นโทรม ควรเก็บลำไยในตอนเช้ามืดหรือตอนบ่าย เมื่อเก็บลำไยแล้วต้องนำส่งตลาดทันที และการเก็บลำไยควรใช้กรรไกรตัดเพื่อให้แตกข้อใหม่ได้เร็ว (พาวัน และ คณะ, 2547)

วิธีการเก็บ ใช้พะองหรือกระโถไม้ไฟพาดในพุ่มหรือที่พุ่มแล้วปีนขึ้นไปตัดกิ่งลำไยใส่เข่ง เมื่อเต็มเข่งก็จะโยยเชือกลงมาให้คนข้างล่างขนลำไยออกและหักข้อจากกิ่ง แล้วตัดขนาดผลที่เล็กและลิบออกแล้วนำมาบรรจุเข่งที่เอาใบลำไยวางรองกันเข่งไว้แล้ว วางขอลำไยลงโดยวางเวียนเอาปลายขอลงและวางซ้อนเรียงกันขึ้นมา เมื่อจะเต็มเข่งจึงใช้ใบลำไยปิดหน้า เอาฝาปิดแล้วใช้ไม้สองอันขัดไว้ เข่งที่ใช้มีขนาดกว้าง 35 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร บรรจุได้ประมาณ 21 – 22 กิโลกรัม ถ้าหากเปลี่ยนมาใช้กล่องกระดาษอาจทำให้ขนได้สะดวกขึ้น ผลผลิตของลำไยแต่ละต้นประมาณ 30 – 100 กิโลกรัมต่อต้น ขึ้นอยู่กับพันธุ์ อายุ ความสมบูรณ์ของต้นและดิน ลำไยจะออกสู่ตลาดประมาณกลางเดือนกรกฎาคม-ต้นเดือนสิงหาคม (ธีรนุช และ พาวัน, 2548)

การปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยว (พาวัน และ คณะ, 2547)

1. ดัชนีการเก็บเกี่ยวของลำไย อาศัยนับจากวันดอกบาน 50% ถึงวันเก็บเกี่ยวใช้เวลาประมาณ 6 เดือน และสังเกตลักษณะของผล ดังนั้นขนาดผลโตเต็มที่ สีของผลมีสีเข้มกว่าเดิมผิวเปลือกด้านนอกจะเรียบและเนียน เปลือกด้านในเป็นร่างแหและรสหวานจัด ถ้าเก็บผลแก่เกินไปเนื้อผลจะแห้ง มีสีขาวขุ่นความหวานลดลงและเมล็ดจะขึ้นหัว

2. การเก็บเกี่ยว ควรระวังไม่ให้ผลเกิดแผลและนำผลผลิตเข้าที่ร่มหรือในโรงเรือนคัดขนาด และจัดชั้นคุณภาพบรรจุในภาชนะบรรจุหีบห่อการลดอุณหภูมิก่อนการเก็บรักษาหรือขนส่ง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น จุ่มน้ำเย็น หรือเข้าห้องเย็น

3. การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ควรเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90 - 95% จะเก็บได้นาน 30 - 45 วัน หรือเก็บที่อุณหภูมิ 5 - 10 องศาเซลเซียส จะเก็บได้นาน 20 - 30 วัน

4. การรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นิยมสำหรับลำไยส่งออกเพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อรา และการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเปลือก ผลลำไยก่อนรมควันต้องแห้ง ถ้ามีหยดน้ำบนผิวจะทำให้ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างบนผิวที่เปียกมากกว่าบริเวณอื่น

การสั่นสะเทือนและความชำ (Vibration and Bruising)

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยเกิดในระหว่างกระบวนการบรรจุ การลำเลียง และการขนส่ง จากสวนไปยังตลาด ความเสียหายของลำไยในบรรจุภัณฑ์มีประมาณ 9.6% - 14.8% (บัณฑิต, 2529) การขนส่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและการกระทบกับบรรจุภัณฑ์ขายส่งทำให้ผักและผลไม้ในบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวเกิดความเสียหาย (Mohsenin, 1996)

การสั่นสะเทือนเปรียบเสมือนการกระทบ โดยเคลื่อนที่ด้วยระยะทางสั้น ๆ แก้มิลลิเมตร และใช้เวลาน้อยแต่เกิดบ่อยครั้ง วัดเป็น 100 ครั้งหรือ 1,000 ครั้ง ต่อวินาที หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz) ตัวย่อคือ Hz ขนาดของการสั่นสะเทือนใหญ่จะทำให้ผลผลิตเสียหายมากขึ้น ปัจจุบันตัวแปรที่นิยมใช้บอกขนาดของการสั่นสะเทือน คือ ความเร่ง (Acceleration) หมายถึง ขนาดความเข้มของการสั่นสะเทือนในรูปค่าจี (g) ซึ่งเป็นตัวแปรสำหรับใช้ทดสอบหาคุณสมบัติของการสั่นสะเทือน (Peleg, 1985)

O'Brien *et al.* (1965) เชื่อว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเสียหายของผลไม้ในระหว่างที่มีการขนส่ง ได้แก่ ขนาดหรือแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นสะเทือน ความถี่หรือจำนวนรอบการสั่นสะเทือนต่อหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยเป็นรอบต่อวินาทีหรือใช้ตัวย่อ cps และช่วงเวลาที่ผลไม้ได้รับความเร่งนั้น ขนาดของความเร่งของการสั่นสะเทือน (Magnitude of vibration acceleration) ระหว่างการขนส่งขึ้นกับปัจจัยคือ ชนิดของรถบรรทุก (Jarimopas *et al.*, 2005)

ผลการทดลองส่วนใหญ่พบว่า ขนาดของความเร่งสูงสุดอยู่ที่ชั้นบนสุดและจะค่อย ๆ ลดลงตามความสูงของชั้นผลไม้ จึงมีความเสียหายของผลไม้เกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของตู้คอนเทนเนอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hinsch *et al.* (1993) ที่เสนอแนวความคิดว่า ความเร่ง

ตามแนวตั้งมีผลต่อขนาดของความเร่งของการสั่นสะเทือนมากกว่าความเร่งตามแนวนอน เนื่องจากความเร่งตามแนวนอนและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหนะ

Hinsch et al., 1993 และ Jarimopas et al., 2005 ใช้เครื่องมือทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อจำลองสถานการณ์ขนส่งการสั่นสะเทือนทำให้ผลผลิตเกิดความเสียหาย ทำให้สินค้าขายไม่ออก หรือจำต้องลดราคา

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยท่านอื่นๆ อีกหลายคน ได้ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพล และความซ้ำเสียหายที่เกิดขึ้นกับผักและผลไม้ทั้งการทำการทดลองกับการขนส่งผักผลไม้จริง ได้แก่ O'Brin et al., 1963; Jarimopas et al., 2005; Chonhenchob และ Singh, 2004; Guillon, 1963; วสันต์, 2545; ทรงธรรม และคณะ, 2549

การกระแทกและความซ้ำ (Impact and Bruising)

นักวิจัยพบว่า การกระแทกของผลไม้บนพื้นผิวเรียบแข็งมีความใกล้เคียงกับการกระแทกของทรงกลมยืดหยุ่นและค่าความแน่นเนื้อของผลไม้มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของแรงกระแทก Nahir et al. (1986) รายงานว่าเมื่อนำมะเขือเทศปล่อยจากที่สูง 70 มิลลิเมตรตกลงสู่พื้นผิวเรียบแข็ง การตอบสนองของแรงมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับน้ำหนักของผลไม้และค่าความแน่นเนื้อ Delwiche et al. (1987) ศึกษาวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกษตรตกลงกระแทกสู่พื้นผิวเรียบแข็งและพบว่าลักษณะแรงกระแทกมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของผลไม้และค่าความแน่นเนื้อที่อ่านได้จาก penetrometer

ผักผลไม้มักถูกการกระแทกกระทำในระหว่างที่มีการจัดการหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต การขนส่ง การลำเลียงและจำหน่ายผลผลิตดังกล่าวไปสู่ผู้บริโภค ก่อให้เกิดการซ้ำจากการกระแทก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพเสื่อมลง (Garcia et al., 1988; Singh and Marcondes, 1992)

จุดเริ่มของรอยซ้ำ (Bruise Threshold) หมายถึง ค่าความสูงของผักและผลไม้ที่ใช้ทดสอบ โดยวิธีการปล่อยตกลงสู่พื้นผิวที่แข็ง จนกระทั่งผลผลิตนั้นเกิดความเสียหายขึ้น (Bajema and Hyde, 1998)

การกระแทกเป็นสาเหตุที่สำคัญที่สุดของความเสียหาย (การชำ) ในผลไม้และ รอยชำ ถูกประเมินว่าเป็นปริมาณของเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงไปได้ผิวสัมผัส ซึ่งเปลี่ยนสีไปและนิ่ม (Ruiz Altisent, 1991) การกดที่มากเกินไปทำให้เกิดการชำด้วย เช่นเดียวกับการกระแทกชำ (Bajema and Hyde, 1998)

การชำเป็นความเสียหายที่เกิดกับเนื้อเยื่อของพืชโดยแรงภายนอก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในเนื้อสัมผัส และ/หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสี กลิ่น และเนื้อสัมผัส การชำไม่ทำให้ผิวแตก (Mohsenin, 1996)

รอยชำเป็นผลของการกระแทกและการกดของผลไม้ต่อผลไม้ ต่อภาชนะ ส่วนต่างๆ ของเครื่องคัดแยกที่ไม่ได้ห่อหุ้มวัสดุกันกระแทก การกระแทก (Impact) ทำให้เกิดปริมาตรชำแปรผันกับพลังงานกระทำ (Input energy) และพลังงานดูดกลืน (Adsorbed energy) ความรุนแรงของความเสียหายของผลไม้มีความสัมพันธ์เบื้องต้นกับ 1) ความสูงของการตก 2) ความเร็วเริ่มต้นกระแทก 3) จำนวนครั้งการกระแทก 4) ชนิดและขนาดของผิวกระแทก 5) สมบัติกายภาพของผลไม้ 6) การลั่นสะเทือน (บัณฑิต, 2549)

การทดสอบการกระแทก (Impact test) Fluck and Ahmed (1973) ได้แนะนำว่าอัตราภาระเริ่มต้น ความเร็วเข้าใกล้การกระแทก (Impact approach velocity) ที่ต่ำกว่า 250 มม./วินาที เรียกว่า ภาระช้า (Slow loading) สำหรับผลิตภัณฑ์เกษตรแล้ว อัตราภาระเริ่มต้นของการกระแทกถูกพิจารณาว่าอยู่ในช่วง 250 มม./วินาที (ปล่อยผลไม้ตกจากที่สูง 3.2 มม.) ไปจนถึง 40 ม./วินาที วิธีการทดสอบการกระแทกมี 6 ประเภท (บัณฑิต, 2549) คือ

1) แบบปล่อยผลไม้ตกอิสระ (Drop Test) Rumsey (1974) ได้ทดสอบการปล่อยตกของผลแอปเปิ้ลทั้งผลพบว่ารอยบุ๋ม (indentation) สัมพันธ์กับเวลา การกระแทกเกิดกับผลไม้ที่จุดสัมผัสจุดเดียว แต่ควบคุมให้พลังงานกระแทกคงที่ยาก เพราะว่าผลไม้ต่างผลมีมวลต่างกัน ทำให้มีความแปรปรวนในค่ามวลของผลไม้รูปร่างต่างกัน อาจทำให้ยากในการกำหนดจุดกระแทก

2) แบบปล่อยมวลแข็งผิวเรียบตกใส่ผลไม้ (Falling mass) การใช้มวลในการกระแทกต้องใช้มวลแข็งใหญ่และน้ำหนักมาก ทำให้กลไกการปล่อยตกอาจยุ่งยาก การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในผลเดียวกัน อาจจะทำให้ได้น้อยจุดกว่า เพราะว่าให้พื้นที่ผิวสัมผัสใหญ่กว่า

3) แบบปล่อยหัวปลีเจียร์แข็งตกใส่ผลไม้ (Falling Plunger) ในแบบนี้นิยมนำไปใช้ทดลองเพราะจะได้ค่าพลังงานกระแทกที่คงที่ ดังเช่น การปล่อยหัวปลีเจียร์ตกกระทบกับผลไม้ที่วางอยู่บนดินน้ำมัน ยิ่งใช้หัวปลีเจียร์ (Plunger) น้ำหนักน้อยกว่าผลไม้หลายๆ จะทำให้ได้สัญญาณกระแทกชัดเจน จะได้พลังงานกระแทกที่ระดับความสูงหนึ่งๆคงที่ (Chen et al., 1996) หัวกระแทกขนาด 10 กรัม จะใช้ในการระบุรอยช้ำ (Bruise susceptibility) ในผลมะม่วงน้ำดอกไม้ (Chonhenchop and Singh, 2003)

4) แบบแกว่งผลไม้ (Simple pendulum) ในแบบนี้จะทำให้มวลไม่คงที่ เพราะจะต้องผูกผลไม้ทุกครั้งทดลอง โดยเฉพาะผลไม้ที่มีขนาดเล็กจะยุ่งยากมากในการทดลอง การวัดค่าต่างๆ เช่น การวัดค่าความสูงของผลไม้ มุมผลไม้ตกกระทบ ความสูงของผลไม้ที่กระดอนหลังจากกระแทก และมุมผลไม้ที่กระดอนหลังจากกระแทก จะเปลี่ยนไปตามค่าของมวลที่ไม่คงที่

5) แบบแขนมวลแกว่ง (Compound pendulum) วิธีนี้การเปลี่ยนแปลงผลไม้ทดลองจะมีผลกระทบต่อการติดตั้งตัว support ผลไม้และความแน่นอนของการทดลอง อุปกรณ์ทดสอบการกระแทกแบบนี้ อาจก่อให้เกิดรอยช้ำ 2 รอย กับผลไม้ทั้งผลที่ถูกกระแทกได้เพราะมีการสัมผัสกระแทก 2 จุดตรงข้ามกัน

6) แบบแทงมวลแกว่ง (Ballistic pendulum) วิธีนี้ให้มวลคงที่และนิยมนำไปทดลองเพราะได้ผลที่ค่อนข้างแน่นอน การติดตั้ง Laser Pointer เข้ากับ Pendulum จะทำให้อ่านการเปลี่ยนแปลงการกระแทกได้ละเอียดและที่ค่อนข้างน้อยเมื่อ Pendulum เคลื่อนที่เชิงมุมไป 1 องศา (บัณฑิต และสุกิตต์, 2547) อุปกรณ์ทดสอบการกระแทกแบบนี้ อาจก่อให้เกิดรอยช้ำ 2 รอย กับผลไม้ทั้งผลที่ถูกกระแทกได้เพราะมีการสัมผัสกระแทก 2 จุดตรงข้ามกัน

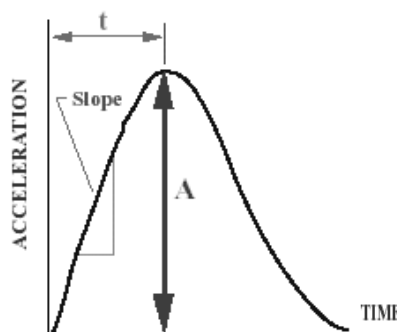
มีวิธีการที่ต่างออกไปคือกระแทกผลไม้ด้วยหัวกระแทกทรงกลมขนาดเล็กซึ่งทราบน้ำหนักที่แน่นอนและรัศมีความโค้งและความเร่งของหัวกระแทก ประโยชน์ของวิธีนี้คือการตอบสนองแรงกระแทกเป็นอิสระจากมวลของผลไม้และมีผลกระทบน้อยมากจากรัศมีความโค้งของผลไม้ Ruiz-Altisent et al. (1993) พัฒนาระบบซึ่งใช้ Impact parameter ในการคัดแยกผลไม้ (apples, pears and avocados) ที่ระดับความแน่นเนื้อต่าง ๆ ผลการศึกษา (Chen et al., 1996) เมื่อใช้น้ำหนักหัวกระแทกน้อยๆ (ประมาณ 10 กรัม) ชี้ว่า

1. สัญญาณที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อน้ำหนักน้อยลง (จากน้ำหนักหัวกระแทก 50 กรัมลดลงเหลือ 10 กรัม)
2. เพิ่มค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) เมื่อ A = ความเร่ง (m/s^2), t = เวลา (s)
3. ลดความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของผลไม้เนื่องจากน้ำหนักกระแทกที่น้อย
4. ลดความเสียหายเนื่องจากการกระแทก

และยังชี้อีกว่าน้ำหนักน้อยๆนั้นจะถูกจำกัดอยู่เนื่องจากน้ำหนักของหัววัด ความเร่งและความสามารถในการควบคุมความเร็ว ความเร็วมีผลอย่างมากต่อดัชนีความแน่นเนื้อ เมื่อน้ำหนักหัวกระแทกน้อย ๆ สายสัญญาณซึ่งต่อกับหัวกระแทกจะมีผลต่อการตกกระทบ ทำให้ตกกระทบไม่ตั้งฉากกับผิวของผลไม้และยังดึงหัวกระแทกให้ตกกระทบช้าลง

Chen *et al.* (1996) ได้แสดงการสร้างสูตรคณิตศาสตร์และสรุปว่าเวลาที่ต้องการได้แรงกระแทกสูงสุด $t = 1.47(D/V)$ และดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) มีค่า $A/t = 0.68 (FV/Dm_1)$ เมื่อ D = การเปลี่ยนรูปมากที่สุดของผลไม้เมื่อถูกกระแทก (mm), V = ความเร็วของหัวกระแทก (mm/s), m_1 = มวลของหัวกระแทก (g), A = ความเร่ง (m/s^2), และ F = แรงที่เกิดขึ้น (N)

Impact Acceleration History

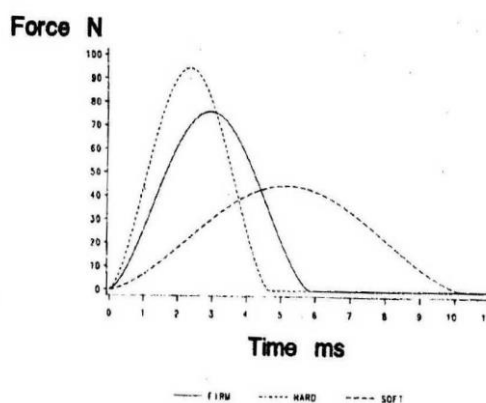


ภาพที่ 2 ลักษณะกราฟของการกระทำแบบกระแทก

ที่มา: Chen *et al.* (1996)

การวิเคราะห์ผลภาพที่ 2 แสดงลักษณะต่างๆไปของกราฟสัญญาณความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งกับเวลาระหว่างการกระทำกระแทกของหัวกระแทกกับผลไม้ เมื่อเกิดการกระแทก

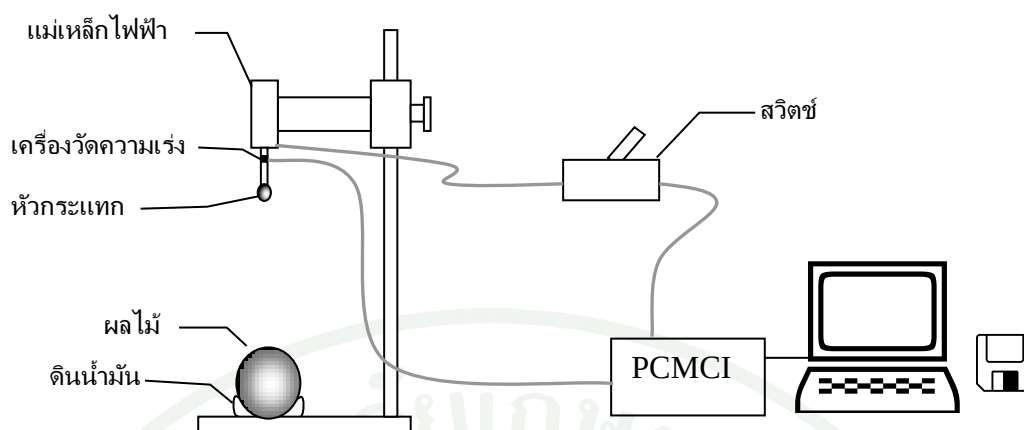
หัวกระแทกจะกดผลไม้เข้าไปในลักษณะความเร่งเพิ่มขึ้นกับเวลาการกระแทก ที่เวลา t หลังจากกระแทกความเร่งมีค่าสูงสุดและลดลงหลังจากนั้น



ภาพที่ 3 การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน

ที่มา: Delwiche (1987)

ภาพที่ 3 แสดงกราฟการกระจายแรงกระแทกกับเวลาของผลไม้ที่มีระดับความแน่นเนื้ออ่อน แน่นและแข็ง ลักษณะกราฟเหมือนภาพที่ 3 เนื่องจากแรงแปรผันตามความเร่งเมื่อน้ำหนักหัวกระแทกคงที่ กราฟทั้ง 3 มีความแตกต่างกันทั้งค่าแรงมากที่สุด ระยะเวลาที่สมนัยกับแรงมากที่สุด และความชันของกราฟความเร่ง (A) ลดลงและเวลา (t) เพิ่มขึ้นและความแน่นเนื้อลดลง จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) มาสัมพันธ์กับตัวแปรกำหนดความแน่นเนื้ออื่นๆ



ภาพที่ 4 แสดงระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทก

ที่มา: อุดมศักดิ์ (2551)

ภาพที่ 4 แสดงระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทกซึ่งประกอบไปด้วยดินน้ำมัน, เครื่องวัดความแรง (BBN CE501 M101), แม่เหล็กไฟฟ้า, หัวกระแทก (ประกอบด้วยลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและด้ามซึ่งเปลี่ยนน้ำหนักได้โดยมี 3 ระดับคือ 10, 30 และ 50 กรัม), Data Acquisition Unit (NI DAQ 700), คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมและสวิตช์ (อุดมศักดิ์, 2551)

วิธีการปล่อยตก (Dropping Test) สามารถทำได้โดยการปล่อยผลไม้ให้ตกกระแทกลงสู่พื้นเรียบแข็งอย่างอิสระในแนวดิ่ง (Mohsenin *et al.*, 1986)

ความเสียหายเชิงกล

Mohsenin (1986) กล่าวว่า การเสียหายทางกล คือความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปมากเกินไปจากแรงกระทำให้ผ่านช่องว่างที่ตรึงอยู่กับที่หรือแรงกระแทก การขนย้ายและขนส่งทำให้เกิดการระเหิดได้แก่ การกระแทก และการสั่นสะเทือนกระทำกับบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย

บัณฑิต (2545) กล่าวว่า การเสียหายของผัก ผลไม้ จากการขนส่งที่เรียกว่าการชำของลูกกลิ้ง (Rolling bruising) เป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผักผลไม้สดและแปรรูป สาเหตุของความเสียหายมาจากความล้มเนื่องจากแรงของการสั่นสะเทือนซ้ำแล้วซ้ำเล่าต่อผลไม้

ส่งผลให้เซลล์ภายในได้ผลไม่แตก ปัจจัยที่กำหนดความรุนแรงของความเสียหายมี 2 ประการคือ ความเข้มของการสั่นสะเทือน และระยะเวลาในการสั่นสะเทือน

ความเสียหายเชิงกลในฝักมะขาม ได้แก่ ฝักแตก ฝักร้าว ขั้วฝักแตก ถูกพบระหว่างการขนส่งจากสวนไปยังผู้บริโภค สำหรับพันธุ์สีชมพู และสีทองเป็น 20% และ 16.3% ตามลำดับ (บัณฑิต และ บุณย์วิษ, 2548) ผลมังคุดเปลือกแข็งเนื่องจากการกระทำเชิงกลระหว่างการขนส่งที่ตรวจสอบที่ระดับพ่อค้าปลีก ในกรุงเทพฯ และปริมณฑลสูงถึง 33.4% (พนิดา และ บัณฑิต, 2549)

สำหรับผลไม้ไทย ความเสียหายเชิงกลของผลลำไยสดที่ขนส่งจากสวนลำไยจากจังหวัดลำพูนมายังตลาดมหานาคในกรุงเทพฯ โดยรถบรรทุก ระยะทาง 700 Km. ปรากฏว่าผลแตกและร่วงเฉลี่ย 14.8% (บัณฑิต, 2529)

การนำเครื่องจักรหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่ เครื่องคัดแยก เครื่องบรรจุ มาใช้พร้อมกับบรรจุภัณฑ์ต่างๆ การขนย้ายในขบวนการผลิต การขนส่งและการกระจายผลไม้ออกไปสู่แหล่งบริโภค เกี่ยวข้องกับการกระทำเชิงกล และทำให้เกิดความชำรุดในเนื้อผลไม้สด ความสูญเสียของเชอร์รี่ มะเขือเทศ เน็คทาริน และผลแพร์พันธุ์บาร์ทเล่มีปริมาณ 15 - 68% ของปริมาณการสูญเสียการตลาดทั้งหมด (Ceponis and Butterfield, 1974, 1981; Ceponis and Chappellini, 1985)

ทรงธรรม และ บัณฑิต (2549) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยนำไปทดสอบ Uniaxial compression ปรากฏว่าอัตราส่วนของปัวซองของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่บริบูรณ์ดีมีค่า 0.24 การทดสอบ Flat Plate Compression และ Slow Impact Plunger compression ปรากฏว่าแรงกดเฉลี่ยด้วยหัวกด Flat Plate ที่ทำให้เกิดความเสียหายในผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่บริบูรณ์ดีคือ 1,695.4 N ความเสียหายของผลมะม่วงที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบุได้ชัดเจน ส่วนที่มีความแน่นเนื้อมากที่สุดคือบริเวณสันของผลมีค่าแรงกดเฉลี่ยด้วยหัวกด Plunger เท่ากับ 96.3 N อัตราส่วนแรงกดต่อการเปลี่ยนรูปเฉลี่ยเท่ากับ 23.0 N/mm และค่าดัชนีความแน่นเนื้อ เฉลี่ยเท่ากับ 0.67 m/s³

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวอย่างหนึ่งของมังคุดคือ การเกิดอาการเปลือกแข็ง เพื่อระบุความแข็งแรงของมังคุดปกติ และผลมังคุดเสียหาย โมดูลัสความยืดหยุ่นที่ปรากฏ (E_a) ดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) ได้ถูกใช้ทดสอบเพื่อระบุความเสียหาย มังคุดปกติมีค่า $E_a = 4.07$ MPa ส่วนมังคุดเปลือกแข็งจากแรงที่กระทำ 10, 20 และ 30 N มีค่า E_a เท่ากับ 6.70, 7.92 และ 12.31 MPa ตามลำดับ ค่า A/t

เฉลี่ยของผลเปลือกแข็ง พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับค่า A/t ของผลมั่งคุดที่ไม่ได้รับแรงกระทำ (พนิดา และ บัณฑิต, 2549)

มาตรฐาน ASAE แนะนำการวัดอัตราภาระ 2.5 - 30 มม./นาที (ASAE, 1998) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569 ถูกต่อเชื่อมเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถแปรรูปสัญญาณแรง (F) และการเปลี่ยนรูป (D) เป็นความเค้น ความเครียด สามารถโปรแกรมให้คำนวณหาพลังงานกระทำ (กค) พลังงานดูดกลืน ค่าโมดูลัสยัง การเปลี่ยนรูปถาวร เขียนกราฟ แรง (F) กับ การเปลี่ยนรูป (D) ความชัน ความแน่นเนื้อ แรงกดแตก (Rupture force) การเปลี่ยนรูปแตกหัก (Rupture deformation) แรงกดชีวกราก (Bio-yield force) การเปลี่ยนรูปชีวกราก (Bio-yield deformation) รูปแบบของตัวอย่างผักผลไม้ที่ถูกเอาไปทดสอบ ได้แก่ ทรงกระบอกที่ถูกเตรียมด้วย die จากเนื้อผลิตผลหรือรูปทรงเดิมตามธรรมชาติ หรือผ่าครึ่ง (Jarimopas, 2006)

Schoorl and Holt (1980) ได้จำแนกความล้มเหลวเชิงกลไว้ 3 ประเภทคือ การแตก (Cracking) การเลื่อน (Slip) และการช้ำ (Bruising) การแตกหรือการแยกของมันฝรั่งดูรายงานโดย Mohsenin (1970, 1977)

ความช้ำ (Bruising) หรือการเกิดรอยช้ำ เกิดจากการที่เนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยเซลล์ระเบิดแตกออกไป จนน้ำในเซลล์ไหลออกมา เกิดการออกซิไดเซชันกับอากาศ จะเห็นเป็นรอยสีน้ำตาล (Jarimopas, 1984) ความเสียหายของผลแอปเปิ้ลส่วนใหญ่จะปรากฏในรูปของการช้ำ (Bollen *et al.* 1999) การเสียหายจากการช้ำเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียคุณภาพในการจำหน่ายผลแอปเปิ้ลสด และการช้ำส่วนใหญ่เกิดเป็นผลจากการกระแทก

จุดเริ่มเกิดรอยช้ำ (Bruise threshold) คือความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ปล่อยตกลงสู่พื้นผิวแข็งจนตัวอย่างทดสอบนั้นเกิดความเสียหาย (Bajema *et al.*, 1998) หรือ พลังงานกระแทกที่มากเพียงพอที่ทำให้เกิดรอยช้ำปรากฏโดยมีความน่าจะเป็น (Probability) หรือความเป็นไปได้ของการเกิดรอยช้ำเท่ากับ 1 การหาค่าจุดเริ่มเกิดรอยช้ำแบบ Statistical Threshold ทำได้โดยการปล่อยตัวอย่างทดลองจำนวนเท่าๆกันที่หลายๆระดับความสูง เช่น ปล่อยผลแอปเปิ้ล 10 ผลต่อระดับความสูงที่ทำการทดสอบ ที่ 10 ระดับความสูง จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการช้ำที่ทุกระดับความสูง

งานวิจัยของ Turczyn *et al.* (1986) ทำการทดสอบหาความซ้ำของมันฝรั่งด้วยวิธีการปล่อยตกด้วยเครื่องปล่อยตก (Drop Tester) สอดคล้องกับ ASTM Standard 775 - 80 (ASTM, 1991) เป็นการทดสอบความต้านทานการตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ เพื่อวัดความสามารถในการป้องกันสินค้าในบรรจุภัณฑ์หรือความสามารถของภาชนะบรรจุสินค้าในการต้านทานแรงกระแทก อันเนื่องมาจากการตกกระแทกพื้นจากที่สูง การทดสอบทำโดยใช้เครื่องทดสอบการปล่อยตกปล่อยบรรจุภัณฑ์ซึ่งภายในบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวมีสินค้าอยู่ข้างในให้ตกกระแทกลงสู่พื้น ในขณะที่ปล่อยตกบรรจุภัณฑ์จะต้องไม่มีการหมุนตัว วิธีการทดสอบการตกกระแทกสามารถแยกเป็นการปล่อยให้ตก ณ ความสูงคงที่ ด้วยการกำหนดจำนวนครั้งของการปล่อยตก ณ ความสูงนั้น ๆ และการทดสอบด้วยการเพิ่มความสูงมากขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งบรรจุภัณฑ์นั้นไม่สามารถป้องกันสินค้าภายในได้ (ASTM, 199; Jarimopas *et al.*, 2004)

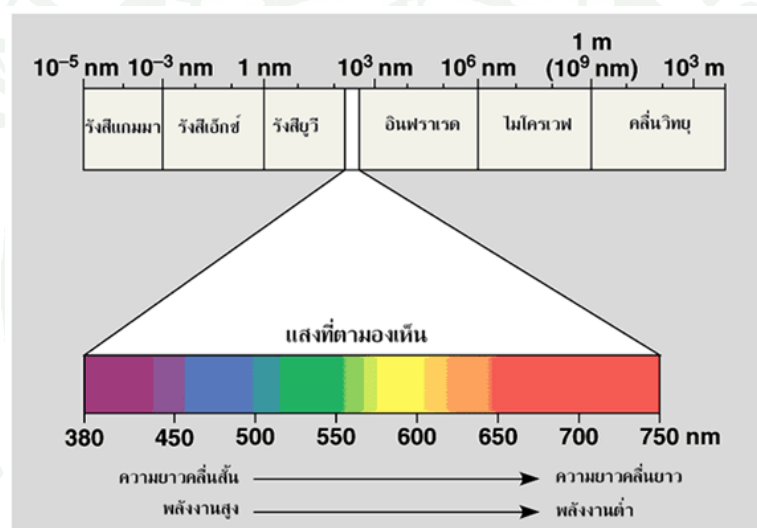
มีนักวิจัยหลายคน (Bajema *et al.*, 1998, Holt and Schoorl, 1977) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผลไม้เมื่อถูกกระแทก ปกติผลไม้จะถูกภาชนะกระแทกกระทำระหว่างการจัดการหลังเก็บเกี่ยว การขนส่งและการกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภค มีนักวิจัยรายงานว่าสิ่งแรกที่สำคัญที่สุด ในการทำให้เกิดรอยช้ำน้อยที่สุด คือการทำให้เกิดพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) กับผลไม้น้อยที่สุดในทุกขั้นตอนระหว่างปฏิบัติกับเครื่องจักร

สมบัติของแสง

แสง (Light) คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic wave) ชนิดหนึ่งที่กระจายอยู่ทุกอนุในธรรมชาติรอบตัวเรา มีความยาวคลื่นใช้หน่วยนับเป็นนาโนเมตร (Nanometer: nm) ในแต่ละช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยแสง และรังสีที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้มากมาย ได้แก่ รังสีแกมมา (Gamma Rays), รังสีเอกซ์ (X-Rays), แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet), แสงสีที่มองเห็นได้ (Visible Color), แสงอินฟราเรด (Infrared), คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) (บัณฑิต, 2546) คลื่นเหล่านี้ เรียกรวมว่า Electromagnetic Spectrum โดยแต่ละคลื่นมีความยาวคลื่นต่างกัน คลื่นวิทยุมีความยาวที่สุด ตั้งแต่ 1 มม. ถึงหลายกิโลเมตรและรังสีแกมมา มีความยาวน้อยที่สุด คือมีความยาวน้อยกว่า 0.1 นาโนเมตร ตาของมนุษย์สามารถรับรู้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วงแคบๆ คือ ช่วงระหว่าง 380 - 750 nm เรียกช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible spectrum / Visible Light) หรือ แสง (Light) นั่นเอง แสงที่มนุษย์มองเห็นนี้ เห็นเป็นแสงสีขาว (Light white) ซึ่งประกอบไปด้วยสี 7 สีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน คือ สีม่วง (Violet) 380 - 420 nm สีน้ำเงิน (Blue) 440 - 470 nm สีเขียว (Green) 490 - 560 nm สี

เหลือง (Yellow) 550 - 580 nm สีส้ม (Orange) 580 - 620 nm และ สีแดง (Red) 620 - 750 nm. ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 5 (<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter8/Part3.html>, 2554)

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่มองเห็นมีประโยชน์สำหรับการทำนายว่าสารประกอบที่มีสีจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงใด ยกตัวอย่างเช่น สารประกอบ iron (III) thiocyanate หรือ $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ เป็นสารละลายที่มีสีแดง อาจทำนายได้ว่า $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ ดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีน้ำเงิน-เขียว (470 - 500 nm) ดังนั้นในการวิเคราะห์ปริมาณ $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ โดยวิธีทางสเปกโทรสโกปี จึงต้องเลือกใช้ความยาวคลื่นในช่วง 470 - 500 nm



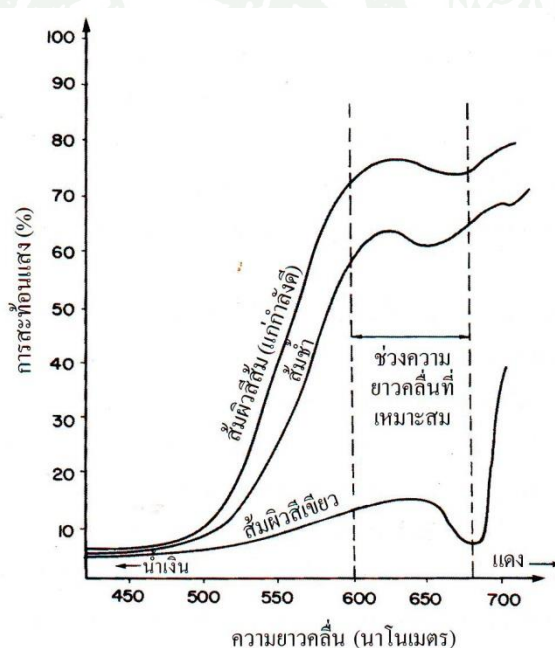
ภาพที่ 5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter8/Part3.html>, 2554

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่มองเห็น

ความยาวคลื่น (nm)	สีที่ถูกดูดกลืน	สีที่มองเห็น
380 – 420	ม่วง	เขียว – เหลือง
420 – 440	ม่วง - ฟ้า	เหลือง
440 – 470	น้ำเงิน	ส้ม
470 – 500	เขียว - น้ำเงิน	แดง
500 – 550	เขียว - เหลือง	ม่วง
550 – 580	เหลือง	ม่วง – น้ำเงิน
580 – 620	ส้ม	น้ำเงิน
620 – 750	แดง	เขียว – น้ำเงิน

ที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter8/Part3.html>, 2554



ภาพที่ 6 กราฟการตอบสนองเป็นสเปกตรัมแสงสว่างของส้ม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Peleg (1985)

การดูสีผิวผล ทุเรียนแก่จะเห็นสีนวลตัดกับสีน้ำตาลของปลายหนามอย่างเด่นชัด ค่าการสะท้อนแสงของผลไม้เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้คัดแยกความสุกแก่ได้จากภาพที่ 6 การสะท้อนแสงช่วงความยาวคลื่น 600 และ 670 nm สามารถใช้คัดแยกสัมพัทธ์ของอิสราเอลได้ โดยมีความแตกต่างของการสะท้อนแสงระหว่างส้มโตเต็มที่และส้มอ่อนประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนำมาพัฒนาเป็นเครื่องคัดแยกส้ม (ดัดแปลงมาจาก Peleg, 1985)

Jha et al. (2006, 2007) ใช้ Spectrophotometer แบบพกพาในการวัดสีผิวเฉลี่ยและสเปกตรัมการสะท้อนแสงของมะม่วงพันธุ์ Dashehari หาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (soluble solids content, SSC) ความแน่นเนื้อของมะม่วง และพัฒนาแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเพื่อทำนาย SSC ($R^2 = 0.83$) โดยใช้ค่าการสะท้อนแสงระหว่าง 440 และ 480 nm (ส่วนสีฟ้าของสเปกตรัมที่มองเห็นด้วยตาเปล่า, $R^2 = 0.8$) และ พัฒนาโมเดลทำนายค่าเฉลี่ยความแน่นเนื้อของการเก็บเกี่ยว ($R^2 = 0.8$) โดยใช้แสงสะท้อนสีเขียวส่วนหนึ่งของสเปกตรัมที่มองเห็นตาเปล่า (530 - 550 nm)

Wanichang et al. (2008, 2010) ดัชนีการแยกความสุกแก่ของผลแก้วมังกร พบว่าค่าการสะท้อนแสงของผลแก้วมังกรทั้ง 2 พันธุ์ มีค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 และ 650 nm และค่าการสะท้อนแสงสามารถพัฒนาไปใช้ทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลแก้วมังกรทั้งพันธุ์ได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

สีของผลไม้ระบุได้ด้วยค่า Reflectance โดย Peleg (1985) รายงานว่าสีส้มขามูติที่โตเต็มที่และคุณภาพดี เทียบกับส้มเขียวจะมีค่า Reflectance ที่ประมาณ 80 และ 12% ตามลำดับในช่วง Visible Spectrum ระหว่าง 600-660 nm Pushpariksha and Jarimopas (2007) พบว่าสีของผลมังคุดได้แสดงถึงความผิดปกติทั้งภายนอกและภายในผล ดังนั้นการใช้ Light Reflectance เป็นการบอกให้รู้ว่าสภาพของผลมังคุดผิดปกติหรือไม่ปกติ และในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน Wanichang and Jarimopas (2007) ได้ทำการวิจัยพบว่าผลของแก้วมังกร 2 พันธุ์ คือ เนื้อสีขาวและสีแดงที่ผลสีที่สมบูรณ์เต็มที่และมีคุณภาพดีจะมีค่า Reflectance ในช่วง Visible Spectrum ระหว่าง 550 - 680 nm

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการ Calibration เพื่อใช้เป็นโมเดลในการวัดค่าคุณลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ตามที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการ Calibration ที่สร้างขึ้นด้วยการทำ Validation เพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสมและสามารถทำนายค่าได้แม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำสมการ Calibration ที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการต่อไป

1. การสร้างสมการ Calibration

การหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพมีวิธีการหา 2 วิธีหลักคือ

ก. Wavelength selection

เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเฉพาะความยาวคลื่น ที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่จะทำการวิเคราะห์เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายแบบเช่น

- 1) เลือกจากความชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิง ที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์
- 2) ใช้สถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กันเช่น Multiple regression หรือการสร้าง correlativegram

การสร้าง correlativegram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือความยาวคลื่น กับ แกน Y คือค่า correlation อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง optical data ณ ความยาวคลื่นนั้น กับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธี reference measurement ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะสัมพันธ์ กับค่าที่วิเคราะห์

วิธีการสร้างสมการ Calibration แบบ Wavelength selection อาศัยหลัก และวิธีการทางสถิติมาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple linear regression, Multiple linear regression เป็นต้น

แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมด ไม่ใช่เรื่องง่าย และอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ค่าข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหา ทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำกว่า หรือสูงกว่าค่าที่แท้จริงอันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการสร้างสมการ หรือเกิดปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการน้อย และทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือ

ข. Full spectrum analysis

การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่น เป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหายู้ง้างคือ การที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปการใช้วิธีทางสถิติ ในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปร ที่มีความเกี่ยวข้องกัน และทำการสร้างตัวแปรใหม่ ที่อาจเกิดขึ้นมาจากตัวแปรเดิม จะช่วยให้ปัญหาต่างๆ ได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ คือ Principle Components Regression (PCR), Partial Least Square Regression (PLSR) เป็นต้น

2. การทำ Validation

หลังจากที่ได้สร้างสมการแล้ว ต้องมีการทดสอบความประสิทธิของสมการนั้นก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบสมการที่นิยม มีดังนี้ คือ

ก. Leave-one-out Classification

เป็นวิธีวิเคราะห์เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจัดกลุ่ม มีวิธีการ คือ จากตัวอย่าง 1 ชุดขนาด n ตัวอย่าง ให้ใช้ข้อมูล $n - 1$ ตัวอย่าง ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่ม ส่วนตัวอย่างที่เหลือ 1 ตัวอย่างไว้ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดกลุ่ม มีขั้นตอนดังนี้

1) การคำนวณครั้งที่ 1 จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 2 - n ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่ม และใช้ตัวอย่างที่ 1 ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่ม

2) การคำนวณครั้งที่ 2 จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 1 และ 3 - n ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่ม และใช้ตัวอย่างที่ 2 ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่ม

3) การคำนวณครั้งที่ n จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 1 และ n - 1 ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่มและใช้ตัวอย่างที่ n ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่มจึงต้องมีการคำนวณทั้งหมด n ครั้ง แล้วจึงจะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจัดกลุ่มในการพิจารณาว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการแบ่งกลุ่มมากหรือน้อยอย่างไร เราจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ในสมการที่อยู่ในรูปที่ปรับแล้ว (Standardized canonical discriminant function coefficient)

ข. Full cross validation

เป็นการทดสอบสมการภายใน ความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ ก็คือตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างสมการประเมินค่าทางเคมีนั่นเอง มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
- 2) ใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างสมการ
- 3) นำสมการที่ได้มาประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 เราตัดออกมา
- 4) ใส่ตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 กลับคืนเข้าไป
- 5) ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
- 6) ทำขั้นตอนซ้ำข้างต้น จนครบทุกตัวอย่าง

ดังนั้นตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออกจากชุดตัวอย่างละหนึ่งครั้งเท่ากันทำการหาค่า Root Mean Square Error of Cross Validation (RMSECV)

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_{cv,i} - Y_i}{n-1}} \quad (1)$$

เมื่อ $Y_{cv,i}$ = ค่าอ้างอิงชุดตรวจสอบแต่ละชุดตัวอย่าง Y_i = ค่าอ้างอิงชุดตัวอย่างแต่ละตัว, n = จำนวนตัวอย่าง

ค. การทดสอบผลการประเมิน (Prediction testing)

วิธีนี้จะทดสอบสมการแบบภายนอก โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสถานะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการนี้ว่า ชุดทดสอบ (Testing set) สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมี ที่เราจะใช้ทดสอบ ต้องอยู่ในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบ ก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา ปริมาณจากสมการค่าทางเคมี จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณา คือ ค่า Bias คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าที่ได้จากวิธี Reference และค่า Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP)

$$Bias(\bar{a}) = \frac{\sum(\bar{Y} - Y)}{n} \quad (2)$$

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(\bar{Y} - Y)^2}{n}} \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{Y}$ = ค่าอ้างอิง และ Y = ค่าที่ได้จากการทำนาย สามารถเป็นบวกหรือลบก็ได้

Discriminant analysis (DA)

Discriminant analysis (DA) หรือการวิเคราะห์จำแนกประเภท มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกประชากรออกเป็นกลุ่มๆ โดยทดสอบว่า ตัวแปรอิสระต่างๆ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามจนถึงขั้นที่จะสามารถจำแนกประชากรออกเป็นกลุ่มๆ ได้หรือไม่ ซึ่งถ้าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรจำแนก (Discriminator variable) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือตัวแปรจำแนกกลุ่ม (Classification variable หรือ Grouping variable) แล้วประชากรแต่ละกลุ่มจะมีคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับการเป็นสมาชิกของกลุ่ม (เพ็ญแข, 2544) ในการวิเคราะห์จำแนกประเภทนอกจากจะทำให้ได้สมการจำแนกประเภทที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระที่สามารถนำมาแบ่งกลุ่มของตัวแปรตามได้แล้วยังทำให้เราทราบว่า ตัวแปรอิสระตัวใดที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมากที่สุด อีกทั้งจะทำให้เราประเมินได้ว่า สมการจำแนกประเภทที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถจำแนกกลุ่มได้ถูกต้องร้อยละเท่าใด ผลจากการวิเคราะห์จำแนกประเภทจะให้สมการที่นำมาใช้ในการทำนายการเป็นสมาชิกของกลุ่ม สมการที่ได้นี้เราเรียกว่า สมการจำแนกประเภท (Discriminant

function) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่ได้ในสมการจำแนกประเภทนี้จะทำให้เราทราบถึงน้ำหนักความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่างๆ กับการเป็นสมาชิกของกลุ่ม การวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับการจำแนกเป็นวิธีทางสถิติในการนำตัวแปรหลายๆ ตัวมาพิจารณาแล้วจัดสร้างเป็นสมการของกลุ่มตัวแทนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้สำหรับการพิจารณา จากนั้นนำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนายเพื่อการจำแนก เรียกว่า Fisher's Discriminant Analysis หรือ Linear Discriminant Analysis โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ก. เพื่อคัดแยกกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่มหรือมากกว่า
- ข. เพื่อกำหนดเป็นกลุ่มโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายๆ ตัวแปร
- ค. เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการคัดแยก

การวิเคราะห์สำหรับการคัดแยกจะกระทำได้อีกหลังจากได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในกลุ่มเสียก่อนดังนี้

- ง. หาคุณสมบัติหลักเพื่อสร้างเป็นสมการที่เป็นตัวแทนของกลุ่ม
- จ. ใช้สมการที่เป็นตัวแทนของกลุ่มดังกล่าวในการจำแนกหรือคัดแยก

ขั้นตอนของการจำแนกกลุ่มจะต้องทราบจำนวนกลุ่มหลังจากนั้นให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะมีผลหรือมีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่ม
- 2) เลือกตัวอย่างแต่ละกลุ่มเพื่อใช้เป็นตัวแทนของกลุ่ม
- 3) เก็บรวบรวมข้อมูลของตัวแปรอิสระที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 1
- 4) สร้างเกณฑ์หรือสร้างสมการจำแนกกลุ่มโดยใช้ข้อมูลที่เก็บจากขั้นที่ 2 และ 3 สำหรับสมการที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มจะอยู่ในรูปเชิงเส้น ดังนี้

$$D = w_{1z_1} + w_{2z_2} + w_{3z_3} + \dots + w_{iz_i} \quad (4)$$

เมื่อ D = ตัวแปรตามหรือเรียกว่า Discriminant score
 w_i = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการจำแนกกลุ่ม
 z_i = ตัวแปรอิสระหรือเรียกว่า ตัวแปรจำแนกกลุ่ม

5) นำเกณฑ์หรือฟังก์ชันจำแนกกลุ่มที่ได้ในขั้นตอนที่ 4 มาทำนายกลุ่มของตัวอย่างที่เข้ามาใหม่

Partial Least Squares Discriminant analysis (PLS - DA)

Partial Least Squares Discriminant analysis (PLS - DA) เป็นวิธีการจำแนกกลุ่มของข้อมูลตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป วิธีการนี้จำเป็นต้องกำหนดค่าอ้างอิงให้กับแต่ละกลุ่มข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งค่าที่อ้างอิงนี้จะกำหนดค่าในกลุ่มแรกให้มีค่าเท่ากับศูนย์และกลุ่มที่สองมีค่าเท่ากับหนึ่ง จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นด้วยวิธี PLSR วิธี PLS - DA เป็นวิธีวิเคราะห์โดยจะสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า Principal component (PC) ซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้นของตัวแปรต้นทุกตัวโดย PC1 จะเป็นค่าที่อธิบายความแปรปรวนร่วมที่มากที่สุดของตัวแปรต้นของตัวอย่างกับค่าที่ใช้ทำนายแยกกลุ่มระหว่างสองกลุ่มข้อมูล ค่า PC ซึ่งเรียกว่า Score เมื่อพล็อตร่วมกันระหว่างสอง PC จะสามารถนำมาตรวจสอบการแบ่งกลุ่มของตัวอย่างได้ว่าถูกแยกด้วย PC ไດ และตัวแปรต้นตัวใดที่มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดการแยกระหว่างกลุ่ม โดยตรวจสอบดูค่า loading ซึ่งค่า loading ที่มีค่าสูงของ PC ที่ทำให้เกิดการแบ่งกลุ่มจะแสดงว่าตัวแปรต้นตัวดังกล่าวมีผลที่ทำให้เกิดการแบ่งกลุ่ม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เขียวเขียว
2. บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการขนส่งลำไย มี 3 ลักษณะดังนี้
 - 2.1 ตะกร้าพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal) แสดงดังภาพที่ 7 (ก)
 - 2.2 ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) แสดงดังภาพที่ 7 (ข)
 - 2.3 ปริมาตรกระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up truck bed) แสดงดังภาพที่ 7 (ค)



ก) ทรงสี่เหลี่ยมปิรามิด (Trapezoidal)



ข) ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle)



ค) ทรงรถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up truck bed)

ภาพที่ 7 บรรจุภัณฑ์แบบต่างๆของผลลำไยสด

4. เครื่อง Texture Analyzer (model TA-HD plus, Stable Micro System, UK.)
5. เครื่องวัด Spectrophotometer (MiniScan XE Plus 45/0 LAV, Hunter Associates Laboratory. Inc., Reston, U.S.A)
6. เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น CD-8"CS ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร
7. เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น ARC 120 วัดน้ำหนักสูงสุดได้ 3,100 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม แบบ 2 ตำแหน่ง
8. เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ UWE รุ่น AFN TC 6101 วัดน้ำหนักสูงสุดได้ 60 กิโลกรัม ความละเอียด 0.01 กรัม แบบ 2 ตำแหน่ง
9. ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร และขวดพร้อมที่จับ 1 ชุด
10. กล่องพลาสติกใสทรงสี่เหลี่ยม มีขนาด 20x20x20 เซนติเมตร
11. กล่องพลาสติกใสทรงสี่เหลี่ยม มีขนาด 35x25x20 เซนติเมตร
12. ภาชนะทรงกระบอก มีขนาดปริมาตร 392.72 ลูกบาศก์เซนติเมตร
13. ภาชนะทรงกระบอก มีขนาดปริมาตร 176.72 ลูกบาศก์เซนติเมตร
14. อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตใช้พื้นผิวสัมผัสในการทดลองเป็นแผ่นวัสดุ 4 ชนิดคือ 1) แผ่นไม้อัด 2) แผ่นเหล็ก 3) แผ่นสแตนเลส และ 4) พลาสติกสีขาว
15. หัวกดทรงกลม (Plunger Probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร
16. แท่งทรงกระบอกที่ปลายเรียวติดหัวกระแทกทรงกลม (Plunger Probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรน้ำหนัก 50 กรัม

วิธีการ

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติกายภาพบางประการของลำไย, ศึกษาปริมาตร, น้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ และ ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

ศึกษาสมบัติกายภาพบางประการของลำไย

สมบัติกายภาพของลำไยที่ศึกษา ได้แก่ มิติ ความกลม ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นการบรรจุ มุมกองพื้น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความพรุนและค่าความแน่นเนื้อของผลลำไยสด

1. ศึกษามิติ (Dimension) ของลำไย

ลำไยสามารถกำหนดขนาดจากเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุด (a) เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a (b) และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a และ b (c) นำมาคำนวณจากสมการที่ 1 (ปานมนัส และคณะ, 2538) โดยในการหาค่ามิติใช้ลำไยจำนวน 100 ผลของแต่ละพันธุ์ และในการหาขนาดของผลลำไยเลือกจากขนาดของ เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุด (a) จำนวน 100 ผล ของแต่ละพันธุ์ แล้วบันทึกผล

$$\text{Geometer Mean Diameter, GMD, (mm)}^3 = (a \times b \times c)^{1/3} \quad (1)$$

เมื่อ a = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุด (mm)

b = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a (mm)

c = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a และ b (mm)

2. ศึกษาความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของลำไย

ความเป็นทรงกลมของลำไยเป็นการบ่งบอกความเป็นทรงกลมของลำไย ทำได้โดยนำค่าที่ทำกรวัดขนาดตามข้อ 1 จำนวน 100 ผล ของแต่ละพันธุ์ มาคำนวณได้จากสมการที่ 2 (Mohsenin, 1996) แล้วบันทึกผล

$$Sp = ((a \times b \times c)^{1/3})/a \quad (2)$$

(a, b และ c ไม่จำเป็นต้องตัดกันที่จุดเดียวกัน)

3. ศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ของลำไย

ค่าความถ่วงจำเพาะหาได้จากค่าความหนาแน่นเนื้อของผลลำไยต่อความหนาแน่นของน้ำ โดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีสคือแรงลอยตัว (Buoyant Force, F_B) ทำการทดลองจำนวน 30 ผล แล้วบันทึกผลและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 (ปานมนัส และคณะ, 2538)

$$SG = \rho_i / \rho_w \quad (3)$$

เมื่อ ρ_i = ความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย = m/v (g/cm^3)
 m = มวลของลำไย (g)
 v = ปริมาตรของผลลำไย (cm^3)
 ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำกลั่น ~ 1 (g/cm^3)

มวลของผลลำไยวัดโดยชั่งบนเครื่องชั่งดิจิตอลมีหน่วยเป็นกรัม (g) และปริมาตรของผลลำไยวัดโดยเทน้ำก้นลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ประมาณครึ่งหนึ่ง และบันทึกปริมาตรน้ำ จากนั้นจุ่มผลลำไยลงในกระบอกตวงให้ผลจมอยู่ใต้น้ำพอดี โดยใช้ไม้ปลายแหลมเสียบยึดผลลำไยไว้ บันทึกปริมาตรน้ำบนกระบอกตวงอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณจากสมการแรงพยุง (F_b) = $\rho_w \cdot g \cdot v$ โดย ρ_w คือ ความหนาแน่นน้ำกลั่น, g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และ v คือปริมาตรส่วนที่จมน้ำ

4. ศึกษาความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) ของลำไย

ความหนาแน่นของภาชนะบรรจุลำไย ที่ใช้ในการขนส่งผลลำไยนั้นก็คือปริมาตรของลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมดต่อปริมาตรของภาชนะ โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ของบรรจุภัณฑ์หรือตะกร้าแบบทรงก้นเล็ก และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วบันทึกผล จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณได้จากสมการที่ 4 (บัณฑิต, 2529)

$$PD = V_i / V_c \quad (4)$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมด = $n (\pi \bar{d}^3 / 6) (\text{mm}^3)$
 n = จำนวนผลลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมด
 $\bar{d}$ = ค่าเฉลี่ย d ของผลลำไย (mm)
 V_c = ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุลำไย (mm^3)

5. ศึกษามุมกองพื้น (Angle of Repose, AR)

มุมกองพื้นของวัสดุ หมายถึงมุมที่กองวัสดุทำกับพื้นราบสามารถหาได้ 2 แบบคือแบบบรรจุ (Filling) และแบบถ่ายเท (Emptying)

5.1 แบบบรรจุ (Filling)

เป็นแบบที่ทำโดยนำเอาผลลำไยที่จะทำการทดลองบรรจุลงในภาชนะทรงกระบอกขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จนเต็มจากนั้นเอาวัสดุพื้นเรียบลักษณะเป็นแผ่นวงกลมมาวางบนปากภาชนะทรงกระบอกและคว่ำภาชนะทรงกระบอกลงและค่อยๆดึงภาชนะทรงกระบอกขึ้นอย่างช้าๆจนลำไยถ่ายเทออกมากองบนแผ่นกลม จากนั้นทำการวัดความสูงของกองลำไยและนำมาคำนวณหาค่ามุมกองพื้น (Amin et al., 2003) โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 8 แล้วบันทึกผล และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 (ปานมนัสและคณะ, 2538)

$$\theta = \tan^{-1} (h/r) \quad (5)$$

เมื่อ h = ความสูงของกองลำไย (mm)
 r = รัศมีของกองลำไย (mm)



ภาพที่ 8 การทดลองมูมกองพื้นของวัสดุแบบบรรจุ (Filling)

5.2 แบบถ่ายเท (Emptying)

แบบถ่ายเทเป็นแบบที่ทำโดยนำผลลำไยที่จะทำการทดสอบบรรจุลงในกล่องสี่เหลี่ยม มีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ด้านข้างของกล่องสามารถเปิดได้ เมื่อใส่ผลลำไยจนเต็ม จากนั้นทำการดึงแผ่นด้านข้างออกลำไยจะถ่ายเทออกจากกล่องบางส่วนและจะค้างอยู่ในกล่องบางส่วน จากนั้นทำการวัดความสูงของกองลำไยที่อยู่ในกล่อง และความกว้างของกองลำไยในกล่องแสดงดังภาพที่ 9 โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้ง แล้วบันทึกผล และนำมาคำนวณตามสมการที่ 6 (Ato Bart-Plange et al., 2002)

$$\theta = \tan^{-1}(h/l) \quad (6)$$

เมื่อ h = ความสูงของกองลำไยที่อยู่ในกล่อง (mm)
 l = ความกว้างของกองลำไยที่อยู่ในกล่อง (mm)



ภาพที่ 9 การทดลองมุมกองพื้นของวัสดุแบบแบบถ่ายเท (Emptying)

6. ศึกษาความสัมพันธ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของวัสดุมีส่วนสำคัญและเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกล เกษตร และอาหาร โดยความเสียดทานที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุที่เคลื่อนที่ หรืออยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อภาชนะที่บรรจุวัสดุนั้นๆ ในไซโลหรือโรงเก็บเมล็ดพืช แรงที่กระทำตั้งฉากกับผิวนั้น สามารถคำนวณหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากสมการที่ 7 (Mohsenin, 1996)

$$\mu = \tan \theta \quad (7)$$

เมื่อ θ = มุมที่อ่านได้จากอุปกรณ์หาค่าความเสียดทานสถิต (องศา)

ในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ใช้แผ่นพื้นผิวสัมผัสวัสดุ 4 ชนิดคือ 1) แผ่นไม้อัด 2) แผ่นเหล็ก 3) แผ่นสแตนเลส และ 4) พลาสติกสีขาว โดยนำกล่องไม้ฉลุ ขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาวกว้าง กว้าง 10 เซนติเมตรและสูง กว้าง กว้าง 10 เซนติเมตร เปิดด้านบน และด้านล่าง นำมาวางบนแผ่นพื้นผิวชนิดต่างๆ แล้วใช้แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมารองกล่องไม้เพื่อไม่ให้กล่องสัมผัสกับพื้นผิวแล้วนำผลล่ำโยใส่จนเต็มแล้วนำแท่งเหล็กวางบนผลล่ำโยสักครู่เพื่อให้ผลล่ำโยแน่นกับกล่องไม้เพื่อไม่ให้กล่องลุดมาสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่น แล้วยกแท่งเหล็กออก จากนั้นเอาแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดที่รองกล่องออก และทำการยกแผ่นขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆแล้วอ่านค่าองศา ในขณะที่กล่องเริ่มเลื่อน โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งของแต่ละแผ่นพื้นผิวของแต่ละพันธุ์ แสดงดัง

ภาพที่ 10 แล้วจดบันทึกผล นำค่าทั้งที่ได้ไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนของแต่ละชนิดแผ่นพื้นผิวสัมผัส



ภาพที่ 10 การทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตบนแผ่นพื้นผิวสแตนเลส

7. ศึกษาความพรุน (Porosity, η)

ความพรุนของผลลำไยเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณช่องว่างที่มีอยู่ในกองผลลำไย โดยทำการทดลองจำนวน 30 ผล ของแต่ละพันธุ์แล้วบันทึกผล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 (Mohsenin, 1996)

$$\eta = (1 - (\rho_B / \rho_i)) \quad (8)$$

เมื่อ

η = ความพรุน (%)

ρ_i = ความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย (g/cm^3)

ρ_B = ความหนาแน่นรวมของลำไย = m/v (g/cm^3)

m = มวลของลำไย (g)

v = ปริมาตรของภาชนะบรรจุผลลำไย (cm^3)

ทั้งนี้ความหนาแน่นรวมของลำไย (ρ_B) หาโดยนำค่ามวลของผลลำไย (m) ต่อปริมาตรของภาชนะบรรจุของผลลำไย (v) ส่วนความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย (ρ_i) ดูในสมการที่ 3

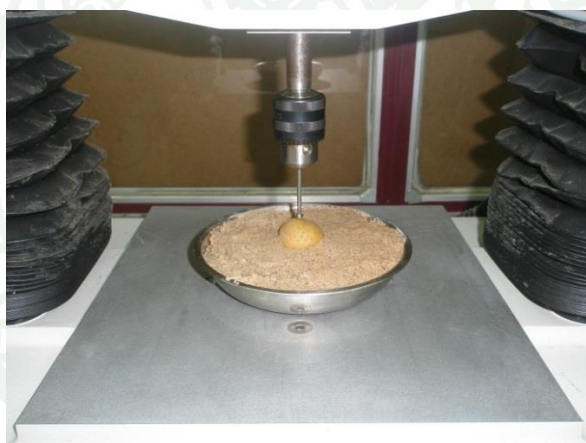
8. ศึกษาความแน่นเนื้อ (Firmness)

ในการทดลองหาความแน่นเนื้อของผลลำไยจะใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยใช้แรงกดอย่างช้าๆ ค่าความแน่นเนื้อของผลลำไยมีค่าเท่ากับแรงกดสูงสุดก่อนผลลำไยแตกต่อระยะจากจุดที่หัวกดเริ่มสัมผัสถึงจุดที่ผลลำไยเริ่มแตก แสดงดังภาพที่ 11 โดยทำการทดลองจำนวน 30 ผลของแต่ละพันธุ์แล้วบันทึกผล สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 9

$$\text{Firmness} = F/D \quad (9)$$

เมื่อ F = แรงกดสูงสุดก่อนผลลำไยแตก (N)

D = ระยะจากจุดที่หัวกดเริ่มสัมผัสถึงจุดที่ผลลำไยเริ่มแตก (mm)



ภาพที่ 11 การทดลองหาความแน่นเนื้อของผลลำไย

ศึกษาปริมาตรและน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุลำไยจากสวนของเกษตรกรมายังตลาดขายส่งนี้ ได้ทำการศึกษาปริมาตรและน้ำหนักของตะกร้าที่ใช้กับผลลำไยมี 3 แบบแสดงดังรูปที่ 12 ดังนี้คือ

- 1.1 ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็กหรือทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal)
- 1.2 ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) และ

1.3 กระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up truck bed)



ก

ข

ค

ภาพที่ 12 รูปบรรจุภัณฑ์ (ก) ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็ก (ข) ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ (ค) กระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน

ซึ่งทั้ง 3 แบบสามารถคำนวณหาค่าปริมาตรจากสมการดังนี้ (ปานมนัส และคณะ, 2538)

แบบที่ 1. ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็ก $V = 1/2 \times h (A + A1)$ (10)

แบบที่ 2. ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า $V = L \times W \times H$ (11)

แบบที่ 3. กระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน $V = L \times W \times H$ (12)

เมื่อ V = ปริมาตรของตะกร้า (m^3)

h = ความสูงระหว่างพื้นที่ A กับ $A1$ (m)

A = พื้นที่ปากตะกร้า (m^2)

$A1$ = พื้นที่ก้นตะกร้า (m^2)

L = ความยาวของตะกร้า (m)

W = ความกว้างของตะกร้า (m)

H = ความลึกของตะกร้า (m)

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

ในการศึกษาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกลนั้นใช้ลำไยสามสายพันธุ์คือพันธุ์อีดอ พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เบี้ยวเขียวในการทดลองโดยการสุ่มซื้อผลลำไยสดจากบรรจุก้นชั้นส่ง จากตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศได้แก่ตลาดไท และตลาดสี่มุมเมืองโดยเลือกภาชนะชั้นบนสุด กลาง และล่างที่อยู่ท้ายรถบรรทุกสิบล้อของแต่ละตลาดๆจำนวน 3 ตะกร้า นำมาหาค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกล ในการเลือกสุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แล้วบันทึกผล

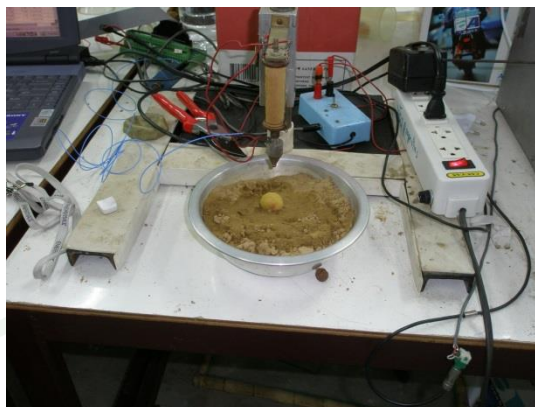
ตอนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ซ้ากับพลังงานภายใต้แรงกดอย่างช้าๆและแรงกระแทก และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความซ้าของลำไยสดกับพลังงานที่ทำให้ซ้าภายใต้แรงกดอย่างช้าๆและแรงกระแทก

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ซ้าและความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความซ้าของลำไยสดกับพลังงานภายใต้แรงกดอย่างช้าๆ (Slow compression) นั้น ในการทดลองใช้กับเครื่อง Texture Analyzer (model TA-HD plus, Stable Micro System, UK.) แสดงดังภาพที่ 13 และใช้หัวกดแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรที่อัตราความเร็ว 25 มิลลิเมตรต่อนาที [ASAE, 1998] โดยสุ่มทำการทดลองจำนวน 50 ผลเพื่อหาจุดที่ใช้พลังงานกดแตก 100% (Ruptured Energy, E) เมื่อพบว่าใช้พลังงานกดแตก 100% เท่าไรแล้ว เอาพลังงานกดแตก 100% นี้ เป็นจุดเริ่มทำการทดลองก่อน หลังจากนั้นก็จะลดพลังงานที่ใช้ทีละ 5% ดังนี้ ใช้ผลลำไยในการทดลอง 100 ผลต่อชุดทดลอง มีทั้งหมด 7 ชุด ของแต่ละพันธุ์ ทำการทดลองดังนี้ 95, 90, 85, 80, 75, 70, และ 65 % ของจุดแตก หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในอุณหภูมิห้อง เพื่อสังเกตผลการทดลองที่เกิดขึ้น และบันทึกข้อมูล ทั้งนี้พลังงานกดแตกคิดจากพื้นที่ใต้กราฟแรงกับระยะทางตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดแตก



ภาพที่ 13 การกดผลลำไยสดของเครื่อง Texture Analyzer

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ชำ และความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความชำของลำไยสดกับพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Impact) นั้น ในการทดลองใช้กับเครื่องกระแทกแบบใช้สนามแม่เหล็กที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (DC. 12Volt) แสดงดังภาพที่ 14 และใช้หัวกดแบบกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ติดแท่งเหล็กทรงกระบอกเรียวยาวขนาดน้ำหนัก 50 กรัม โดยสุ่มทำการทดลองจำนวน 50 ผลเพื่อหาจุดที่ใช้พลังงานกดแตก 100% (Ruptured Energy, F) เมื่อพบว่าใช้พลังงานกดแตก 100% เท่าไรแล้ว เอาพลังงานกดแตก 100% นี้ เป็นจุดเริ่มทำการทดลองก่อน หลังจากนั้นก็จะลดพลังงานที่ใช้ทีละ 5% ดังนี้ ใช้ผลลำไยในการทดลอง 100 ผลต่อชุดทดลอง มีทั้งหมด 6 ชุด ของแต่ละพันธุ์ ทำการทดลองดังนี้ 95, 90, 85, 80, 75 และ 70 % ของจุดแตก หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในอุณหภูมิห้อง การหาคำนวนหาพื้นที่ชำนั้นหาได้จากสูตร 13 ส่วนค่าพลังงานที่กระแทกนั้นสามารถคำนวณหาได้จากสูตรที่ 14



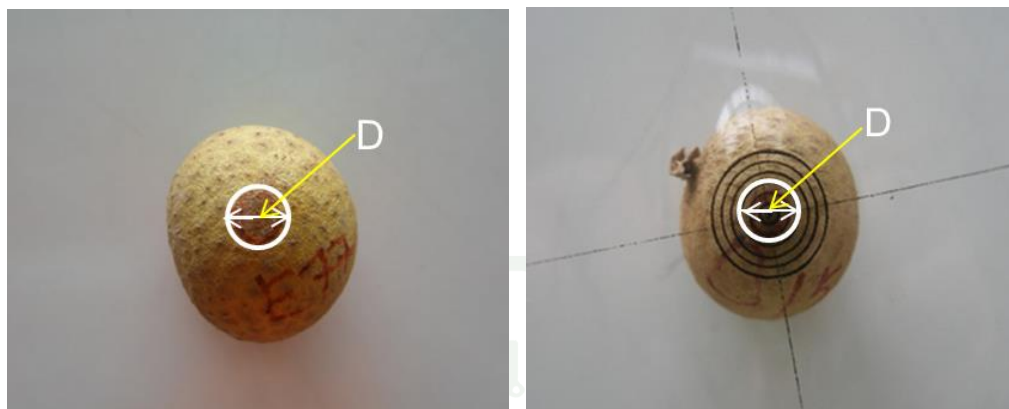
ภาพที่ 14 การทดลองการกระแทกผลล้าไยสดของเครื่องแบบใช้สนามแม่เหล็กที่ใช้ไฟฟ้า
กระแสสลับ

การคำนวณหาพื้นที่ช้ำ (Bruise Area, BA) นั้นหาได้จากสมการที่ 13

$$BA = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (13)$$

เมื่อ D = เส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ช้ำ (mm)

ซึ่งค่า D วัดโดยวิธีนำแผ่นใสมาทำสเกลเป็นวงกลม เนื่องจากการทดลองใช้หัวกดทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ดังนั้นพื้นที่ช้ำจะมีลักษณะเป็นวงกลมดังภาพที่ 15 โดยสเกลมีช่องห่างสเกลช่องละ 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปเทียบกับพื้นที่ช้ำที่ผลล้าไย เพื่อหาเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ช้ำ แล้วนำค่าไปคำนวณในสมการที่ 13



ภาพที่ 15 การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ชำ (D, mm)

การคำนวณค่าพลังงานกับการชำภายใต้แรงกระแทก (Impact) นั้น ค่าพลังงานที่กระแทกนั้นสามารถคำนวณได้จากสูตรที่ 14

$$E = mgh \quad (14)$$

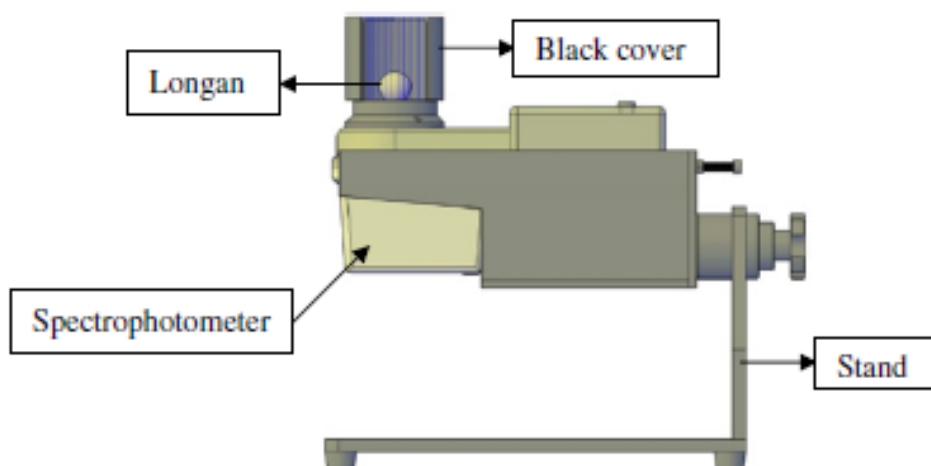
เมื่อ E = พลังงานกระแทก (J)
 m = น้ำหนักของหัวกระแทก (kg)
 g = แรงดึงดูดของโลก (m/s^2)
 h = ระยะความสูงที่ปล่อย (m)

ตอนที่ 3 ศึกษาการชำของลำไยโดยใช้วิธี Visible Spectroscopy

ในศึกษาการชำของลำไยโดยใช้วิธี Visible Spectroscopy ใช้เครื่อง Spectrophotometer จากภาพที่ 16 เครื่องจะวางบนขาตั้งช่องแสงอยู่ด้านบน ผลลำไยจะวางตรงช่องแสง (ลำไยชำจะต้องวางให้บริเวณชำตรงช่องแสง) และมีฝาครอบเพื่อป้องกันแสงเข้ามารบกวนในการสแกนผลลำไย โดยใช้ช่วงแสงสะท้อนระหว่าง 400 – 700 นาโนเมตร ที่มีความละเอียด 10 นาโนเมตร ใช้แหล่งแสงแบบ D65 มุมผู้สังเกต 10 องศา ในการทดลองใช้ลำไยพันธุ์อีดอ โดยจะเลือกเป็นแบบผลลำไยชำจากการใช้แรงกดจากเครื่อง Texture Analyzer ด้วยความเร็วหัวกดเท่ากับ 25 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ซึ่งจะได้พลังงานในการกดแล้วชำทุกผลเท่ากับ 0.027 จูล (J) จำนวน 100 ผล เป็นผลขนาดใหญ่ และแบบผลลำไยไม่ชำเลือกด้วยการสังเกตด้วยสายตาจำนวน 300 ผล เป็นผลขนาดใหญ่

เช่นกัน มาทำการวัดเพื่อหาการจำแนกการเข้าและไม่เข้าของผลลำไย จากการเตรียมผลลำไย ผู้วิจัยได้คัดแยกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มผลลำไยเข้าจำนวน 100 ผล เราจะเรียกกลุ่มนี้ว่ากลุ่มสเปกตรัมแบบผลเข้าจำนวน 100 สเปกตรัม และกลุ่มที่สองเป็นผลลำไยไม่เข้าจำนวน 300 ผล เราจะเรียกกลุ่มนี้ว่ากลุ่มสเปกตรัมแบบผลไม่เข้าจำนวน 300 สเปกตรัม ทั้งสองกลุ่มจะแบ่งเป็นสองชุด โดยชุดแรกเรียกว่าชุด Calibration set ซึ่งใช้จำนวนสเปกตรัมในการทดลอง 75% และชุดที่สองเรียกว่าชุด Validation set ซึ่งใช้จำนวนสเปกตรัมในการทดลอง 25% ของแต่ละกลุ่มทดลองวัดค่าเปอร์เซ็นต์แสงสะท้อนที่ความยาวคลื่นที่กำหนด และเก็บค่าผลการทดลองเป็น Microsoft Excel แล้วนำค่าที่ได้มาใช้กับซอฟต์แวร์โปรแกรม Unscrambler 9.8 มาวิเคราะห์

ในการใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม Unscrambler 9.8 นั้น เราจะต้องสร้างแบบจำลองในการคัดแยกกลุ่ม ซึ่งจะแบ่งเป็นกลุ่มผลลำไยเข้า และกลุ่มผลลำไยไม่เข้า โดยใช้โมเดล 3 โมเดลในการจำแนกแยก คือ 1) โมเดล Principal Component Analysis (PCA), 2) โมเดล Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) และ 3) โมเดล Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) หลังจากนั้นนำโมเดลทั้งสามมา Validation set เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการจำแนก



ภาพที่ 16 เครื่อง Spectrophotometer

ผลและวิจารณ์

ตอนที่ 1 ปริมาตร น้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ คุณสมบัติทางกายภาพของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์ และ ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

ปริมาตรและน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์

ผลจากการศึกษาภาชนะบรรจุลำไยทั้ง 3 แบบ มีค่าปริมาตรและน้ำหนักของตะกร้าดังนี้ แบบที่ 1 ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็กหรือทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal) มีปริมาตร 0.0488 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม แบบที่ 2 ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) มี ปริมาตร 0.053 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม และแบบที่ 3 แบบใช้รถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up track bed) ซึ่งมีปริมาตร 5.675 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักในการบรรทุก 1,500 – 2,000 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 13

สมบัติทางกายภาพของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์

1. มิติ (Dimension) หรือขนาดในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) ลำไยพันธุ์ดอ (อีดอ) มีขายมากที่สุดของทั้งสองตลาด รองลงมาเป็นพันธุ์ เปี้ยวเขียว และพันธุ์สีชมพู มีค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 28.43 ± 1.63 , 28.37 ± 1.40 และ 26.17 ± 1.15 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งมีขายในช่วงเดือนสิงหาคมจนถึงต้นเดือนกันยายน โดยแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ Big AAA), Medium (AA) และ Small (A) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์

Grading	a (mm)		
	Dor	Biawkhiaiw	Chompoo
Big(AAA)	> 34.3	> 32.4	> 31.5
Medium(AA)	> 29.5 to 34.3	> 28.7 to 32.4	> 27.4 to 31.5
Small (A)	> 27.2 to 29.5	> 25.0 to 28.7	> 23.2 to 27.4

2. ความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของผลลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพู โดยวัดได้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.91 ± 0.05 , 0.94 ± 0.03 และ 0.93 ± 0.02 หน่วยตามลำดับแสดงดังตารางที่ 3

3. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ที่วัดได้ของผลลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพูมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.10 ± 0.03 , 1.11 ± 0.04 และ 1.12 ± 0.05 หน่วย ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3

4. เปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity, η) ของผลลำไยทั้งพันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพู มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 42.59 ± 1.49 , 49.58 ± 1.23 และ 49.74 ± 0.86 % ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 3

5. มุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามพันธุ์ได้แก่พันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพู ของทั้ง 2 แบบคือแบบบรรจุ (Filling) ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 26.13 ± 3.15 , 16.89 ± 3.26 และ 14.70 ± 2.28 องศา ตามลำดับ และแบบถ่ายเท (Emptying) ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 38.09 ± 2.75 , 35.71 ± 2.42 และ 28.01 ± 3.89 องศา ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3

6. ความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) (%) ของผลลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพู ซึ่งมีภาชนะบรรจุ 3 แบบนั้นโดยแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.38 ± 0.01 , 0.35 ± 0.00 และ 0.38 ± 0.00 % ตามลำดับ แบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.35 ± 0.03 , 0.37 ± 0.03 และ 0.35 ± 0.03 % ตามลำดับ และแบบที่ 3 มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.49 ± 0.03 , 0.44 ± 0.03 และ 0.44 ± 0.03 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3

7. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ได้ค่าเฉลี่ยผลลำไยพันธุ์อีดอ พันธุ์เขียวเขียว และพันธุ์สีชมพู ของพื้นผิวแผ่นไม้อัด มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.39 ± 0.04 , 0.33 ± 0.04 และ 0.39 ± 0.06 องศา ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของพื้นผิวแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.48 ± 0.06 , 0.45 ± 0.06 และ 0.40 ± 0.03 องศา ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นผิวแผ่นสแตนเลส เท่ากับ 0.32 ± 0.04 , 0.26 ± 0.02 และ 0.35 ± 0.02 องศา ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นผิวแผ่นพลาสติกเท่ากับ 0.31 ± 0.03 , 0.31 ± 0.03 และ 0.35 ± 0.02 องศา

ตามลำดับ เนื่องจากลำไยเป็น spheroid เหมือนสบูดำ ดังนั้นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของลำไยมีแนวโน้มเหมือนค่าผลสบูดำ (P.Sirisomboon. et al., 2007) แสดงดังตารางที่ 3

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของความสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของผลลำไยแต่ละพันธุ์ที่พื้นผิวแตกต่างกันมาทดสอบความแตกต่าง สำหรับลำไยพันธุ์ดอ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของพื้นผิวแผ่นพลาสติกและแผ่นสแตนเลสไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ในขณะที่พื้นผิวทั้งสองชนิดนี้แตกต่างจากพื้นผิวของแผ่นไม้และแผ่นสแตนเลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับพันธุ์สีชมพู พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสมีค่าต่ำสุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากพื้นผิวแผ่นประเภทอื่นๆ ($P \leq 0.05$) โดยค่าความสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของพื้นผิวแผ่นพลาสติกและแผ่นไม้ไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ทั้งนี้พื้นผิวแผ่นสแตนเลสมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตสูงสุด และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในส่วนของพันธุ์เบ๊ยวเขียวพบว่าค่าความสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของพื้นผิวแผ่นไม้และแผ่นเหล็กไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ในขณะที่พันธุ์เบ๊ยวเขียวมีค่าความสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตของพื้นผิวแผ่นสแตนเลสและแผ่นพลาสติกไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($P > 0.05$) เช่นกัน และทั้งสองพื้นผิวมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตต่ำสุด

8. ความแน่นเนื้อ (Firmness, F) ของผลลำไยพันธุ์ดอ พันธุ์เบ๊ยวเขียว และพันธุ์สีชมพู วัดได้ค่าโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ, 5.09 ± 0.93 , 5.14 ± 0.95 และ 5.38 ± 1.77 N/m ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของลำไยทั้งสามสายพันธุ์

Physical Properties	Average±Sd		
	Dor	Chompoo	Biawkhiauw
Geometric Mean Diameter (mm ³)	28.34±1.63	26.17 ± 1.15	28.37 ± 1.40
Sphericity	0.91±0.05	0.93 ± 0.02	0.94 ± 0.03
Specific Gravity (SG)	1.10±0.03	1.12 ± 0.04	1.11 ± 0.04
Porosity (η)%	42.59±1.49	49.74 ± 0.86	49.58 ± 1.23
Angle of Response (Degrees)			
Filling method	26.13±3.15	14.70±2.28	16.89±3.26
Emptying	38.13±1.49	28.01±3.89	35.71±2.42
Packing Density (PD)			
PD (Trapezoidal)	0.38±0.00	0.35±0.00	0.38±0.00
PD (Rectangle)	0.35±0.03	0.37±0.03	0.35±0.03
PD (Pick-up track bed)	0.49±0.03	0.44±0.03	0.44±0.03
Coefficient of static friction (μ) (Degrees)			
Plywood	0.39±0.04b	0.33 ± 0.04b	0.39 ± 0.06b
Steel	0.48±0.06c	0.45 ± 0.06c	0.40 ± 0.03b
Stainless steel	0.32±0.04a	0.26 ± 0.02a	0.35 ± 0.02a
Plastic	0.31±0.03a	0.31 ± 0.03b	0.35 ± 0.02a
Firmness (N/mm)	5.09 ± 0.93	5.14 ± 0.95	5.38 ± 1.77

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

จากการสุ่มซื้อผลลำไยทั้งสามพันธุ์คือ พันธุ์ดอ พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เขียวจากบรรจุก้นชั้นส่ง พบว่าค่าความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกลเฉลี่ยทั้ง 2 ตลาดของทั้งสามพันธุ์ซึ่งได้แก่ ผลร่วง (Detached), ผลแตก (Cracked), เปลี่ยนรูป (Deformed), ช้ำ (Bruised), ถูกแทงทะลุ (Punctured), ดำ (Black) เนื่องจากถูกรีดด้วยกำมะถันมากเกินไป และเน่า (Decay) และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายประเภทต่างๆของพันธุ์ดอ 12.64±2.53, 0.55±0.75, 0.62

± 0.35 , 0.49 ± 0.42 , 0.06 ± 0.04 , 1.01 ± 0.51 และ $0.13 \pm 0.11\%$ เฉลี่ยรวม 15.50% แสดงในภาพที่ 17 การเลือกกลุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงผลในตารางที่ 4, 5 และ 6



ตารางที่ 4 ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์อีดอในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ 2

Market - place	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
		detached	cracked	deformed	bruised	punctured	black (sulfur)	decay
Thai	20.33	12.33	0.97	1.17	0.12	0.12	0.22	0.10
	±0.57	±3.16	±1.43	±0.63	±0.08	±0.08	±0.20	±0.09
See Moom mueng	19.86	12.95	0.13	0.07	0.86	0	1.80	0.15
	±0.21	±1.90	±0.08	±0.06	±0.77	0	±0.82	±0.13
average	20.10	12.64	0.55	0.62	0.49	0.06	1.01	0.13
	±0.21	±2.53	±0.75	±0.35	±0.42	±0.04	±0.51	±0.11

หมายเหตุ Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))*100

ตารางที่ 5 ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์สีชมพูในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ 2

Market - place	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
		detached	cracked	deformed	bruised	punctured	black (sulfur)	decay
Thai	20.34	0.37	0.45	0.17	1.15	3.36	0.26	0.09
	±0.90	±0.55	±0.18	±0.15	±0.28	±0.36	±0.05	±0.09
See Moom mueng	20.32	0.05	0.52	0.17	1.17	3.02	0.63	0.14
	±0.81	±0.01	±0.13	±0.08	±0.15	±0.15	±0.37	±0.06
average	20.33	0.21	0.49	0.17	1.16	3.19	0.05	0.11
	±0.77	±0.40	±0.14	±0.11	±0.20	±0.31	±0.41	±0.07

หมายเหตุ Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))*100

ตารางที่ 6 ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์เขียวเขียวในบรรจุภัณฑ์แบบที่ 1 และ 2

Market - place	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
		detached	cracked	deformed	bruised	punctured	black (sulfur)	decay
Thai	20.92	0.03	0.11	0.03	0.32	0.75	0.06	0.03
	±1.10	±0.00	±0.13	±0.05	±0.44	±0.52	±0.10	±0.05
See Moom mueng	20.57	0.05	0.07	0.06	0.89	1.18	0.07	0.05
	±0.70	±0.01	±0.06	±0.02	±0.03	±0.03	±0.07	±0.03
average	20.75	0.04	0.09	0.04	0.61	0.97	0.06	0.04
	±0.85	±0.01	±0.09	±0.04	±0.42	±0.40	±0.08	±0.04

หมายเหตุ Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))*100



ก) ผลร่วง (Detached)



ข) ผลแตก (Cracked)



ค) ผลเปลี่ยนรูป (Deformed)



ง) ผลช้ำ (Bruised)



จ) ผลถูกแทง (Punctured)



ฉ) ผลเน่า (Decay)

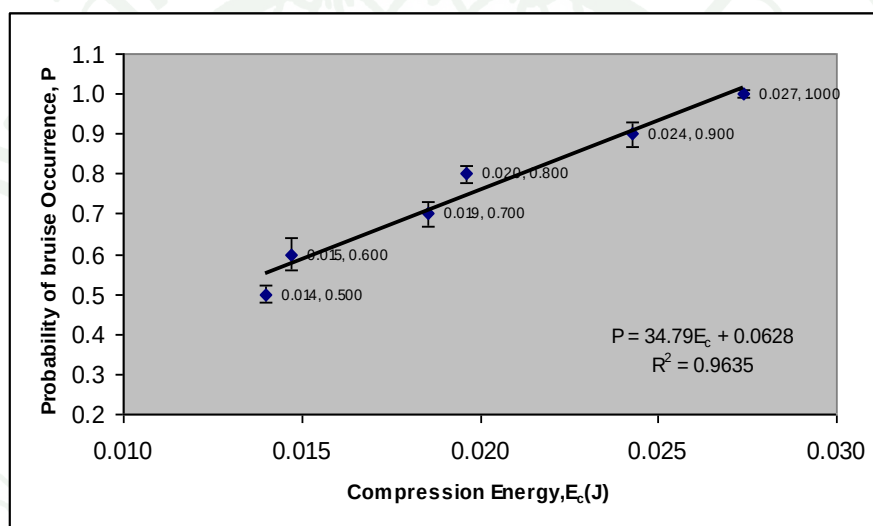


ช) ผลดำ (Black (sulfur))

ภาพที่ 17 ความเสียหายแบบต่างๆของผลลำไยสด

ตอนที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความซ้ำของลำไยสดกับพลังงานที่ทำให้ซ้ำภายใต้แรงกด (Compression) และแรงกระแทก (Impact)

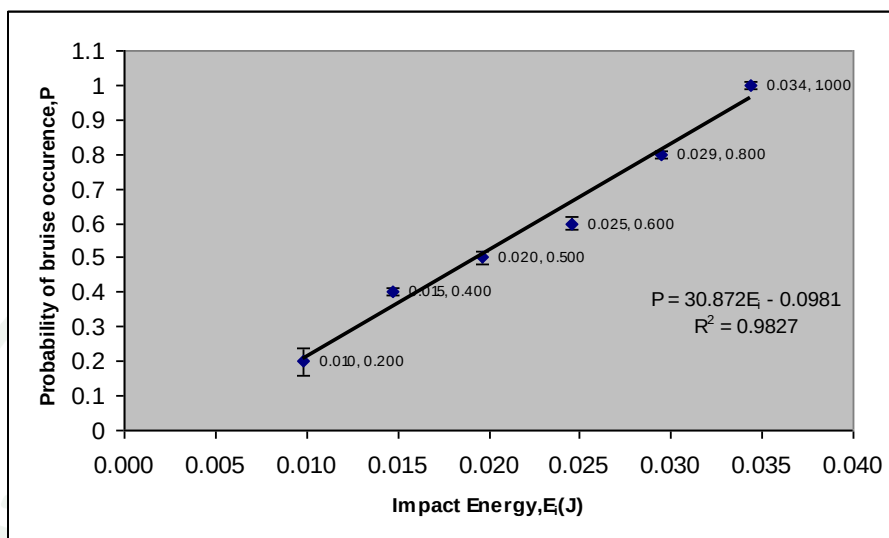
จากภาพที่ 18 และภาพที่ 19 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกดและพลังงานกระแทก พลังงานที่ใช้ของทั้งสองจะไม่เกิดการซ้ำเมื่อใช้พลังงานหรือแรงน้อยๆกับผลลำไย จุดเริ่มซ้ำแสดงถึงความสอดคล้องของการเกิดซ้ำที่สัมพันธ์กับความเป็นไปได้ของการเกิดการซ้ำเท่ากับ 1 ดังนั้นความสัมพันธ์ของพลังงานกดและพลังงานกระแทกเป็นพลังงานในระดับไม่สูงมากนักในการที่จุดเริ่มแสดงความเป็นไปได้ของการเกิดการซ้ำ



ภาพที่ 18 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความซ้ำของลำไยสดกับพลังงานที่ทำให้ซ้ำภายใต้แรงกด (Compression)

จากกราฟในภาพที่ 18 และภาพที่ 19 แสดงสมการถดถอยเชิงเส้นตรงระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกดและพลังงานกระแทกจะเปลี่ยนแปลงในเชิงเส้นตรง จุดที่พลังงานกดและพลังงานกระแทกเริ่มต้นทำให้เกิดการซ้ำของผลลำไยมีค่าเท่ากับ 0.027 จูล (J) และ 0.034 จูล (J) ตามลำดับ ถ้าใช้พลังงานที่มีค่าดังกล่าวแล้วนี้จะทำให้เกิดการซ้ำทุกผลเมื่อได้รับพลังงานกดและพลังงานกระแทก ในปี 2007, Jarimopas, B., et.al. พบว่าในการลดการกระแทกของแอปเปิลเป็นผลมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกระแทก ซึ่งผลการซ้ำของลำไยสดและความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของความ

เป็นไปได้ (P) ในการเกิดการชำมีค่า $P = 34.79E_c + 0.06 (R^2 = 0.96)$ และค่า $P = 30.87E_i - 0.10 (R^2 = 0.98)$ ตามลำดับ



ภาพที่ 19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความชำของลำไยสดกับพลังงานที่ทำให้ชำภายใต้แรงกระแทก (Impact)

ในการประเมินพื้นที่การชำนั้นจะเป็นการเปลี่ยนสีที่ผิวเปลือกของผลลำไยที่ถูกแรงมากระทำ การเปลี่ยนสีผิวของผลลำไยนั้นจะมีสีน้ำตาลแก่กว่าปกติและมีลักษณะค่อนข้างเป็นวงกลม ประมาณว่าพื้นที่การชำเป็นวงกลมแสดงดังภาพที่ 20 และสามารถหาค่าพื้นที่การชำได้



ก) ลักษณะพื้นที่ชำเป็นวงกลม

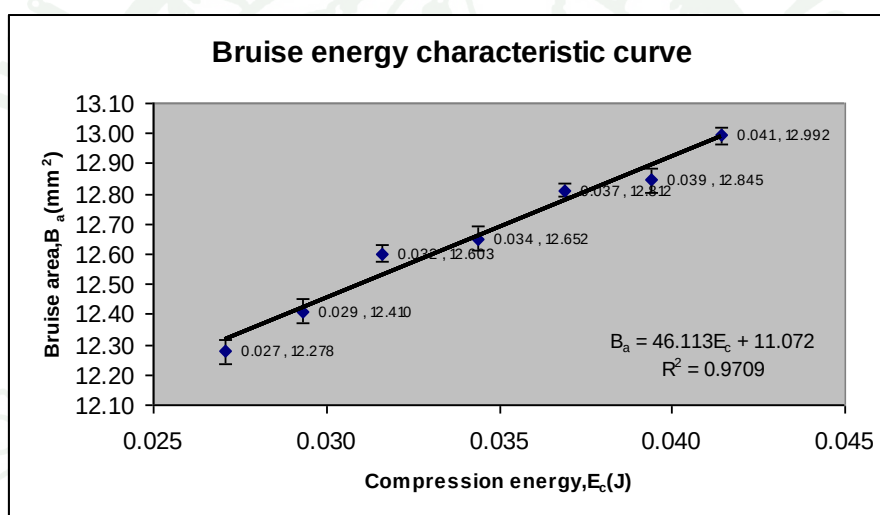


ข) ขนาดพื้นที่ที่ชำ

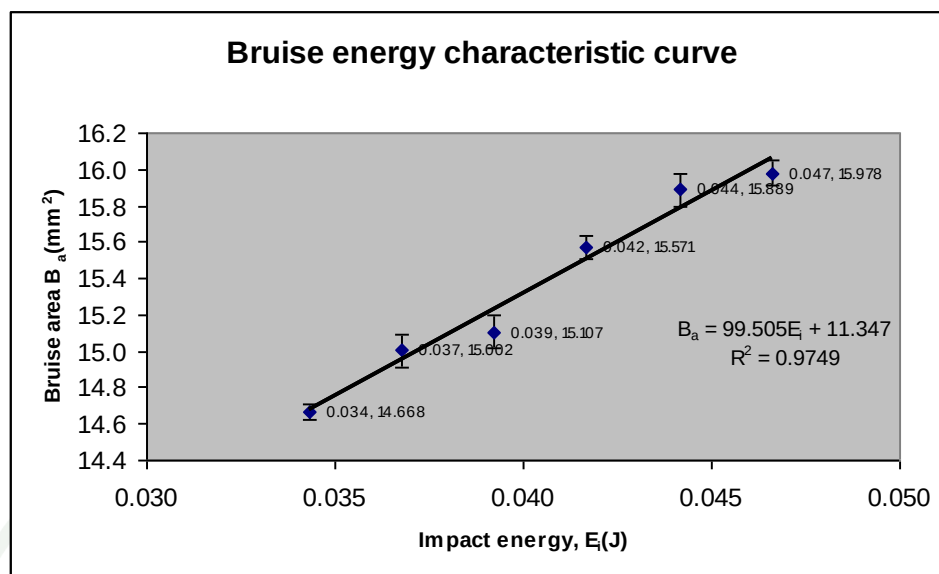
ภาพที่ 20 ลักษณะพื้นที่ชำ ก) ลักษณะพื้นที่ชำเป็นวงกลม ข) ขนาดพื้นที่ที่ชำ

จากภาพที่ 21 และภาพที่ 22 แสดงค่าความสัมพันธ์พื้นที่ที่ซ้ำกับพลังงานกดและพลังงานกระแทกภายใต้การกดและการกระแทกที่มากกว่าจุดเริ่มต้น ค่าพื้นที่การซ้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีพลังงานกด (Compression energy) และพลังงานกระแทก (Impact energy) มากขึ้น พลังงานของทั้งสองจะถูกเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงผิวเปลือกผลลำไยแตก 100 % (หรือทุกผลจะแตกหมด) ซึ่งค่าที่ได้จากพลังงานกดเท่ากับ 0.041 จูล (J) และพลังงานกระแทกเท่ากับ 0.047 จูล (J) และได้สูตรสมการถดถอยของพลังงานกด (Compression Energy) และพลังงานกระแทก (Impact Energy) ที่ได้คือพื้นที่ซ้ำ (B_a) เท่ากับ $46.11E_c + 11.07$ ($R^2 = 0.97$) และพื้นที่ซ้ำ (B_a) เท่ากับ $99.51 E_i + 11.35$ ($R^2 = 0.97$) ตามลำดับ

ค่าความสัมพันธ์พื้นที่ที่ซ้ำกับพลังงานที่ทำให้ซ้ำภายใต้แรงกดอย่างช้าๆ (Slow compression)



ภาพที่ 21 ค่าความสัมพันธ์พื้นที่ที่ซ้ำกับพลังงานกดที่ทำให้ซ้ำภายใต้แรงกด (Compression)

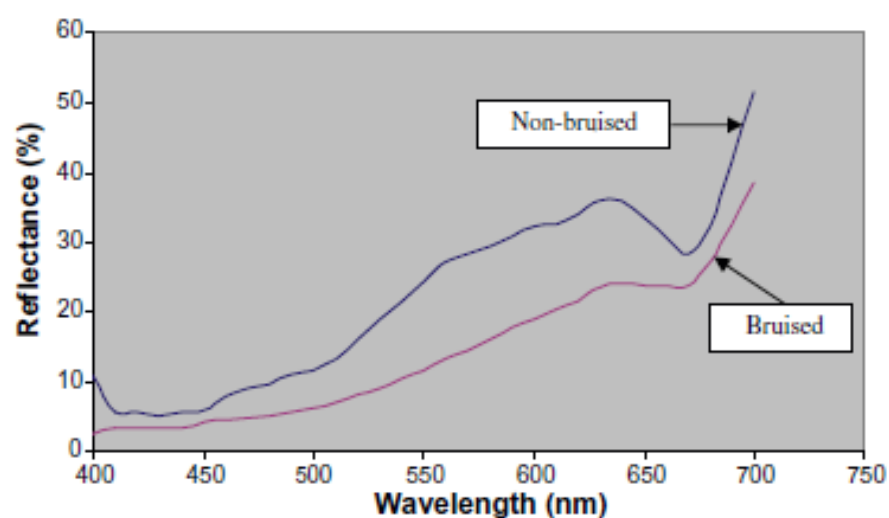


ภาพที่ 22 ค่าความสัมพันธ์พื้นที่ช้ำกับพลังงานกระแทกที่ทำให้ช้ำภายใต้แรงกระแทก (Impact)

ตอนที่ 3 การจำแนกการช้ำของลำไยสดโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer โดยใช้สเปกโตรสโกปีของแสงที่มองเห็นได้

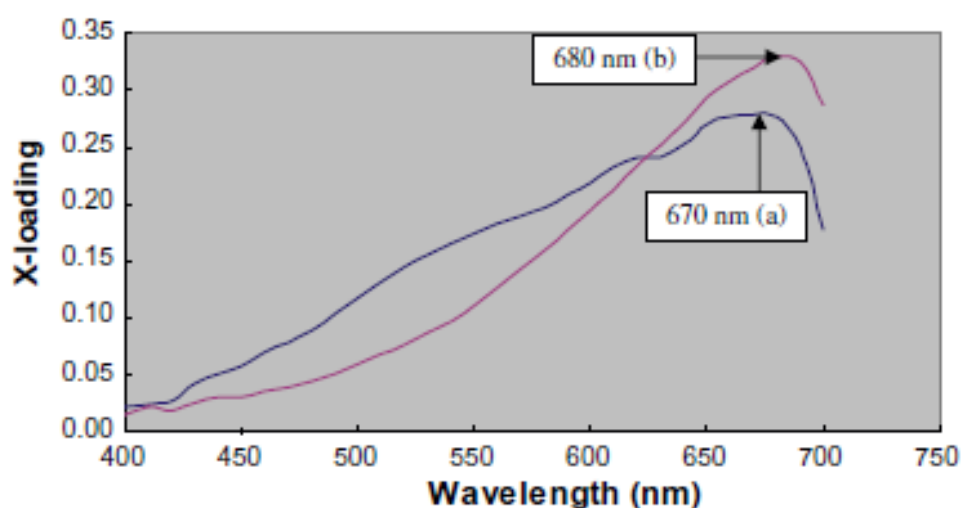
ผลของการใช้โมเดล PCA

จากภาพที่ 23 แสดงการสะท้อนของสเปกตรัมมีค่าเฉลี่ยในช่วงที่มองเห็นของผลลำไยที่ช้ำและไม่ช้ำที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน สเปกตรัมของแสงที่มองเห็นทั้งสองกลุ่มของผลลำไยที่มีรายละเอียดที่คล้ายกัน โดยผลลำไยที่ไม่ช้ำมีการสะท้อนของสเปกตรัมสูงสุดที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร (nm) และผลลำไยที่ช้ำมีการสะท้อนของสเปกตรัมสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรตามลำดับ และค่าการสะท้อนของสเปกตรัมของผลลำไยทั้งคู่ก็จะลดลงมาที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรและจากนั้นเพิ่มขึ้นไปที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรทั้งคู่ จากกราฟพบว่าการสะท้อนของสเปกตรัมของผลลำไยช้ำต่ำกว่าของผลลำไยที่ไม่ช้ำ

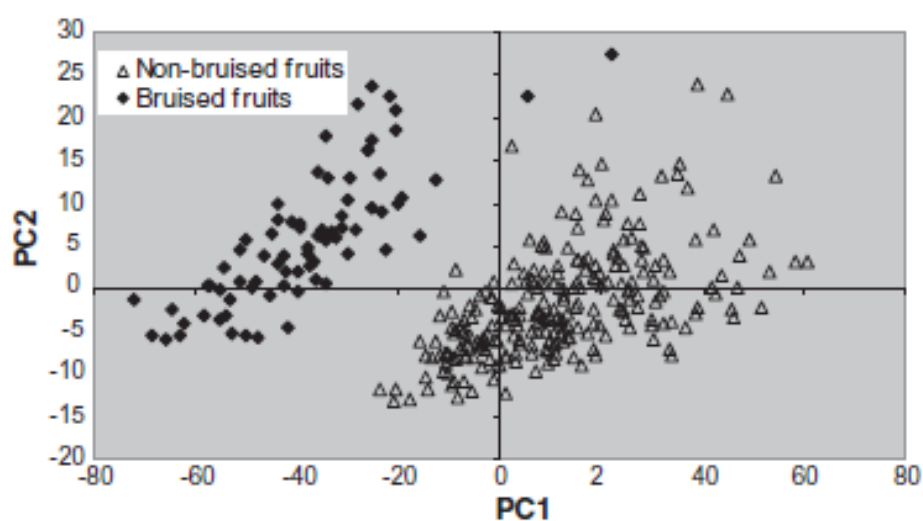


ภาพที่ 23 ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมสะท้อนของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำ

จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นถึงการพล็อต X-Loading ของโมเดล PCA ของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำ จากกราฟพบว่า X-Loading ของโมเดลของ PCA นี้จำแนกผลลำไยที่ไม่ช้ำได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร ในขณะที่ X-Loading ของผลลำไยที่ช้ำจำแนกค่าได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 680 นาโนเมตร และจากกราฟพบว่าค่าของค่า X-Loading ผลลำไยช้ำมากกว่าของผลลำไยที่ไม่ช้ำ



ภาพที่ 24 ค่า X-Loading ของ โมเดล PCA ของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำ



ภาพที่ 25 ค่า Score Plot ของผลลำไยช้ำ (Bruised) และผลลำไยไม่ช้ำ (Non-bruised)

ผลของโมเดล PCA (bruised) และโมเดล PCA (Non-bruised)

จากภาพที่ 25 แสดงค่า Score plot ของผลลำไยช้ำและผลลำไยไม่ช้ำในโมเดล PCA พบว่าสามารถคัดแยกระหว่างผลลำไยที่ไม่ช้ำและช้ำได้อย่างชัดเจน โดยผลลำไยไม่ช้ำ (Non-bruised) และผลลำไยช้ำ (Bruised) แสดงในภาพที่ 26 และภาพที่ 27 และนอกจากนี้ตารางที่ 7 ยังได้แสดงผลของการจัดหมวดหมู่ของลำไยทั้งสองแบบได้ชัดเจนเช่นกัน โดยพบว่าในโมเดลแบบ PCA (Non-bruised) สามารถจำแนกผลลำไยที่ไม่ช้ำได้ถูกต้อง 93.88% และสามารถจำแนกผลลำไยที่ช้ำได้ 100% ในโมเดลแบบ PCA (Bruised) สามารถจำแนกผลลำไยที่ช้ำได้ถูกต้อง 75% และสามารถจำแนกผลลำไยที่ไม่ช้ำได้ 100%



ภาพที่ 26 ตัวอย่างภาพผลลำไยที่ไม่ช้ำ



ภาพที่ 27 ตัวอย่างภาพผลลำไยที่ชำ

ตารางที่ 7 ผลการจำแนกของผลลำไยที่แบบชำและแบบไม่ชำโดยใช้สเปกตรัมระหว่าง 400 - 700 นาโนเมตร โดยวิธี PCA, SIMCA และ PLS-DA

Sample model	Non-bruised	Bruised
PCA (non-bruised)	93.88	100
PCA (bruised)	100	75
SIMCA		86.49
PLS-DA		100

ผลของโมเดล SIMCA และ โมเดล PLS-DA

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นผลของการจำแนกการชำและไม่ชำผลลำไยโดยโมเดล SIMCA และ PLS-DA โดยโมเดล SIMCA สามารถจำแนกผลลำไยชำและไม่ชำได้ 86.49% แต่โมเดล PLS-DA สามารถจำแนกผลลำไยชำและไม่ชำได้ 100% แสดงให้เห็นว่าโมเดล PLS-DA มีประสิทธิภาพในการจำแนกผลลำไยชำและไม่ชำที่ดีกว่าโมเดล SIMCA

Xing ,et al (2003) ใช้ การวิเคราะห์ จำแนกที่ยอมรับ (PCA) การจำแนก รอยชำและจุดที่มีคุณภาพดี ไม่ชำ ของแอปเปิ้ล “Golden Delicious” โดยใช้ การสะท้อน VIS / NIR สเปกตรัม ในช่วง 400 - 1700 นาโนเมตร แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ยอมรับได้ (CR^2) เป็น 0.74 และ 0.68 กับ แรงกระแทก และแรงกดอย่างช้าๆ ตามลำดับ ผลจากการวิจัยของ Xing ,et al (2005a) ซึ่งใช้ในวิธี Hyperspectral ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400 และ 1000 นาโนเมตร พบว่า ผลแอปเปิ้ลไม่ชำ

93% และต่อมา Xing ,et al (2005b) ใช้โมเดล PLS - DA ในการคัดแยกผลแอปเปิ้ลเขียว และไม่เขียว ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400 และ 1700 นาโนเมตร และพบว่าสามารถคัดแยกการเขียวจากเนื้อเยื่อ ได้ดีกว่า โมเดล SIMCA จากผลการวิจัยสำหรับผลลำไยความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ สามารถจำแนก ได้ความถูกต้อง 100% ของผลลำไยเขียว และผลลำไยไม่เขียวโดยวิธี PLS - DA นี้ แสดงให้เห็นว่าเป็นวิธี ที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะของผักและผลไม้



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ตอนที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของผลลำไยและความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์พบว่าค่าของความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์ (Packing Density) ของพันธุ์อีดอ มีค่าเฉลี่ย 0.38 ± 0.01 มากกว่าของอีกสองสายพันธุ์ ซึ่งแสดงว่าลำไยพันธุ์อีดอมีอัตราส่วนของผลลำไยที่ครอบครองภาชนะได้มากกว่า และยังพบว่าค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ของพันธุ์อีดอมีค่าเฉลี่ย 5.09 ± 0.93 N/mm ซึ่งน้อยกว่าของอีกสองสายพันธุ์ ซึ่งบ่งบอกว่ามีความนุ่มนวล (Softness) มากกว่านั่นเอง จึงทำให้เกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าสอดคล้องกับค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 15.50% ซึ่งสูงอีกสองสายพันธุ์

ความเสียหายเชิงกลของผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ พบว่าความเสียหายมากที่สุดเกิดกับบรรจุภัณฑ์ท้ายรถบรรทุกขนส่ง ภาชนะบนสุด ซึ่งภาชนะบรรจุลำไยเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ความเสียหายของพันธุ์อีดอส่วนใหญ่เป็นผลร่วง ผลแตก ผลเปลี่ยนรูปร่าง ผลช้ำ ผลถูกแทงทะลุ ผลเน่า และค้ำเนื่องจากถูกรมด้วยกัมมะถันมากเกินไป ตามลำดับ ส่วนความเสียหายพันธุ์เขียวเขียวและพันธุ์สีชมพูส่วนใหญ่ของเป็นผลถูกแทงทะลุ ผลแตก ผลช้ำ ผลแตก ผลร่วง ผลเปลี่ยนรูปร่าง ผลเน่า และค้ำเนื่องจากถูกรมด้วยกัมมะถันมากเกินไป ตามลำดับ

ตอนที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความช้ำ (Probability, P) ของลำไยสด และพื้นที่รอยช้ำ (Bruise area, B_a) กับพลังงานที่ทำให้ช้ำภายใต้แรงกด (Compression Energy, E_c) และแรงกระแทก (Impact Energy, E_i)

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ของการเกิดความช้ำของลำไยสดกับพลังงานที่ทำให้ช้ำภายใต้แรงกดอย่างช้าๆ (Slow compression) และแรงกระแทก (Impact) พบว่าพื้นที่รอยช้ำมีความสัมพันธ์ (B_a) เป็นเส้นตรงกับพลังงานกด (Compression Energy, E_c) และพลังงานกระแทก (Impact Energy, E_i) ซึ่งได้ สมการถดถอยของพลังงานกด (E_c) และพลังงานกระแทก (E_i) เป็น $B_a = 46.11E_c + 11.07$ ($R^2 = 0.97$) และ $B_a = 99.51E_i + 11.35$ ($R^2 = 0.97$) ตามลำดับ ส่วนผลของค่าความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของความเป็นไปได้ (Probability, P) ในการเกิดการช้ำมีค่า $P = 34.79E_c + 0.06$ ($R^2 = 0.96$) และ ค่า $P = 3.087E_i - 0.10$ ($R^2 = 0.98$) ตามลำดับ โดยพลังงานกด

และพลังงานกระแทกที่ทำให้เกิดการชำรุดของผลลำไยสูงสุดเท่ากับ 0.027 จูล (J) และ 0.034 จูล (J) ตามลำดับ และมีผลต่อการแตก 100% ของผลลำไยที่พลังงาน 0.041 จูล (J) และ 0.047 จูล (J) ตามลำดับ

ตอนที่ 3 การจำแนกการชำรุดของผลลำไยสดโดยใช้เครื่องสแกน Spectrophotometer โดยใช้สเปกโตรสโกปีของแสงที่มองเห็นได้

ผลของค่าสเปกตรัมสะท้อนที่มองเห็นได้รับการพิสูจน์เป็นครั้งแรกในความสามารถในการจำแนกความชื้นและไม่ชื้นของผลลำไยสด ในการศึกษาที่มีความแปลกใหม่ในการใช้สเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ PCA, SMICA และ PLS-DA โมเดล PCA ยังถูกใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคนี้สำหรับการจำแนกประเภท การวิเคราะห์แบบ PLS-DA แสดงให้เห็นว่าสามารถจำแนกผลลำไยชื้นและไม่ชื้นได้ดีที่สุดเท่ากับ 100% และพบว่าความถูกต้องในการจำแนกจะดีกว่าวิธี SIMCA

จากการศึกษาทั้งสามตอนพบว่าค่าต่างๆเหล่านี้เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ลำไยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย และเป็นการคัดคุณภาพผลลำไยสด รวมทั้งข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการพัฒนาระบบคัดแยกความชื้นแบบออนไลน์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการคัดแยกความชื้นของผลลำไยแบบพกพาได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการขนส่งโดยใช้บรรจุภัณฑ์แบบต่างๆ นั้นมีความเสียหายแบบต่างๆมาก ดังนั้นควรจะศึกษาการใช้วัสดุห่อหุ้มผลลำไยสดในการขนส่ง เพื่อลดความเสียหาย รวมทั้งลดพลังงานที่เกิดจากแรงกระแทกและแรงกด และจากการศึกษาการตรวจความชื้นของผลลำไย สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยโมเดล PLS - DA ที่มีการคัดแยกความชื้นได้และไม่ชื้นได้ถูกต้องแม่นยำได้ถึง 100% และทั้งสามตอนพบว่าสาเหตุที่ทำให้ผลผลิตเสียหายเกิดจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต การบรรจุ และการขนส่ง และเราสามารถตรวจความเสียหายก่อนนำไปขายในประเทศ หรือส่งออกต่างประเทศโดยใช้เครื่องสแกน Spectrophotometer ในการคัดแยกผลลำไย โดยใช้ช่วงแสงสะท้อนจะใช้ช่วงที่ 400 - 700 นาโนเมตร ที่มีความละเอียด 10 นาโนเมตร ใช้แหล่งแสงแบบ D65 และมุมผู้สังเกต 10 องศา และพบว่าช่วงแสงสะท้อนจะใช้ช่วงที่ 670 - 680 นาโนเมตร เป็นช่วงที่แสดงว่าผลลำไยชื้นและไม่ชื้นได้แม่นยำสูงสุด และน่าจะเป็น

ประโยชน์ในการศึกษางานวิจัยต่อยอดนำไปสู่การผลิตเครื่องมือวัดความซ้ำของผลไม้ที่เกี่ยวข้องใน
เชิงการค้าต่อไป



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ใจทิพย์ วานิชขัง และ บัณฑิต จริโมภาส. 2551. คุณสมบัติความแน่นอนและการสะท้อนแสงของผลแก้วมังกร. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 จัดโดยคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ร่วมกับ สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระหว่างวันที่ 31 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 ณ โรงแรมอฟีเรียล แม่ปิง เชียงใหม่

ฉลองชัย แบบประเสริฐ. 2551. โครงการผลิตเอกสารวิชาการเผยแพร่เกษตรกร. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ทรงธรรม ไชยพงษ์, สุวรรณ หอมหวาน และ บัณฑิต จริโมภาส. 2549. เครื่องต้นสะเทือนทำในประเทศสำหรับทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1 (12): หน้า 48-53.

ทรงธรรม ไชยพงษ์ และ บัณฑิต จริโมภาส. 2549. สมบัติทางกายภาพบางประการของมะม่วงน้ำดอกไม้. บทความวิจัยเสนอในการประชุมวิชาการครั้งที่ 7 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ร่วมกับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่างวันที่ 23-24 มกราคม 2549 ณ ห้องประชุมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ธีรนุช เจริญกิจ และ พาวิน มะชัย. 2548. การเก็บเกี่ยวและการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว. ในงานวันลำไยคุณภาพ. วันแม่โจ้ศาสตร์แห่งลำไย 25-27 พฤศจิกายน เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. หน้า 47-50.

บัณฑิต จริโมภาส. 2529. ความเสียหายของลำไยในการขนส่ง, วารสารวิศวกรรมเกษตร, มกราคม - มีนาคม 2529. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 33-38.

บัณฑิต จริโมภาส. 2529. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน นครปฐม. หน้า 20-21.

บัณฑิต จริโมภาส. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยวบรรจุภัณฑ์และเรือนบรรจุผลไม้.
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ขอนแก่น หน้า 216.

บัณฑิต จริโมภาส. 2545. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร. ภาค 1: ทฤษฎี. ภาควิชา
วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
นครปฐม หน้า 160

บัณฑิต จริโมภาส และ ศุภกิตต์ สายสุนทร. 2547. การปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ
Ballistic Pendulum. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 11(1): 51-56.

บัณฑิต จริโมภาส และ บุญยวิษ ศรีสวัสดิ์. 2548. ความเสียหายหลังการขนส่งและบรรจุภัณฑ์ของ
มะขามหวานไทย. บทความวิจัยเสนอในการประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว
และหลังการผลิตแห่งชาติ ครั้งที่ 3 จัดโดยภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรกำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ระหว่างวันที่ 10-12 ตุลาคม 2548 ณ
โรงแรมทิพย์วิมานรีสอร์ท หาดชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

ปานมนัส ศิริสมบุญ, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ สาทิป รัตนภาสกร. 2538. สมบัติทาง
กายภาพและวิศวกรรมของชีววัตถุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ หน้า 7, 26, 41, 43, 54.

พนิดา บุญปลุกษ์ และ บัณฑิต จริโมภาส. 2549. สมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็ง. การ
ประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 23-
24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

เพ็ญแข แสงแก้ว. 2554. สถิติเพื่อการวิจัยโดยใช้คอมพิวเตอร์ (SPSS Version 10.0).
โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด ฟันี่พับบลิชชิง, กรุงเทพฯ

พาวิน มโนชัย วรินทร์สุทนต์, สุรัชย์ ศาลิรัศ, จิรนนท์ เสนานาญ, จ่านง ศรีจันทร์ และ เสกสรรค์ อุสสหาดานนท์. 2547. การตัดแต่งกิ่งเพื่อควบคุมทรงพุ่มลำไย. ทรงฝ่าซีหงาย. ในการนำผลงานวิจัยไม่ผลสู่การปฏิบัติเชิงพาณิชย์. สาขาไม้ผล ภาควิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่. หน้า 9-21.

มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2557. ตลาดรองรับผลลำไย. การบริโภคภายในประเทศ. แหล่งที่มา:

<http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learening47/HO416/html/pa0115.htm>

เรืองยศ ลาภบุญเรือง. 2531. สัญฐานการงอกและความมีชีวิตหลังการเก็บเกี่ยวของละอองเกสรมะม่วง ลิ้นจี่และลำไย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่. แหล่งที่มา:

(http://202.28.248.62/ontology/App_View/Wiki/Content.aspx?nodeID=337)

วสันต์ แสงนิล. 2549. การสันสะเทือนของตะกร้าพลาสติกบรรจุส้มเขียวหวานระหว่างการขนส่งทางรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. สถิติการส่งออก. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ แหล่งที่มา:

www.oae.go.th/oae_go_th/statIm_Ex.php, 23/03/2557.

สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2554. ผลงานแสดง.

แหล่งที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter8/Part3.html>, 2554.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). สวก. 2557. แหล่งที่มา:

<http://www.arda.or.th/kasetinfo/north/plant/longan.html>, 2557

อุดมศักดิ์ กิจทวี. 2551. สมบัติของเปลือกมังคุดเมื่อแจ้งจากการรับภาระกระทำกระแทกและกดเกือบสถิติและการซ้ำของเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระเชิงกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- Ato, Bart-Ptange and Edward A. Baryeh. 2002. The physical properties of category B cocoa beans. (On line). **Journal of Food Engineering**. 60: 219-227 p.
<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>.
- Amin, M.N., Hossain, M.A. and Roy, K.C. 2003. Effect of moisture physical properties of lentil seeds.(On line). **Journal of food engineering**. 65: 83-87 p.
<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>.
- American Society for Testing and Materials. 1991 . Guide for conducting 10-day static sediment toxicity tests with marine and estuarine amphipods, **ASTM Standard Methods**, 11.04, Method Number E-1367-90, ASTM, Philadelphia, PA.
- ASAE Standards. 1998. Compression test of food materials of convex shape. ASAE S368.3 MAR95, **ASAE Standards**. 554-559.
- Bajema, R.W. and Hyde, G.M., 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. **Transactions of the ASAE**, 41 (5): 1399-1405.
- Bollen, A. F., Nguyen, H.X. and Dela Rue, B.T. 1999. Comparison of methods for estimating the bruise volume of Amin M.N., M.A.Hossain, K.C.Roy. 2003. Effect of moisture physical properties of lentil seeds. (On line). **Journal of food engineering**. 65: 83-87p. :
<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>.
- Chonhenchob, V. and Singh, S. P. 2003. A Comparison of corrugated boxes and reusable plastic containers for mango distribution. **Packaging Technology and Science**. 16: 231-237p.
- Chonhenchob, V. and S.P. Singh, 2004. Testing and comparison of various packages for mango distribution. **Journal of Testing and Evaluation**. 32(1): 69-72p.

- Chonhenchob, V. and Singh, S.P. 2005. Packaging performance comparison for distribution and export of papaya fruit. **Packaging Technology and Science**. 18 (3): 125–131p.
- Chonhenchob, V., Kamhangwong, D. and Singh, S.P. 2008. Comparison of reusable and single-use plastic and paper shipping containers for distribution of fresh pineapples. **Packaging Technology and Science**. 21(2): 73–83p.
- Ceponis, M. J. and Butterfield, J.E. 1974. Retail and consumer Mitchell, New York. **HortScience** Tight-fill fruit packing. California. 9(5): 447-448p.
- Ceponis, M. J. and Butterfield, J.E. 1981. Cull losses in western sweet cherries at retail and consumer levels in Metropolitan New York. **HortScience** 16(3): 324-326p.
- Ceponis, M. J. and Cappellini, R. A. 1985. Wholesale, retail, and consumer level losses of nectarines in metropolitan New York. **HortScience**. 20(1): 90-91p.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent and Barreiro, P. 1996. Effects of impact mass on firmness sensing of fruits. **Transactions of the ASAE**. 39(3): 1019-1023p.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent, and Barreiro, P. 2001. Application of elastic theory to high-speed impact sensing of fruits. **Proceeding of the IFAC/CIGR Workshop on Control Applications in Post-harvest and Processing Technology**. October 3-5, 2001. Tokyo, Japan. 21-26p.
- Delwiche, M.J., Tim, McDonald and Bowers, S.V. 1987. Determination of Peach Firmness by Analysis of Impact Forces. **Transactions of the ASAE**. 30(1): 249-254p.
- Fluck R C and Ahmed E M. 1973. Impact testing of fruits and vegetables. **Transactions of the ASAE**, 16(4): 660-666p.

- Guillou, R. 1963. Setting packed fruit by vibration. **Transactions of the ASAE**. 6(3):190-191, 194p.
- Garcia, C. A. 1998. Impacto Mecanico en Frutos: Tecnicas de Ensayo y Aplicacion en Variedades de Perae Manzana. **PhD. Thesis**. Universidad Poliecnica de Madrid, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos, Spain.
- Hanlon, J.F. 1984. **Handbook of Package Engineering**. 2nd ed. McGraw-hill book company, New York.
- Hinsch, R.T., Slaughter, D.C., Craig W.L. and Thompson, J.F. 1993. Vibration of fresh fruits and vegetable during refrigerated truck transport. **Transactions of the ASAE** 36 (4): 1039-1042p.
- Holt, J. E. and Shoorl, D. 1977. Bruising and energy dissipation in apples. **J. Text. Stud.** 15: 377-394p.
- Jarimopas, B. 1984. Failure of apples under dynamic loadings. **Unpublished D. Sc. Dissertation**. Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Technion City Haifa, Israel, 157p.
- Jarimopas, B. 1985. Reduction of Post-havest machancial loss of longan. **Unpublished FAO/RAPA Research Report**, Bangkok. 41p.
- Jarimopas, B., Singh, S. P. and Sangnil, W. 2005. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged Tangerines during transit. **Packaging Technology and Science**. 18:179-188p.

- Jarimopas, B. Singh, S.P., Sayasoonthorn, S. and Singh, J. 2007. Comparison of Package cushioning materials to Protect Post-harvest Impact damage to apple. **Packaging Technology and Science**. 20(5):315-324p.
- Jarimopas, B., Chopra, S and Kingsly, A. R. P. 2007. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. **Journal of Food Engineering**. 78(1): 22-26p.
- Jarimopas, B. Pushpariksha, P., Singh, SP. And Singh, J. 2008. Mechanical and Light Properties of Mangosteen Fruit as Related to Postharvest Quality. **Journal of Testing and Evaluation**. 36(2).213-219p.
- Jha, S. N., Kingsly, A.R.P. and Chopra, S. 2006. Non-destructive Determination of Firmness and Yellowness of Mango during Growth and Storage using Visual Spectroscopy. **Biosystems Engineering** 94(34): 397-402p.
- Mohsenin, N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. **Gordon and Breach**. New York.120p.
- Mohsenin, N.N. 1977. Characterization and failure in solid foods with particular reference to fruit and vegetables. **J. Text. Stud.** 8. 169-193p.
- Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. **Gordon and Breach Science Publishers**, New York.
- Mohsenin, N.N. 1996. Physical properties of plant and animal materials. **Gordon and Breach Science Publishes**, New York.
- Nahir, D., Schmilovitch, Z. and Ronen, B. 1986. Tomato grading by impact force response. **ASAE Paper** No. 86-3028. St. Joseph, Mich. : ASAE.

O'Brien W.N., La Du. B.N. and Bunim, J.J. 1963. Biochemical, pathologic and clinical aspects of alkaptonuria, ochronosis and ochronotic arthropathy. **Am. J. Med.**, 34: 813-838p.

Peleg, K. 1985. **Produce Handling, Packaging and Distribution**. The AVI Publishing Company Inc., Westport Connecticut.

Pushpariksha, P. and B. Jarimopas. 2007. Optical Properties of Mangosteen Fruits. In proceedings of the International Conference on Agricultural, **Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology**, 22-24 January 2007, Khon Kaen.

Ruiz-Altisent M. 1991. Damage Mechanisms in the handling of fruits. Chapter in "**Progress in Agricultural Physics and Engineering**", 231-257p. Ed. J. Matthews. CAB International.

Ruiz-Altisent, M. Jaren, M.C. and Correa, P. 1993. Fruit quality sensing: Post-harvest ripeness. Paper No. 935-25. 4th Int. symp. On Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering. Valencia-Zaragoza, Spain.

Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T., and Mahuttanyavanitch, W. 2007. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**. 97(2): 201-207p.

Schoorl, D. and Holt, J.E. 1980. Bruise resistance measurement in apples. **Journal of Texture Studies**. 11: 389-394p.

Singh, P. and Marcondes, J. 1989. Accelerated Lab Simulation of Truck Transport Environment Using Random Vibration. **ASME** winter Meeting, Paper 89-WA/EEP-17, San Francisco

- Turczyn, M. T., Grant, S. W., Ashby, B. H. and Wheaton, F. W. 1986. Potato shatter bruising during laboratory handling and transport simulation. **Transactions of the ASAE**, 29(4): 1171– 1175p.
- Wanichang J and Jarimopas B. 2008. Firmness and light reflectance properties of dragon fruits. In: **Proceeding of the 9th National Conference of Thai Society of Agricultural Engineering on Technology for Sustainable Agriculture and Agro-industry**, Chiangmai, Thailand.
- Wanitchang, J., Terdwongworakul, A., Wanitchang, P., and Noypitak, S. 2010. Maturity sorting index of dragon fruit: *Hylocereus polyrhizus*. **Journal of Food Engineering**. 100: 409-416p.
- Xing, J., Bravo, C., Jancsó, P.T., Ramon, H. and De Baerdemaeker, J., 2005a. Detecting bruises on ‘Golden Delicious’ apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. **Biosystems Engineering**. 90 (1): 27–36p.
- Xing, J., Linden, V.V., Vanzeebroeck, M. and De Baerdemacker, J., 2005. Bruise detection on Jonagold apples by visible and near-infrared spectroscopy. **Food Control**. 16: 357–361p.



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลลักษณะปริมาตรของตะกร้าแบบทรงปรัามิด (Trapezoidal)

ลำดับที่	พื้นที่ปากตะกร้า (เมตร)	พื้นที่ก้นตะกร้า (เมตร)	ความสูงตะกร้า (เมตร)	ปริมาตรตะกร้า (เมตร ³)
1	0.166	0.138	0.320	0.048
2	0.171	0.146	0.310	0.049
3	0.166	0.134	0.320	0.048
4	0.166	0.138	0.320	0.047
5	0.171	0.142	0.310	0.048
6	0.171	0.146	0.310	0.049
7	0.171	0.146	0.310	0.049
8	0.166	0.138	0.320	0.048
9	0.171	0.146	0.310	0.049
10	0.166	0.138	0.320	0.048
11	0.171	0.146	0.310	0.048
12	0.166	0.138	0.320	0.048
13	0.171	0.146	0.310	0.049
14	0.171	0.146	0.310	0.048
15	0.166	0.138	0.320	0.049
16	0.166	0.138	0.320	0.049
17	0.171	0.146	0.310	0.048
18	0.166	0.138	0.320	0.048
19	0.166	0.138	0.320	0.048
20	0.166	0.138	0.320	0.048
			ค่าเฉลี่ย	0.048

หมายเหตุ ปริมาตรตะกร้าทรงปรัามิด (Trapezoidal), $V=1/2xh (A+A1)$

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลลักษณะปริมาตรของตะกร้าแบบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle)

ลำดับที่	พื้นที่ปากตะกร้า (เมตร)	พื้นที่ก้นตะกร้า (เมตร)	ความสูงตะกร้า (เมตร)	ปริมาตรตะกร้า (เมตร ³)
1	0.520	0.340	0.290	0.051
2	0.521	0.431	0.290	0.065
3	0.522	0.340	0.290	0.051
4	0.521	0.341	0.291	0.051
5	0.521	0.341	0.291	0.051
6	0.521	0.400	0.291	0.060
7	0.171	0.146	0.310	0.049
8	0.520	0.340	0.290	0.051
9	0.520	0.340	0.291	0.051
10	0.520	0.340	0.290	0.051
11	0.520	0.340	0.290	0.051
12	0.521	0.341	0.291	0.051
13	0.520	0.340	0.290	0.051
14	0.521	0.341	0.291	0.051
15	0.520	0.340	0.290	0.051
16	0.520	0.340	0.290	0.051
17	0.520	0.340	0.290	0.051
18	0.520	0.340	0.290	0.051
19	0.520	0.340	0.290	0.051
20	0.520	0.340	0.290	0.051
			ค่าเฉลี่ย	0.053

หมายเหตุ ปริมาตรตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle), $V = L \times W \times H$

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลลักษณะปริมาตรของทรงแบบรถกระบะบรรทุก (Pick-up track bed)

ลำดับที่	ความยาว (เมตร)	ความกว้าง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	ปริมาตรกระบะ(เมตร ³)
1	2.3	1.5	1.5	5.175
2	2.3	1.5	1.6	5.520
3	2.3	1.5	1.7	5.860
4	2.3	1.5	1.5	5.175
5	2.3	1.5	1.65	5.692
6	2.3	1.5	1.55	5.347
7	2.3	1.5	1.6	5.520
8	2.3	1.5	1.7	5.860
9	2.3	1.5	1.8	6.210
10	2.3	1.5	1.65	5.692
11	2.3	1.5	1.65	5.692
12	2.3	1.5	1.5	5.175
13	2.3	1.5	1.7	5.860
14	2.3	1.5	1.8	6.210
15	2.3	1.5	1.6	5.520
16	2.3	1.5	1.6	5.520
17	2.3	1.5	1.6	5.520
18	2.3	1.5	1.7	5.860
19	2.3	1.5	1.7	5.860
20	2.3	1.5	1.8	6.210
ค่าเฉลี่ย				5.673

หมายเหตุ ปริมาตรรถกระบะบรรทุก (Pick-up truck bed), $V = L \times W \times H$

ตารางผนวกที่ ก4 มิติเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD)
และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) และน้ำหนักของผลลำไยพันธุ์อีดอ

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
1	31.24	29.28	25.52	28.58	0.91	12.89
2	31.98	28.36	25.52	28.50	0.89	14.36
3	31.52	27.07	25.52	27.91	0.89	14.36
4	32.32	26.45	25.52	27.94	0.86	13.61
5	28.15	24.32	25.52	25.92	0.92	10.53
6	31.13	26.68	25.52	27.67	0.89	12.81
7	33.93	29.43	25.52	29.43	0.87	15.66
8	34.08	29.29	25.52	29.42	0.86	16.08
9	28.43	26.77	25.52	26.88	0.94	10.50
10	32.01	28.33	25.52	28.50	0.89	13.92
11	32.26	29.35	25.52	28.91	0.90	15.30
12	32.20	28.83	25.52	28.42	0.91	13.18
13	31.35	26.83	26.74	28.23	0.90	13.55
14	33.35	28.54	28.40	30.03	0.90	15.60
15	31.17	27.05	26.60	28.20	0.90	13.82
16	33.62	27.89	27.79	29.20	0.91	13.62
17	34.72	29.45	28.71	30.85	0.89	16.48
18	33.41	30.08	28.06	30.44	0.91	15.30
19	32.52	28.13	27.99	29.47	0.90	15.33
20	35.15	30.69	27.43	30.93	0.88	16.09
21	29.32	27.19	26.97	27.81	0.95	12.31
22	29.63	28.06	25.86	27.81	0.94	12.22
23	32.14	28.25	27.11	29.17	0.90	13.58
24	33.11	30.23	27.04	30.02	0.91	15.42

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
25	33.68	28.68	27.53	29.85	0.89	13.55
26	31.37	27.94	26.31	28.46	0.91	13.37
27	31.70	28.44	27.35	29.11	0.92	13.78
28	36.37	30.65	30.19	32.29	0.89	18.55
29	30.59	28.33	28.05	28.97	0.95	13.99
30	30.72	28.89	27.21	28.90	0.94	13.56
31	31.25	27.23	26.58	28.28	0.90	12.55
32	30.43	25.86	25.79	27.96	0.91	12.86
33	30.62	28.38	26.83	28.57	0.93	12.44
34	28.84	26.27	24.67	26.54	0.92	11.40
35	31.19	27.96	25.88	28.26	0.90	12.13
36	32.78	28.83	28.26	29.89	0.91	15.33
37	29.63	27.84	25.52	27.61	0.93	12.00
38	29.08	26.61	26.14	27.25	0.94	10.22
39	29.92	28.91	26.02	28.23	0.94	11.80
40	30.63	27.42	25.29	27.69	0.90	12.65
41	31.08	28.93	28.12	29.35	0.94	14.02
42	31.84	27.54	26.42	28.51	0.90	13.18
43	32.00	27.06	26.43	28.39	0.89	13.38
44	27.56	26.73	26.62	26.97	0.98	10.49
45	32.04	28.36	28.28	29.51	0.92	14.46
46	38.81	27.59	26.59	30.50	0.79	12.52
47	30.37	26.97	26.77	28.10	0.91	12.48
48	30.59	26.97	26.74	27.98	0.91	13.18
49	32.22	28.51	27.18	29.23	0.90	14.09

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
50	32.13	27.48	27.26	28.93	0.90	13.65
51	32.93	29.42	26.64	29.55	0.90	13.58
52	31.19	27.62	26.75	28.46	0.91	13.00
53	32.23	28.76	27.20	29.32	0.90	14.98
54	31.60	27.06	26.74	28.38	0.90	13.46
55	27.55	25.53	23.74	25.56	0.92	9.68
56	32.60	28.09	27.46	29.30	0.90	15.03
57	30.32	25.38	25.10	26.83	0.88	11.88
58	30.35	27.74	27.39	27.77	0.91	11.83
59	29.14	27.10	26.26	27.47	0.94	11.81
60	32.15	29.96	27.04	29.35	0.91	14.09
61	30.71	28.80	27.13	28.84	0.94	13.28
62	31.03	28.48	26.35	28.56	0.92	12.06
63	31.17	26.60	26.01	27.89	0.89	13.18
64	31.11	28.19	26.97	28.71	0.92	13.61
65	32.07	29.02	28.04	29.72	0.93	14.91
66	29.41	27.06	24.97	27.09	0.92	10.92
67	30.30	22.12	26.53	28.27	0.93	12.78
68	30.38	26.66	25.89	27.58	0.91	11.87
69	32.52	28.12	27.25	29.21	0.90	14.48
70	31.56	29.60	26.97	29.38	0.93	14.20
71	32.91	29.76	27.83	30.09	0.91	14.44
72	30.37	26.97	26.77	28.10	0.91	15.00
73	30.56	26.38	26.53	28.77	0.94	14.37
74	30.73	26.55	26.42	27.83	0.90	12.16

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
75	29.66	26.46	26.18	27.39	0.92	12.06
76	33.66	28.40	27.65	29.65	0.88	15.24
77	28.89	26.96	26.83	27.54	0.95	12.13
78	30.92	26.93	26.27	27.97	0.90	12.38
79	28.39	27.64	25.01	26.97	0.95	10.60
80	30.01	27.02	25.03	27.28	0.91	11.57
81	28.41	25.04	24.91	26.07	0.92	10.66
82	30.13	26.59	26.27	27.61	0.92	12.09
83	31.83	29.37	27.19	29.40	0.92	13.82
84	34.25	30.00	27.96	30.63	0.89	14.82
85	32.59	27.31	27.01	26.04	1.00	13.39
86	29.48	26.38	25.09	26.92	0.91	11.33
87	29.36	26.13	25.60	26.98	0.92	12.28
88	29.47	27.04	26.24	27.55	0.94	11.78
89	34.47	29.61	28.76	30.89	0.89	16.09
90	29.30	25.62	26.88	27.22	0.93	12.43
91	31.34	26.87	26.57	28.18	0.90	12.97
92	32.51	27.40	27.20	28.94	0.89	13.68
93	28.14	26.06	25.50	26.54	0.94	10.47
94	33.19	29.13	27.50	29.85	0.90	14.63
95	29.04	26.74	25.57	27.08	0.93	11.84
96	30.52	28.34	26.50	28.41	0.93	13.71
97	28.74	25.26	25.07	26.22	0.92	10.48
98	31.31	29.08	25.79	28.64	0.91	12.87

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรงกลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
99	30.99	26.32	26.15	27.73	0.89	12.30
100	29.53	26.38	26.15	27.31	0.92	12.21
			เฉลี่ย	28.43±1.63	0.91±0.05	13.22±1.59

ตารางผนวกที่ ก5 มิติเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) และน้ำหนักของผลลำไยพันธุ์เปี้ยวเขียว

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรงกลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
1	28.73	28.35	27.96	28.34	0.99	11.91
2	31.78	28.22	27.64	29.16	0.92	14.27
3	30.65	25.24	25.08	26.87	0.88	11.78
4	29.62	27.31	27.09	27.98	0.95	12.65
5	31.72	28.94	25.66	29.03	0.94	14.16
6	30.06	27.62	27.09	28.29	0.94	12.93
7	29.72	26.77	26.63	27.67	0.93	13.05
8	31.26	29.97	27.55	28.88	0.92	13.84
9	31.16	29.08	28.74	29.32	0.97	11.25
10	29.97	29.97	28.05	28.34	0.95	13.08
11	32.18	31.72	31.25	31.71	0.99	15.24
12	32.00	28.87	27.91	29.25	0.92	14.18
13	32.58	31.53	31.19	31.76	0.98	15.89
14	31.51	28.13	27.87	29.12	0.92	14.37
15	28.153	25.74	25.61	26.59	0.93	11.34

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
16	32.11	29.21	28.82	30.01	0.94	14.83
17	30.36	28.17	27.42	28.46	0.94	14.02
18	29.94	28.45	27.43	28.59	0.96	14.08
19	27.46	27.30	26.01	26.92	0.98	10.08
20	29.31	27.57	25.46	26.37	0.90	10.98
21	31.00	27.15	27.10	28.36	0.92	13.08
22	30.55	27.35	26.53	28.07	0.92	13.15
23	31.53	28.34	26.85	28.84	0.92	14.73
24	28.82	26.58	25.52	26.94	0.94	11.21
25	28.75	25.72	25.60	26.65	0.93	11.19
26	26.66	26.26	25.73	26.21	0.98	10.22
27	27.84	24.04	23.96	25.22	0.91	9.50
28	30.89	27.91	26.67	28.44	0.92	13.30
29	29.35	26.21	25.97	27.13	0.93	11.80
30	28.18	26.25	25.89	26.75	0.95	11.61
31	30.33	27.33	26.80	28.11	0.93	13.14
32	30.98	30.03	29.40	30.13	0.97	14.58
33	31.41	28.01	27.08	28.77	0.92	13.30
34	28.44	26.19	24.99	26.50	0.93	11.08
35	29.51	28.85	28.55	28.97	0.98	12.46
36	30.74	27.68	27.66	28.66	0.93	13.67
37	34.38	30.21	30.01	31.81	0.93	18.42
38	28.06	26.01	25.43	26.48	0.94	10.80
39	28.03	25.34	25.27	26.18	0.93	10.79
40	30.63	30.37	27.73	29.55	0.97	14.91

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
41	29.73	26.32	25.88	28.63	0.97	11.90
42	29.79	27.58	25.84	27.68	0.93	12.44
43	33.26	29.28	27.99	30.10	0.91	15.39
44	29.09	26.91	26.67	27.54	0.95	12.70
45	29.54	28.04	27.69	28.41	0.96	12.98
46	30.24	29.81	28.44	29.49	0.98	12.92
47	28.75	27.89	27.77	28.13	0.98	12.49
48	30.46	29.17	28.63	27.41	0.97	13.19
49	32.90	28.71	28.57	29.99	0.91	15.80
50	30.34	29.39	27.74	29.14	0.96	13.48
51	30.54	28.42	27.41	28.76	0.94	13.71
52	30.82	29.62	29.25	29.89	0.97	13.92
53	29.43	27.04	25.04	27.11	0.92	11.45
54	29.68	29.07	28.63	29.21	0.98	13.66
55	28.87	28.12	26.48	27.81	0.96	11.93
56	30.92	29.98	28.52	29.79	0.96	14.09
57	30.07	26.98	26.61	27.84	0.93	12.53
58	31.31	29.06	27.42	29.22	0.93	14.68
59	28.49	28.17	27.57	28.07	0.98	11.69
60	31.85	31.24	30.56	31.21	0.98	14.54
61	28.82	29.93	27.75	29.15	0.98	13.31
62	28.76	25.67	25.06	27.13	0.94	11.21
63	34.06	30.65	29.60	31.38	0.92	17.71
64	31.46	26.80	26.40	29.16	0.93	14.46
65	30.40	27.88	27.36	28.52	0.94	13.30

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
66	30.48	27.73	27.66	28.59	0.94	11.24
67	32.85	29.92	27.66	30.08	0.92	15.06
68	28.55	26.75	26.06	27.44	0.96	12.26
69	33.40	33.10	30.80	32.41	0.97	16.83
70	29.69	26.82	25.37	27.24	0.92	11.86
71	20.70	27.02	26.11	27.57	0.93	12.10
72	32.40	27.92	27.04	29.03	0.90	14.33
73	31.34	26.69	26.41	28.06	0.90	13.26
74	31.71	28.20	27.25	28.99	0.91	14.56
75	29.38	29.52	27.21	26.98	0.92	10.88
76	30.98	27.77	27.30	28.64	0.92	14.09
77	31.13	28.37	28.02	29.11	0.94	13.89
78	30.92	27.29	26.65	28.23	0.91	13.13
79	29.76	28.56	28.25	28.85	0.97	10.51
80	28.93	28.15	27.60	28.22	0.98	11.96
81	31.20	27.87	26.28	28.73	0.92	13.39
82	29.23	28.51	27.87	28.53	0.98	12.24
83	30.25	28.63	26.88	28.55	0.94	13.54
84	27.51	26.80	25.23	26.50	0.96	11.31
85	29.42	26.91	26.08	27.43	0.93	12.40
86	30.34	26.27	26.19	27.53	0.91	12.44
87	29.63	27.51	26.36	27.80	0.94	11.9
88	30.86	27.89	26.46	28.35	0.92	13.52
89	29.90	26.08	25.79	26.89	0.93	11.69
90	27.09	24.60	23.52	25.03	0.92	9.41

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็น ทรงกลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
91	28.27	26.15	25.26	26.53	0.94	10.85
92	30.75	26.65	26.36	27.85	0.91	13.25
93	31.87	26.96	26.91	28.49	0.89	14.08
94	28.61	26.33	25.18	26.67	0.93	11.42
95	27.95	27.00	26.09	26.89	0.87	10.95
96	30.90	28.06	27.10	28.64	0.93	13.50
97	28.48	27.07	26.39	27.30	0.96	11.45
98	26.68	25.49	25.83	26.90	0.91	11.76
99	30.28	29.40	28.47	29.37	0.97	13.21
100	33.35	29.01	28.76	30.30	0.91	15.72
			เฉลี่ย	28.37 ± 1.40	0.94 ± 0.03	12.95 ± 1.67

ตารางผนวกที่ ก6 มิติเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD)
และความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) และน้ำหนักของผลลำไยพันธุ์สีชมพู

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
1	27.63	26.85	25.00	26.47	0.96	10.86
2	29.16	26.74	26.18	27.33	0.94	11.63
3	30.30	28.64	25.93	28.23	0.94	12.74
4	27.98	24.16	24.01	25.32	0.90	9.45
5	26.95	24.02	23.94	24.93	0.92	9.03
6	28.18	25.45	25.21	26.25	0.93	10.39
7	29.85	27.12	24.51	27.07	0.91	11.77
8	30.18	27.61	25.40	27.66	0.92	11.93
9	28.77	26.78	24.84	26.75	0.93	10.76
10	29.61	27.32	26.73	27.73	0.94	11.33
11	27.13	24.02	23.99	25.00	0.92	9.47
12	29.08	25.77	24.46	26.37	0.91	13.13
13	28.87	26.68	25.59	27.01	0.94	11.48
14	28.57	26.46	25.05	26.65	0.93	11.20
15	29.47	25.95	25.52	26.83	0.91	11.25
16	36.10	31.11	27.97	31.55	0.87	16.53
17	30.19	28.72	25.65	28.12	0.93	12.30
18	26.53	24.20	24.08	24.94	0.94	8.90
19	31.08	27.10	25.87	27.93	0.90	12.28
20	26.66	26.58	24.14	27.77	0.71	9.72
21	30.29	27.64	24.86	27.51	0.91	11.99
22	28.23	25.10	24.72	25.97	0.92	10.17
23	28.85	26.08	24.74	26.50	0.92	10.84
24	28.12	25.37	25.28	26.22	0.93	10.44

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
25	27.82	24.16	24.12	25.31	0.91	10.00
26	29.90	27.43	25.27	27.47	0.92	11.40
27	29.30	26.76	26.06	27.34	0.93	11.61
28	27.92	24.49	24.93	25.74	0.92	10.20
29	28.82	26.24	24.01	26.28	0.91	10.10
30	27.99	24.82	24.14	25.69	0.92	9.95
31	29.75	27.65	25.54	27.23	0.92	11.89
32	29.25	26.47	24.57	29.69	0.91	11.47
33	27.45	25.79	24.92	26.03	0.95	9.94
34	26.26	24.59	24.29	25.03	0.95	8.82
35	29.67	26.94	24.84	27.08	0.94	11.48
36	26.32	24.26	23.68	24.73	0.94	8.88
37	28.43	26.88	24.70	26.63	0.94	10.25
38	26.96	25.58	23.88	25.44	0.94	9.48
39	27.23	25.67	24.03	25.61	0.92	9.21
40	27.56	25.64	24.09	25.72	0.93	10.34
41	28.22	25.54	24.14	25.91	0.92	10.06
42	26.74	25.46	24.61	25.59	0.96	9.99
43	28.24	25.23	24.22	25.81	0.92	10.12
44	26.34	25.36	23.65	25.09	0.95	9.12
45	29.74	25.13	24.44	26.34	0.89	10.61
46	26.41	24.56	24.31	25.08	0.91	9.47
47	23.81	23.63	22.29	23.23	0.98	6.80
48	28.25	25.41	25.36	26.31	0.93	10.38
49	27.95	25.31	25.01	26.06	0.93	10.08

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
50	27.30	23.74	23.52	24.79	0.91	9.17
51	26.87	24.43	24.42	25.21	0.94	9.49
52	28.53	27.24	25.41	27.03	0.95	11.20
53	26.74	24.64	23.52	24.62	0.96	8.57
54	25.30	24.66	23.66	24.53	0.97	8.06
55	27.63	26.64	25.25	26.49	0.96	10.15
56	25.57	24.30	24.15	24.67	0.96	8.58
57	27.41	25.50	24.11	25.64	0.94	9.73
58	25.99	24.06	23.73	25.57	0.95	8.11
59	26.82	24.77	24.41	25.31	0.94	9.58
60	27.47	27.40	25.02	26.60	0.97	10.38
61	25.37	23.87	22.67	23.94	0.94	10.39
62	26.76	24.55	23.56	24.92	0.93	9.08
63	26.73	25.13	25.09	25.64	0.96	10.22
64	28.56	25.74	24.49	26.21	0.92	10.24
65	20.06	25.81	24.06	25.29	0.97	9.13
66	25.93	24.56	23.96	24.80	0.96	8.52
67	30.75	26.96	25.65	27.70	0.90	12.32
68	28.64	25.94	23.54	25.96	0.91	10.02
69	28.58	25.93	24.42	26.25	0.92	10.22
70	30.40	27.73	24.69	27.39	0.90	11.93
71	28.50	26.94	24.92	26.75	0.94	11.02
72	28.72	26.06	25.05	26.57	0.92	11.25
73	29.65	27.77	24.90	27.37	0.92	11.63
74	29.06	25.09	24.47	26.13	0.90	11.11

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
75	27.26	26.00	24.39	25.86	0.95	10.24
76	27.31	25.54	24.47	25.75	0.94	9.89
77	28.93	27.62	25.20	27.21	0.94	11.11
78	28.72	26.86	24.94	26.80	0.93	11.20
79	27.72	26.19	24.27	26.02	0.94	10.00
80	27.85	24.77	24.72	25.74	0.92	10.02
81	27.15	24.42	24.25	24.24	0.93	9.51
82	27.62	26.45	24.55	26.18	0.95	9.85
83	29.63	27.07	25.38	27.30	0.92	11.98
84	29.18	26.44	25.95	27.15	0.93	11.37
85	27.29	23.82	23.52	24.82	0.91	8.85
86	29.80	26.52	26.47	27.55	0.92	12.09
87	26.59	25.68	24.18	25.46	0.96	8.65
88	27.26	26.36	25.74	26.45	0.97	9.78
89	30.99	24.17	25.66	27.79	0.86	12.06
90	29.60	28.26	25.62	27.78	0.94	12.07
91	25.81	23.30	22.95	23.99	0.93	9.36
92	27.77	25.77	25.68	26.30	0.95	10.07
93	26.95	26.01	24.19	25.69	0.95	10.01
94	27.05	25.02	24.39	25.46	0.94	9.91
95	28.65	27.20	26.69	27.50	0.96	10.36
96	26.03	25.20	24.44	25.21	0.97	9.16
97	27.85	27.58	25.97	27.12	0.97	11.22
98	26.35	24.97	23.92	25.06	0.95	8.55
99	27.44	26.50	25.31	26.40	0.96	9.73

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ลำดับที่	มิติ (มิลลิเมตร)			เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (GMD)	ความเป็นทรง กลม (Sp)	น้ำหนัก (กรัม)
	a	b	c			
100	26.93	25.56	24.96	25.80	0.96	9.33
			เฉลี่ย	26.17 ± 1.15	0.94 ± 0.03	10.33 ± 1.36

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ที่วัดได้ของผลลำไย
ทั้งสามสายพันธุ์

ลำดับที่	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เบ๊ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
1	1.09	1.10	1.05
2	1.08	1.09	1.07
3	1.09	1.10	1.14
4	1.12	1.17	1.08
5	1.06	1.03	1.08
6	1.11	1.16	1.08
7	1.07	1.11	1.06
8	1.07	1.12	1.13
9	1.11	1.10	1.08
10	1.10	1.04	1.18
11	1.23	1.15	1.12
12	1.11	1.15	1.06
13	1.10	1.10	1.18
14	1.10	1.14	1.18
15	1.09	1.15	1.18
16	1.10	1.12	1.16
17	1.09	1.13	1.12

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ลำดับที่	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เปี้ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
18	1.09	1.07	1.17
19	1.09	1.08	1.05
20	1.12	1.04	1.14
21	1.09	1.14	1.14
22	1.11	1.17	1.13
23	1.12	1.04	1.18
24	1.09	1.15	1.10
25	1.05	1.16	1.16
26	1.11	1.03	1.08
27	1.09	1.15	1.18
28	1.10	1.14	1.12
29	1.10	1.15	1.13
30	1.10	1.06	1.18
เฉลี่ย	1.10±0.03	1.11±0.04	1.12±0.04

ตารางผนวกที่ ก8 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (Porosity, η) ที่วัดได้ของผลลำไย
ทั้งสามสายพันธุ์

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ความพรุน (Porosity, η)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เปี้ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
1	41.96	49.88	48.94
2	41.89	51.08	48.71
3	42.07	52.49	48.48
4	43.61	51.00	48.54
5	40.60	50.33	50.60
6	42.96	48.31	49.08
7	40.89	48.44	50.06
8	41.16	49.08	49.50
9	43.35	50.49	49.97
10	42.57	48.95	49.85
11	48.84	49.63	49.55
12	43.28	50.40	50.41
13	42.68	48.61	49.48
14	42.41	51.16	50.02
15	41.86	50.39	50.41
16	42.84	51.19	49.70
17	42.04	48.00	49.98
18	41.53	49.95	50.89
19	42.05	49.80	51.24
20	43.91	48.61	48.98
21	42.26	50.45	47.48
22	43.23	46.80	50.00
23	43.59	48.11	50.25
24	42.32	47.49	49.54

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity, η)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เบี้ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
25	40.07	49.56	51.56
26	43.48	49.74	48.86
27	42.29	49.32	50.50
28	42.89	49.55	50.01
29	42.44	49.66	49.87
30	42.84	48.99	49.73
เฉลี่ย	42.59 $\pm$ 1.49	49.58 $\pm$ 1.23	49.74 $\pm$ 0.86

ตารางผนวกที่ ก9 ค่ามุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) ที่วัดได้ของผลลำไย
ทั้งสามสายพันธุ์

ลำดับที่	มุมกองพื้น (Angle of Repose, Θ)					
	พันธุ์อีดอ		พันธุ์เปี้ยวเขียว		พันธุ์สีชมพู	
	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท
1	25.89	34.38	21.74	29.89	14.65	28.61
2	27.24	37.87	17.68	35.13	17.74	28.14
3	26.07	39.64	13.51	31.73	15.33	30.71
4	24.28	36.87	14.34	35.32	15.03	27.12
5	23.40	34.38	14.23	34.13	15.75	32.28
6	22.66	38.66	15.05	37.19	10.76	29.14
7	29.39	32.57	19.40	33.43	16.84	29.92
8	23.02	37.65	14.78	37.31	12.12	28.90
9	21.73	42.36	25.58	36.55	10.61	27.56
10	26.57	45.00	15.75	39.01	10.51	31.38
11	29.18	37.65	19.32	31.59	15.10	28.47
12	22.07	43.21	21.53	36.14	17.04	27.46
13	22.10	35.54	14.82	37.81	17.68	25.97
14	32.62	38.45	14.10	37.55	13.18	30.92
15	26.67	41.42	18.53	37.09	15.61	32.31
16	32.01	39.81	13.48	37.52	15.01	21.46
17	27.47	39.47	17.99	33.62	16.39	25.23
18	28.74	35.84	18.24	36.10	11.45	24.36
19	23.16	38.66	23.59	37.62	15.98	26.26
20	27.77	38.29	15.82	39.30	16.81	20.60
21	30.32	37.41	15.46	38.14	14.82	19.50
22	27.27	38.66	13.15	37.51	10.71	21.85
23	23.45	34.38	14.23	36.48	18.38	31.60

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ลำดับที่	มุมกองพื้น (Angle of Repose, Θ)					
	พันธุ์อีดอ		พันธุ์เปี้ยวเขียว		พันธุ์สีชมพู	
	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท	แบบบรรจุ	แบบถ่ายเท
24	22.90	39.81	14.71	39.01	15.41	30.09
25	23.17	36.87	17.46	37.56	16.32	33.75
26	27.83	34.08	17.96	34.15	14.94	33.32
27	29.94	38.00	20.95	33.17	13.66	34.24
28	22.10	38.45	15.23	33.75	13.65	25.18
29	28.26	39.47	14.23	34.01	12.89	25.41
30	26.75	37.87	13.72	33.43	16.69	28.38
เฉลี่ย	26.13 $\pm$ 3.15	38.09 $\pm$ 2.75	16.89 $\pm$ 3.26	35.71 $\pm$ 2.42	14.70 $\pm$ 2.28	28.01 $\pm$ 3.89

ตารางผนวกที่ ก10 ค่าความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD)
ของผลลำไยทั้งสามพันธุ์

ลำดับ ที่	ความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD)								
	ทรงปิรามิด			ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า			ทรงแบบรถกระบะบรรจุทุก		
	อีคอ	เปี้ยวเขียว	สีชมพู	อีคอ	เปี้ยวเขียว	สีชมพู	อีคอ	เปี้ยวเขียว	สี ชมพู
1	0.38	0.32	0.37	0.36	0.36	0.36	0.53	0.42	0.42
2	0.37	0.33	0.38	0.28	0.35	0.35	0.50	0.42	0.42
3	0.38	0.36	0.37	0.36	0.36	0.36	0.47	0.50	0.50
4	0.39	0.37	0.37	0.35	0.36	0.36	0.53	0.44	0.44
5	0.38	0.31	0.38	0.36	0.33	0.33	0.47	0.44	0.44
6	0.37	0.35	0.37	0.35	0.36	0.36	0.50	0.41	0.41
7	0.37	0.36	0.37	0.30	0.40	0.40	0.48	0.45	0.45
8	0.38	0.33	0.37	0.36	0.36	0.36	0.51	0.42	0.42
9	0.37	0.34	0.37	0.36	0.40	0.40	0.50	0.44	0.44
10	0.38	0.33	0.38	0.36	0.36	0.36	0.47	0.44	0.44
11	0.37	0.35	0.37	0.36	0.39	0.39	0.44	0.44	0.44
12	0.38	0.36	0.37	0.36	0.36	0.36	0.48	0.44	0.44
13	0.37	0.37	0.37	0.28	0.36	0.36	0.48	0.46	0.44
14	0.37	0.36	0.38	0.36	0.36	0.36	0.53	0.44	0.44
15	0.38	0.36	0.37	0.36	0.37	0.37	0.47	0.46	0.46
16	0.38	0.36	0.37	0.36	0.36	0.36	0.44	0.43	0.43
17	0.37	0.32	0.37	0.36	0.36	0.36	0.50	0.41	0.41
18	0.37	0.36	0.37	0.36	0.38	0.38	0.50	0.42	0.42
19	0.38	0.34	0.37	0.36	0.38	0.38	0.44	0.42	0.42
20	0.38	0.34	0.37	0.36	0.39	0.39	0.47	0.40	0.40
เฉลี่ย	0.38	0.35	0.38	0.35	0.37	0.35	0.49	0.44	0.44
	±0.00	±0.00	±0.00	±0.03	±0.03	±0.03	±0.0	0.03	±0.0
							3		3

ตารางผนวกที่ ก11 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)
ของผลล้าไยของพื้นรู้ดอบนพื้นต่างๆกัน

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
1	0.45	0.42	0.29	0.27
2	0.40	0.36	0.25	0.29
3	0.38	0.42	0.27	0.34
4	0.38	0.47	0.27	0.31
5	0.40	0.51	0.29	0.32
6	0.45	0.45	0.31	0.34
7	0.34	0.58	0.32	0.32
8	0.42	0.51	0.31	0.29
9	0.47	0.51	0.31	0.31
10	0.31	0.65	0.32	0.32
11	0.36	0.49	0.34	0.34
12	0.40	0.47	0.32	0.31
13	0.45	0.53	0.36	0.36
14	0.40	0.58	0.36	0.32
15	0.36	0.53	0.38	0.32
16	0.38	0.45	0.36	0.29
17	0.36	0.47	0.34	0.27
18	0.38	0.51	0.32	0.29
19	0.34	0.42	0.31	0.32
20	0.38	0.45	0.29	0.31
21	0.40	0.47	0.36	0.32
22	0.34	0.51	0.38	0.31

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
23	0.32	0.47	0.31	0.29
24	0.40	0.49	0.32	0.31
25	0.38	0.47	0.31	0.32
26	0.42	0.45	0.29	0.32
27	0.38	0.42	0.32	0.29
28	0.40	0.42	0.34	0.31
29	0.38	0.45	0.32	0.29
30	0.40	0.42	0.34	0.36
เฉลี่ย	0.39±0.04b	0.48±0.06c	0.32±0.04a	0.31±0.03a

ตารางผนวกที่ ก12 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)
ของผลล้าไยของพันธุ์เบ็ยวเขียวบนพื้นต่างๆกัน

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
1	0.40	0.42	0.36	0.36
2	0.32	0.43	0.31	0.38
3	0.40	0.34	0.34	0.34
4	0.34	0.39	0.40	0.31
5	0.39	0.45	0.35	0.35
6	0.42	0.40	0.37	0.36
7	0.38	0.41	0.36	0.36
8	0.45	0.38	0.37	0.34
9	0.51	0.40	0.34	0.33
10	0.32	0.42	0.38	0.34
11	0.40	0.40	0.35	0.35
12	0.35	0.35	0.36	0.36
13	0.42	0.38	0.32	0.37
14	0.38	0.39	0.35	0.36
15	0.37	0.42	0.36	0.34
16	0.42	0.35	0.41	0.34
17	0.41	0.40	0.32	0.34
18	0.45	0.40	0.35	0.36
19	0.55	0.39	0.32	0.37
20	0.37	0.41	0.33	0.31
21	0.40	0.45	0.34	0.34
22	0.33	0.42	0.34	0.32
23	0.42	0.40	0.35	0.35
24	0.39	0.40	0.33	0.36

ตารางผนวกที่ ก12 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
25	0.42	0.41	0.34	0.30
26	0.48	0.45	0.36	0.33
27	0.37	0.34	0.35	0.35
28	0.28	0.36	0.34	0.34
29	0.36	0.40	0.33	0.34
30	0.41	0.43	0.36	0.30
เฉลี่ย	$0.39 \pm 0.06b$	$0.40 \pm 0.03b$	$0.35 \pm 0.02a$	$0.35 \pm 0.02a$

ตารางผนวกที่ ก13 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)
ของผลล้าไยของพันธุ์สีชมพูบนพื้นต่างๆกัน

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
1	0.25	0.49	0.27	0.28
2	0.30	0.46	0.24	0.30
3	0.30	0.49	0.31	0.32
4	0.38	0.42	0.31	0.33
5	0.30	0.48	0.29	0.32
6	0.38	0.51	0.30	0.29
7	0.33	0.31	0.23	0.29
8	0.30	0.42	0.25	0.24
9	0.35	0.36	0.27	0.30
10	0.38	0.41	0.23	0.27
11	0.34	0.48	0.23	0.32
12	0.32	0.49	0.25	0.32
13	0.28	0.49	0.28	0.32
14	0.32	0.50	0.23	0.31
15	0.32	0.47	0.25	0.32
16	0.27	0.49	0.26	0.34
17	0.33	0.50	0.23	0.33
18	0.30	0.46	0.24	0.32
19	0.38	0.47	0.29	0.28
20	0.32	0.36	0.27	0.29
21	0.26	0.47	0.25	0.30
22	0.32	0.43	0.25	0.32
23	0.32	0.45	0.30	0.34
24	0.32	0.46	0.27	0.31

ตารางผนวกที่ ก13 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ)			
	แผ่นไม้อัด	แผ่นเหล็ก	แผ่นสแตนเลส	แผ่นพลาสติก
25	0.34	0.51	0.24	0.32
26	0.48	0.51	0.25	0.32
27	0.33	0.26	0.26	0.36
28	0.32	0.39	0.27	0.31
29	0.36	0.45	0.27	0.31
30	0.34	0.47	0.26	0.32
เฉลี่ย	$0.33 \pm 0.04b$	$0.45 \pm 0.06c$	$0.26 \pm 0.02a$	$0.31 \pm 0.03b$

ตารางผนวกที่ ก14 ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ที่วัดได้ของผลลำไยทั้งสามสายพันธุ์

ลำดับที่	ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness, N/mm)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เป็ยเขียว	พันธุ์สีชมพู
1	3.87	4.37	4.37
2	6.69	4.43	4.08
3	6.04	5.30	6.02
4	6.52	5.22	5.28
5	5.28	6.73	4.61
6	8.52	5.09	4.77
7	4.49	5.21	4.58
8	6.45	6.20	5.48
9	4.89	4.80	6.73
10	3.11	4.92	6.57
11	6.06	4.55	5.79
12	5.37	6.50	5.30
13	4.65	5.24	3.93

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness, N/mm)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เปี้ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
14	4.29	3.89	4.46
15	5.11	5.07	6.01
16	4.40	4.97	4.89
17	4.55	4.37	5.56
18	4.21	4.18	5.25
19	6.87	5.17	4.40
20	4.86	4.62	4.46
21	5.15	4.28	5.51
22	4.65	5.60	4.52
23	5.63	8.11	4.88
24	5.32	5.70	4.61
25	5.22	4.34	4.38
26	4.93	5.38	5.38
27	3.76	4.21	7.44
28	4.01	6.00	5.47
29	4.81	5.03	4.42
30	4.17	7.67	4.67
31	4.98	5.97	5.81
32	6.13	4.09	4.24
33	4.88	5.46	4.85
34	5.16	7.61	6.48
35	4.92	4.32	8.10
36	6.21	3.80	4.83
37	5.13	4.69	5.66
38	4.47	4.77	5.18

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

ลำดับที่	ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness, N/mm)		
	พันธุ์อีดอ	พันธุ์เปี้ยวเขียว	พันธุ์สีชมพู
39	8.33	4.10	4.05
40	3.15	5.79	4.49
41	6.18	4.32	3.35
42	6.90	5.36	7.03
43	6.37	4.70	5.63
44	6.28	4.27	4.14
45	5.22	4.56	4.83
46	4.67	3.98	4.22
47	5.31	5.72	4.57
48	6.36	5.23	6.38
49	7.37	6.90	4.45
50	7.19	5.19	4.88
เฉลี่ย	5.09 ± 0.93	5.09 ± 0.93	5.14 ± 0.95

ตารางผนวกที่ ก15 ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์คอ (อีคอ) ในบรรจุภัณฑ์
แบบที่ 1 และ แบบที่ 2

สถานที่	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายเชิงกล (Mechanical Damage (%))*						
	ผลร่วง	ผลแตก	ผลยุบ	ผลชำรุด	ผลทะลุ	ผลดำ	ผลเน่า
ตลาดไท	15.92	0.25	1.89	0.20	0.20	0.40	0.17
	11.06	0.05	0.90	0.10	0.10	0.20	0.00
	10.00	2.62	0.71	0.05	0.05	0.00	0.14
ตลาดสี่ มุมเมือง	13.90	0.15	0.10	1.47	0.00	2.68	0.30
	14.18	0.20	0.00	0.00	0.00	1.64	0.15
	10.76	0.05	0.10	1.12	0.00	1.07	0.10
เฉลี่ย	12.64±2.5	0.55±0.7	0.62±0.3	0.49±0.4	0.06±0.0	1.01±0.51	0.13±0.1
	3	5	5	2	4		1

Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))x100

ตารางผนวกที่ ก16 ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์เปี้ยวเขียว ในบรรจุภัณฑ์
แบบที่ 1 และ แบบที่ 2

สถานที่	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายเชิงกล (Mechanical Damage (%))*						
	ผลร่วง	ผลแตก	ผลยุบ	ผลชำรุด	ผลทะลุ	ผลดำ	ผลเน่า
ตลาดไท	0.03	0.00	0.04	0.83	1.12	0.00	0.00
	0.03	0.25	0.06	0.05	0.16	0.17	0.00
	0.03	0.09	0.08	0.09	0.98	0.00	0.08
ตลาดสี่มุม เมือง	0.05	0.02	0.0	0.89	1.15	0.05	0.02
	0.05	0.14	0.08	0.86	1.18	0.14	0.05
	0.04	0.05	0.00	0.91	1.20	0.05	0.08
เฉลี่ย	0.04±0.01	0.09±0.0	0.04±0.0	0.61±0.42	0.97±0.4	0.06±0.0	0.04±0.0
		9	4		0	8	4

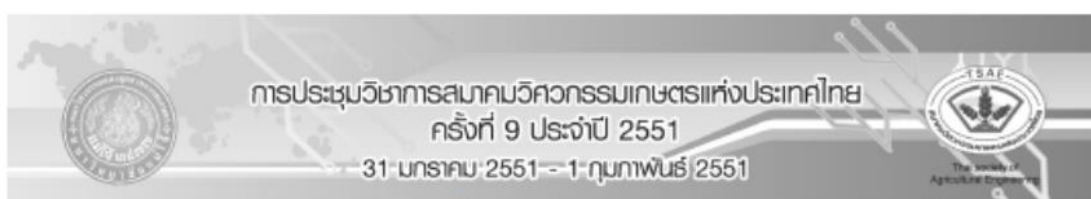
Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))x100

ตารางผนวกที่ ก17 ค่าความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของพันธุ์สีชมพูในบรรจุภัณฑ์
แบบที่ 1 และ แบบที่ 2

สถานที่	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายเชิงกล (Mechanical Damage (%))*						
	ผลร่วง	ผลแตก	ผลยุบ	ผลชำรุด	ผลทะลุ	ผลดำ	ผลเน่า
ตลาดไท	0.05	0.52	0.00	1.33	3.77	0.22	0.17
	0.05	0.25	0.22	0.83	3.19	0.26	0.00
	1.01	0.59	0.29	1.29	3.11	0.31	0.09
ตลาดสี่ มุมเมือง	0.04	0.51	0.08	1.07	2.89	1.03	0.15
	0.06	0.65	0.23	1.10	2.98	0.56	0.07
	0.06	0.39	0.21	1.34	3.19	0.31	0.09
เฉลี่ย	0.21±0.40	0.49±0.1	0.17±0.1	1.16±0.2	3.19±0.3	0.05±0.4	0.11±0.0
		4	1	0	1	1	7

Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))x100





ความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติทางกายภาพบางประการของผลลำไย Postharvest Damage and Some Physical Properties of Fresh Longan

ธีรพงศ์ ผลโพธิ์¹ บัณฑิต จริโมภาส² ปานมนัส ศิริสมบุญ³
Teerapong Polphoe¹ Bundit Jarimopas² Panmanus Sirisomboon³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะหาความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติทางกายภาพบางประการของผลลำไยสด วิธีการศึกษาประกอบด้วย การสุ่มซื้อผลลำไยจากบรรจุภัณฑ์ขนส่ง ณ ตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศ ได้แก่ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท วิเคราะห์หาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวทั้งชนิดและปริมาณ การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ มิติ ความกลม ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นการบรรจุ มุมกอง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความพรุน ผลปรากฏว่า ความเสียหายเชิงกลของผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ ประกอบด้วย ผลร่วง ผลแตก ผลเปลี่ยนรูป ช้ำ แทะทะลุ เน่า และค้ำเนื่องจากถูกรบกวนด้วยก้นรถบรรทุกมากเกินไป ความเสียหายมากที่สุด $\approx 18.6-19.0\%$ เกิดกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำรถบรรทุกขนส่ง ภาชนะบนสุด ความเสียหายส่วนใหญ่เป็นผลร่วง ผลลำไยขนาด เล็ก กลาง ใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 27.2-29.5 มม, 29.5-34.3 มม และโตกว่า 34.3 มม ตามลำดับ ความกลม = 0.91 ความหนาแน่นของการบรรจุสำหรับภาชนะบรรจุแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้า และกะบะรูปคอก-อ๊อฟ เท่ากับ 0.375, 0.346 และ 0.486 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะ = 1.097 มุมกอง = 26 องศา สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผิวสัมผัสไม้ อด เหล็ก สแตนเลส และพลาสติก เป็น 0.39, 0.478, 0.321 และ 0.312 ตามลำดับ ความพรุน = 42.6%

คำสำคัญ : หลังการเก็บเกี่ยว, ความเสียหาย, ลำไย, สมบัติทางกายภาพ

ABSTRACT

This research was to determine the postharvest damage and some physical properties of fresh longan. Methodology comprised sampling of fresh longan packaged in distribution packaging at the two big open markets of Thailand (Tai and Sri Moommeng). The damage of packaged longan was analyzed. Physical properties of dimension, sphericity, specific gravity, packing density, angle of repose, porosity and coefficient of friction were determined.

Results showed that the postharvest damage of packaged fresh longan included drop, crack, deformed, bruise, punctures, black due to sulfur treatment and decay. The maximum damage ranging from 18.6-19.0% happened at the top container of the rearside of the truck. Majority of the damage was attributed by drop. The large, medium, small longan was designated by the diameter of 27.2-29.5 mm, 29.5-34.3 mm, and greater than 34.3 mm, respectively. Sphericity, specific gravity, angle of repose and porosity were 0.91, 1.097, 26 degree, 42.6% respectively. Packing density for the trapezoidal, rectangular and truck bed packaging was 0.375, 0.346 and 0.486 respectively. Static coefficient of friction on various contacting surfaces (e.g. plywood, steel, stainless steel, plastic) was 0.39, 0.478, 0.321 and 0.312 respectively.

KEYWORDS : Postharvest, damage, longan, physical property

¹ โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และเป็นผลไม้ที่ทางรัฐบาลโดยกรมวิชาการเกษตรได้จัดให้อยู่ในกลุ่มสินค้าส่งออก ซึ่งปฏิบัติกันหลายรูปแบบ กล่าวคือ ผลสด ผลแห้ง ผลแช่แข็ง และบรรจุกระป๋อง ในปี พ.ศ.2548 มีพื้นที่เพาะปลูกลำไยทั่วประเทศจำนวน 979,000 ไร่ เป็นพื้นที่ที่ให้ผลจำนวน 821,000 ไร่ ได้ผลผลิตจำนวน 712,000 ตัน ในปีเดียวกันมีการส่งออกลำไยสดและแช่แข็งจำนวน 134,433 ตัน มูลค่า 2,198.03 ล้านบาท ลำไยอบแห้ง จำนวน 94,774 ตัน มีมูลค่าการส่งออก 2,350.85 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) พันธุ์ที่นิยมปลูกคือ คอ ขมพู เบี้ยวเขียว และแห้ว ผลผลิตลำไยที่บริโภคภายในประเทศมีเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือส่งออกต่างประเทศในรูปผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูป (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยเกิดในระหว่างกระบวนการบรรจุ การลำเลียง และการขนส่ง จากสวนไปยังตลาด ความเสียหายของลำไยในบรรจุภัณฑ์มีประมาณ 9.6%-14.8% (Jarimopas, 1985) ความเสียหายของผลไม้ทำให้เพิ่มต้นทุนการผลิต และลดรายได้ Mohsenin (1996) บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้คือเชิงและตะกร้าพลาสติก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ลำไยเสมอ เนื่องจากการกระทบกระเทือนในการขนส่ง เพราะเปลือกของผลลำไยมีความแข็งแรงน้อย ดังนั้นหากมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของลำไยก็จะช่วยลดความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลลำไยได้ ซึ่งปัจจุบันความรู้ยังไม่มี งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติทางกายภาพของผลลำไย

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

ผลลำไยพันธุ์คอกถูกใช้ในการศึกษาโดยการสุ่มซื้อผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ขนส่ง จากตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศ ได้แก่ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท ตลาดละ 3 ตะกร้าละ 20 กิโลกรัม, เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น CD-8"CS ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร, เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ OHAUS รุ่น ARC 120 วัดน้ำหนักสูงสุดได้ 3,100 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม, เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ UWE รุ่น AFN TC 6101 วัดน้ำหนักสูงสุดได้ 6,000 กรัม, กระบอกตวงขนาด 150 ซี.ซี, กล้องพลาสติกตวงขนาด 7500 ซี.ซี, กระบอกตวงขนาด 50 ซี.ซี, แผ่นไม้กระดานขนาด 30x21x0.82 และขนาด 57x45x1.5 ตารางเซนติเมตร

วิธีการทดลอง

1. หาค่าปริมาตรและน้ำหนักของตะกร้าเปล่าในการบรรจุ ทั้ง 3 แบบ ดังนี้คือ 1) ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็กหรือทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal) 2) ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) และ 3) ปริมาตรกระบะรถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up truck bed) ซึ่งทั้ง 3 แบบสามารถคำนวณหาค่าปริมาตรจากสูตรดังนี้ (ปามมนัส และคณะ, 2538)

$$\text{แบบที่ 1. Trapezoidal} \quad V = 1/2 \cdot h \cdot (A + A1) \quad (1)$$

$$\text{แบบที่ 2. Rectangle} \quad V = L \cdot W \cdot H \quad (2)$$

$$\text{แบบที่ 3. Pick-up truck bed} \quad V = L \cdot W \cdot H \quad (3)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของตะกร้า (m^3)

h = ความสูงระหว่างพื้นที่ A กับ $A1$ (m)

A = พื้นที่ปากตะกร้า (m^2)

$A1$ = พื้นที่ก้นตะกร้า (m^2)

L = ความยาวของตะกร้า (m)

W = ความกว้างของตะกร้า (m)

H = ความลึกของตะกร้า (m)

2. สุ่มซื้อผลลำไยจากบรรจุภัณฑ์ขนส่ง จากตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศได้แก่ตลาดสี่มุมเมืองและตลาดไท โดยเลือกภาชนะชั้นบนสุด กลาง และล่างที่อยู่ท่ารถบรรทุกของแต่ละตลาดๆจำนวน 3 ตะกร้า นำมาหาค่าความสูญเสียภายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกล ในการเลือกสุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่1 และ2 แล้วบันทึกผล

3.ทดสอบหาสมบัติกายภาพ ได้แก่ มิติ ความกลม ความอ้วนจำเพาะ ความหนาแน่นการบรรจุรวมกองพื้น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความพรุนของผลลำไยดังต่อไปนี้

3.1 หาค่ามิติ (Dimension) ของลำไยสามารถกำหนดขนาดจากเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุด (a) เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a (b) และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a และ b (c) นำมาคำนวณจากสูตร (ปานมนัส และคณะ, 2538) โดยในการหาค่านี้ใช้ลำไยจำนวน 30 ผล แล้วบันทึกผล

$$\text{Geometer Mean Diameter, GMD} = (abc)^{1/3} \quad (4)$$

เมื่อ a = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุด
b = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a
c = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ a และ b

3.2 หาค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) เป็นการบ่งบอกความเป็นทรงกลมของลำไย โดยทำการวัดขนาดตามข้อ 3.1 จำนวน 30 ผลในการหาค่าแล้วบันทึกผล และสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Sp = ((a*b*c)^{1/3})/a \quad (5)$$

(a,b,c ไม่จำเป็นต้องตัดกันที่จุดเดียวกัน)

3.3 ความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) ที่ใช้ในการขนส่งผลลำไยนั้นก็คือ ปริมาตรของลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมดต่อปริมาตรของภาชนะ หรือคำนวณได้จากสูตร (บัณฑิต, 2545)

$$PD = V_l / V_c \quad (6)$$

เมื่อ V_l = ปริมาตรของลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมด (cm³)
 V_c = ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุลำไย (cm³)

3.4 หาค่าความอ้วนจำเพาะ (Specific Gravity, SG) โดยหาได้จากค่าความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย ผลลำไยต่อความหนาแน่นของน้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ผล แล้วบันทึกผลและสามารถคำนวณได้จากสูตร(ปานมนัส และคณะ, 2538)

$$SG = \rho_l / \rho_w \quad (7)$$

เมื่อ ρ_l = ความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย
 ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

3.5 หามุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) มุมกองพื้นของวัสดุ หมายถึงมุมที่กองวัสดุทำกับพื้นราบ สามารถหาได้ 2 แบบคือแบบบรรจุ (Filling) และแบบถ่ายเท (Emptying)

3.5.1 แบบบรรจุ (Filling) เป็นแบบที่ทำโดยนำเอาผลลำไยที่จะทำการทดลองบรรจุลงในภาชนะทรงกระบอก (มีปริมาตร176.72 ลูกบาศก์เซนติเมตร) จนเต็มจากนั้นเอาวัดพื้นเรียบลักษณะเป็นแผ่นวงกลมมาวางบนปากภาชนะทรงกระบอกและคว่ำภาชนะทรงกระบอกลงและค่อยๆดึงภาชนะทรงกระบอกขึ้นอย่างช้า ๆ จนลำไยถ่ายเทออกมากองบนแผ่นกลม จากนั้นทำการวัดความสูงของกองลำไยและนำมาคำนวณหาค่ามุมกองพื้น (Amin et al., 2003) น้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผลและสามารถคำนวณได้จากสูตร (ปานมนัส และคณะ, 2538)

$$\theta = \tan^{-1}(h/r) \quad (8)$$

เมื่อ h = ความสูงของกองลำไย (mm)
r = รัศมีของกองลำไย (mm)

3.5.2 แบบถ่ายเท (Emptying) เป็นแบบที่ทำโดยนำลำไยที่จะทำการทดสอบบรรจุลงในกล่องสี่เหลี่ยม (มีปริมาตร 7411.20 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ด้านข้างสามารถเปิดได้จนเต็มจากนั้นทำการดึงแผ่นด้านข้างออก ลำไยจะถ่ายเทออกจากกล่องบางส่วนและจะค้างอยู่ในกล่องบางส่วน จากนั้นทำการวัดความสูงและความกว้างของกองลำไยในกล่อง โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผล และนำมาคำนวณตามสูตร (Ato Bart-Plange et al., 2002)

$$\theta = \tan^{-1}(h/l) \quad (9)$$

เมื่อ h = ความสูงของกองลำไยที่อยู่ในกล่อง (mm)

l = ความกว้างของกองลำไยที่อยู่ในกล่อง (mm)

3.6 หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ความเสียดทานของผิววัสดุมีส่วนสำคัญและเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลเกษตร และอาหาร โดยความเสียดทานที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุที่เคลื่อนที่ หรืออยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อภาชนะที่บรรจุวัสดุในไซโลหรือโรงเก็บเมล็ดพืช แรงที่กระทำดังกล่าวกับผนังนั้น โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผล สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากสูตร (Mohsenin, 1996)

$$\mu = \tan \theta \quad (10)$$

เมื่อ θ = มุมที่อ่านได้จากอุปกรณ์หาค่าความเสียดทานสถิต (องศา)

ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ใช้พื้นผิวสัมผัสในการทดลองเป็นแผ่นวัสดุ 4 ชนิดคือ 1) แผ่นไม้อัด 2) แผ่นเหล็ก 3) แผ่นสแตนเลส และ 4) พลาสติกสีขาว และนำค่าทั้ง 4 ไปวิเคราะห์หาความแปรปรวน โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งของแผ่นผิวสัมผัสแต่ละชนิด

3.7 ความพรุน (Porosity, η) ของผลลำไยเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณช่องว่างที่มีอยู่ในกองผลลำไย สามารถคำนวณได้จากสูตร (Mohsenin, 1996)

$$\eta = (1 - (\rho_B/\rho_I)) \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ η = ความพรุน (%)

ρ_I = ความหนาแน่นเนื้อของผลลำไย

ρ_B = ความหนาแน่นรวมของลำไย

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

ในการสุ่มซื้อผลลำไยจากบรรจุภัณฑ์ขนส่ง พบว่าค่าความสูญเสียภายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกลเฉลี่ยทั้ง 2 ตลาด ซึ่งได้แก่ ผลร่วง (drop) เฉลี่ย $12.637 \pm 2.528\%$, ผลแตก (crack) เฉลี่ย $0.553 \pm 0.753\%$, ผลเปลี่ยนรูป (deformed) เฉลี่ย $0.617 \pm 0.346\%$, ช้ำ (bruise) เฉลี่ย $0.490 \pm 0.422\%$, แทะทะลุ (punctures) เฉลี่ย $0.059 \pm 0.038\%$, เน่า (decompose) เฉลี่ย $0.127 \pm 0.112\%$ และดำ (black) เฉลี่ย $1.007 \pm 0.509\%$ เนื่องจากถูกริมด้วยกัมมะดันมากเกินไป โดยมีน้ำหนักของลำไยเฉลี่ย 20.097 ± 0.212 กิโลกรัมต่อตะกร้า (Fig 1) แสดงความเสียหายประเภทต่าง ๆ ในการเลือกสุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่ 1 และ 2 แล้วบันทึกผล (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความเสียหายเฉลี่ยของลำไยจากแบบตะกร้าแบบที่1และ2

Market - place	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
		drop	crack	deformed	bruise	punctures	black (sulfur)	decompose
ตลาดไท	20.333 ±0.586	12.327 ±3.157	0.973 ±1.430	1.167 ±0.634	0.117 ±0.076	0.117 ±0.076	0.217 ±0.202	0.103 ±0.091
ตลาดสี่มุมเมือง	19.860 ±0.212	12.947 ±1.899	0.133 ±0.076	0.067 ±0.058	0.863 ±0.768	0 0	1.797 ±0.816	0.150 ±0.132
average	20.097 ±0.212	12.637 ±2.528	0.553 ±0.753	0.617 ±0.346	0.490 ±0.422	0.059 ±0.038	1.007 ±0.509	0.127 ±0.112

* Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan(kg) / Total Weight of longan in container(kg))*100



ผลร่วง



ผลแตก



ผลเปลี่ยนรูป



ผลช้ำผล



แทงทะลุ



ผลเน่า



ผลดำ

ภาพที่ 1 แสดงความเสียหายของลำไยประเภทต่าง ๆ

สมบัติทางกายภาพของผลลำไย

1) มิติ หรือขนาดในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) ของผลลำไยได้ค่าเฉลี่ย $GMD = 28.335 \pm 1.626$ และลำไยพันธุ์คือเป็นพันธุ์ที่มีขายมากที่สุดของทั้งสองตลาด ซึ่งมีขายในช่วงเดือนสิงหาคมจนถึงต้นเดือนกันยายนโดยแบ่งเป็น 43 ขนาด คือ 1) AAA, 2) AA และ 3) A (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 Commercial Size Grading of Longan Fruit

Grading	Y-axis*(mm)
Big(AAA)	Greater than 34.32
Medium(AA)	Greater than 29.53 to 34.32
Small (A)	Greater than 27.19 to 29.53

* Normally, diameter measured along Y-axis is the longest compared with the measured along X and Z axis.

2) ความกลมของลำไยหรือความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) ของผลลำไย วัดได้ค่าโดยเฉลี่ย $Sp = 0.91 \pm 0.05$ (ตารางที่ 3), 3) ผลค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ที่วัดได้ของผลลำไยเฉลี่ยมีค่า $SG = 1.10 \pm 0.03$, 4) ผลของความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) ของผลลำไยซึ่งมีภาชนะบรรจุ 3 แบบนั้นโดยแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ย PD (Trapezoidal) = 0.38 ± 0.00 , แบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ย PD (Rectangle) = 0.35 ± 0.03 และแบบที่ 3 มีค่าเฉลี่ย PD (Rectangle) = 0.49 ± 0.03 , 5) ผลค่ามุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) ที่วัดได้ของผลลำไยของทั้ง 2 แบบคือแบบบรรจุ (Filling) = 26.13 ± 3.15 และแบบถ่ายเท (Emptying) = 38.09 ± 2.75 , 6) จากการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ (Coefficient of static friction, μ) ได้ค่าเฉลี่ยของแผ่นไม้ไผ่ มีค่า $\mu = 0.390 \pm 0.04$, ค่าเฉลี่ยของแผ่นเหล็ก $\mu = 0.48 \pm 0.06$, ค่าเฉลี่ยของแผ่นสแตนเลส $\mu = 0.32 \pm 0.04$ และค่าเฉลี่ยของแผ่นพลาสติกสีขาว $\mu = 0.31 \pm 0.03$ เมื่อนำค่าต่าง ๆ มาหาค่าทางนัยสำคัญที่ระดับ 0.05% ซึ่งค่าเฉลี่ยของแผ่นพลาสติกสีขาวและแผ่นสแตนเลสไม่แตกต่างทางนัยสำคัญ ส่วนค่าเฉลี่ยของแผ่นไม้ไผ่และแผ่นเหล็กมีแตกต่างทางนัยสำคัญ (0.05) และค่าเฉลี่ยของแผ่นพลาสติกสีขาวและแผ่นสแตนเลส มีค่าแตกต่างทางนัยสำคัญ (0.05) กับค่าเฉลี่ยแผ่นไม้ไผ่และแผ่นเหล็ก, 7) เปอร์เซ็นต์ความพรุน (Porosity, η) ของผลลำไยมีค่าเฉลี่ย $\eta = 42.59 \pm 1.49$

ตารางที่ 3 Physical properties of longan

Physical Properties	Average±Sd
Geometric Mean Diameter (mm ³)	28.34±1.63
Sphericity	0.91±0.05
Specific Gravity (SG) 1.10±0.03	1.10±0.03
Porosity (I)%	42.59±1.49
Angle of Repose (Degrees)	26.13±3.15
Filling method	
Emptying method	
Packing Density (PD)	
PD(Trapezoidal)	0.38±0.00
PD(Rectangle)	0.35±0.03
PD(Pick-up track bed)	0.49±0.03
Coefficient of static friction (μ) on various surfaces	
Plywood	0.39±0.04b
Steel	0.48±0.06c
Stainless steel	0.32±0.04a
Plastic	0.31±0.03a

ผลจากการศึกษาภาชนะบรรจุลำไยทั้ง 3 แบบ มีค่าปริมาตรและน้ำหนักของตะกร้าดังนี้ แบบที่ 1 ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็กหรือทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดหัวตัด (Trapezoidal) มีปริมาตร 0.0488 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม แบบที่ 2 ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) มีปริมาตร 0.0532 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม และแบบที่ 3 แบบใช้รถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up track bed) ซึ่งมีปริมาตร 5.6753 ลูกบาศก์เมตรและน้ำหนักในการบรรจุทุก 1,500 - 2,000 กิโลกรัม (ภาพที่ 2)



ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็ก



ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รถบรรทุกขนาด 1 ตัน

ภาพที่ 2 แสดงภาชนะบรรจุลำไยทั้ง 3 แบบ

ความเสียหายส่วนใหญ่ของลำไยในบรรจุภัณฑ์เป็นลำไยร่วง ($\cong 12.6\%$) ซึ่งส่งผลให้มูลค่าของลำไยลดลง กระทั่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่พาเอาผลลำไยไปได้มากกว่าลังพลาสติกทั้ง 2 แบบ เพราะมีค่า Packing density สูงกว่า (0.486%) เนื่องจากลำไยเป็น spheroid เหมือนสบู่มาก ดังนั้นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ (Coefficient of static friction) μ ของลำไยมีแนวโน้มเหมือนค่าผลสบู่มาก (Sirisomboon. et al., 2007) คือมีค่า μ เฉลี่ยของแผ่นเหล็ก (Steel) มากกว่า ค่า μ เฉลี่ยของแผ่นไม้อัด (Plywood) มากกว่าค่า μ เฉลี่ยของแผ่นสแตนเลส (Stainless steel) และมากกว่าค่า μ เฉลี่ยของแผ่นพลาสติกสีขาว (Plastic) ตามลำดับ

สรุปผลการทดลอง

ความเสียหายเชิงกลของผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ พบว่าความเสียหายมากที่สุดเกิดกับบรรจุภัณฑ์ทำยวบรทุกขนส่ง ภาชนะบรรจุ ซึ่งภาชนะบรรจุลำไยเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความเสียหายส่วนใหญ่เป็นผลร่วง รองลงมา เป็นผลแตก ผลเปลี่ยนรูปร่าง ผลแตก ผลเปลี่ยนรูป ผลชำรุด ผลถูกแทงทะลุ ผลเน่า และดำ เนื่องจากถูกรวมด้วยกัมมะดันมากเกินไป ตามลำดับ ส่วนสมบัติกายภาพของผลลำไยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผิวสัมผัสของแผ่นสแตนเลส และ พลาสติก มีค่าไม่แตกต่างทางนัยสำคัญ แต่แผ่น ไม้อัด แผ่นเหล็ก มีค่าแตกต่างทางนัยสำคัญ(0.05)

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศโดยความร่วมมือของกรมศุลกากร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวง เกษตรและสหกรณ์ www.oae.go.th/oae_go_th/statIm_Ex.php, 23/03/2550
- บัณฑิต จริโมภาส.2529. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน นครปฐม. น.20-21.
- บัณฑิต จริโมภาส.2529. ความเสียหายของลำไยในการขนส่ง วารสารวิศวกรรมเกษตร มกราคม - มีนาคม 2529.สมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. น.33-38.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2534. วัสดุและอุปกรณ์การขนถ่าย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). ISBN 974-7949-628. น.5
- ปานมนัส ศิริสมบุญและคณะ.2538.สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของข้าวสุก.แผนกค้ำรา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ.น.7,26,41,43,54.
- Mohsenin,N.N. 1996. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishes, New York. 78 p.
- M.N.Amin, M.A.Hossain, K.C.Roy.2003. Effect of moisture physical properties of lentil seeds.(On line). Journal of food engineering, 65(2004) 83-87 p. :<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>.
- Ato.Bart-Ptange, Edward A. Baryeh. 2002. The physical properties of category B cocoa beans.(On line). Journal of food engineering.60 (2003)219-227p. :<http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>.
- P. Sirisomboon, P.Kitchaiya, T. Pholpho and W. Mahuttanyavanitch 2007. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. Biosystems Engineering. 97(2) 201-207 p.

Mechanical Damage of Packaged Fresh Longan

by

Teerapong Pholpho¹ Bundit Jarimopas^{2*} Panmanas Sirisomboon³

¹Post Graduate Education and Research Development Project in Post-harvest Technology,

Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakornpathom, Thailand

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen,

Kasetsart University Kamphaengsaen, Nakornpathom, Thailand

³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand

ABSTRACT

This research was to determine the postharvest damage and some physical properties of packaged fresh longan. Methodology comprised sampling of fresh longan packaged in distribution packaging at three big open markets of Thailand (Tai, Mahanak and See Moommueng). The damage of packaged longan was analyzed. Physical characteristics including dimension, sphericity, packing density of individual intact longan fruit were determined. The longan of 'Dor' variety was slowly compressed by 5 mm diameter spherical plunger mounted to the Universal Testing Machine with the loading rate of 25 mm/min. The related bruise-energy relationship under the quasi-static compression was measured and analyzed.

Results showed that the postharvest damage of packaged fresh longan included drop, crack, deformed, bruise, punctures, black due to sulfur treatment and decay. The average total damage was 20.2% occurred at the top container of the rearside of the truck. Majority of the damage was attributed by drop. The small, medium and large longan was designated by the diameter of 27.2-29.5 mm, 29.5-34.3 mm, and greater than 34.3 mm, respectively. Sphericity was 0.91. Packing density for the trapezoidal and rectangular packaging was 0.38 and 0.35 respectively. Bruise area B_s varies linearly with the compression energy E_c and the absorbed energy E_a . The linear regression equation is $B_s = 0.13 E_c + 8.64$ ($R^2 = 0.87$) and $B_s = 0.22 E_a + 8.27$ ($R^2 = 0.88$). Bruise contact area is a function of contact radius and can quantify bruising damage. Probability of bruise occurrence P is equal to $0.04 E_c + 0.04$ ($R^2 = 0.96$) with the energy threshold causing bruise of about 0.027J.

Keywords: Postharvest, damage, longan, physical characteristics

*Corresponding author: email fengbdj@ku.ac.th or jarimopas@yahoo.com

1. INTRODUCTION

Longan is an important economic fruit of Thailand. Commercial longan is available in the form of fresh longan, dried longan, frozen longan and canned longan. In 2007, Thailand exported fresh and frozen longan at the total amount of 160, 513 tons costing about 78 million USD [1]. The longan varieties widely grown were Dor, Chomphu, Biew Khiew. Longan like other tropical fruit is subjected to mechanical damage due to the processes of packaging, handling, and transportation from the orchard to the market. The mechanical damage caused an increase of production cost and a decrease of income [2]. Several researchers studied the postharvest mechanical damage of tropical fruit.[3],[4] and [5]. The mechanical damage of sweet tamarind pod ranged from 22 to 29% in wholesale packaging and 46 to 57% in retail packaging [4]. [3] Reported that the postharvest damage of packaged rose apple was mainly in the form of bruising and abrasion. The average fruit damage and the average damage percentage of abrasion were higher than that of bruising at both the wholesalers and retailers. The hard rind of mangosteen fruit which was affected by mechanical handling and packaging was occurred on the average of 33% at the consumer level [6]. However, information of postharvest damage of packaged longan in Thailand has never been available. The knowledge of quantitative postharvest damage of fruit will lead to the development of new technique of handling and packaging to assure fruit quality. This research was then aimed to evaluate the mechanical damage of the packaged longan.

2. MATERIALS AND METHOD

1. Determination of postharvest damage of the packaged longan

Methodology consisted of collection of fresh longan in commercial packaging from three big open fruit markets of Thailand (i.e. Tai, See Moommuang at Pathumthanee city, and Mahanak at Bangkok city). Three crates of fresh longan were purchased at random from each market. Related damage including drop, crack, deformed, bruise, punctures, black due to sulfur treatment and decay was inspected and analyzed.

2. Determination of physical characteristics of fresh longan

Uniform, damage-free fresh longan was selected at random for 30 fruits of each size. Each fruit was measured for a, b and c by vernier caliper. The corresponding geometrical mean diameter d (mm) and sphericity s were determined as follows [2]:-

$$d = \sqrt[3]{(a b c)} \quad (1)$$

$$s = \sqrt[3]{(a b c)} / a \quad (2)$$

where a = the longest diameter (mm)

b = the longest diameter along the axis perpendicular to the axis of a (mm)

c = the longest diameter along the axis perpendicular to the axis a and b (mm)

Fresh individual longan fruit of uniform size was filled into two kinds of plastic crates (trapezoidal and rectangular design). Number of the filled-up longan fruit was counted. The a, b and c of each individual fruit were measured. The dimensions of the crates were measured. There were 3 replicates of each design. Packing density of longan PD was calculated as follows [7]:-

$$PD = V_f / V_c \quad (3)$$

$$V_f = \text{fruit volume} = n (\pi \bar{d}^3 / 6) \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$n = \text{total longan fruit in a crate}$$

$$\bar{d} = \text{average d of longan fruit (mm)}$$

$$V_c = \text{volume of crate (mm}^3\text{)}$$

$$\text{For trapezoidal crate } V_c = \frac{1}{2} * h (A + A_1) \quad (4)$$

$$\text{Rectangular crate } V_c = L * W * H \quad (5)$$

$$\text{where } h = \text{the height between area A and } A_1 \text{ (mm)}$$

$$A = \text{the area at the mouth of the crate (mm}^2\text{)}$$

$$A_1 = \text{the area at the bottom of the crate (mm}^2\text{)}$$

$$L = \text{the length of the crate (mm)}$$

$$W = \text{the width of the crate (mm)}$$

$$H = \text{the depth of the crate (mm)}$$

3. Determination of the relationship between bruise area and absorbed energy

Uniform, damage-free longan fruit was slowly compressed by 5 mm spherical plunger mounted to the Texture Analyzer (model TA-HD plus, Stable Micro System, UK). The compression was performed with the loading rate of 25 mm/min [8]. Thirty fruit samples were repeated. The rupture force was observed and the average rupture force $\bar{F}$ was calculated. Eight sets of 100 uniform, damage-free longan fruits were subjected to quasi-static compression. The first set was compressed to the maximum load equal to the average rupture force (or 100% of $\bar{F}$). The remaining seven sets were compressed to the maximum load subsequently to 95, 90, 85, 80, 75, 70 and 65% of $\bar{F}$. The related force-deformation curve was recorded. After the compression, all the loaded fruit was stored at room temperature for the observation of bruise occurring for one week. The relationship between bruise area and compression or absorbed energy was analyzed. The bruise area BA (mm²) was calculated from

$$BA = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (6)$$

$$\text{Where } D = \text{diameter of bruise area (mm)}$$

The determination of compression energy and the absorbed energy from the force-deformation curve was described by Jarimopas [9].

3. RESULTS AND DISCUSSION

1. Mechanical damage of packaged longan

Figure 1. Presented the mechanical damage of packaged longan. The damage included the detached, the cracked, the deformed, the bruised, the punctured, the black by sulfur and the decayed. The greatest and the smallest damage were the detached (12.73%) and the punctured (0.08%) fruit respectively (Table 1.). The bruised fruit were 0.53%.

Table 1. Mechanical damage of fresh longan packaged in plastic crate

Market	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
		detached	cracked	deformed	bruised	punctured	black (sulfur)	decay
Thai	20.33 ±0.59	12.33 ±3.18	0.97 ±1.43	1.17 ±0.63	0.12 ±0.08	0.12 ±0.08	0.21 ±0.20	0.10 ±0.09
See Moommueng	19.86 ±0.21	12.95 ±1.90	0.13 ±0.08	0.07 ±0.06	0.86 ±0.77	0 0	1.80 ±0.82	0.15 ±0.13
Mahanak	20.32 ±0.59	12.91 ±4.36	0.34 ±0.21	0.26 ±0.23	0.60 ±0.50	0.11 ±0.10	0.51 ±0.34	0.03 ±0.03
average	20.17 ±0.27	12.73 ±2.35	0.48 ±0.44	0.50 ±0.59	0.53 ±0.38	0.08 ±0.07	0.84 ±0.84	0.09 ±0.06

* Mechanical Damage (%) = (Quantity of damaged longan (kg) / Total weight of longan in container(kg))*100



a) Detached



b) Cracked



c) Deformed



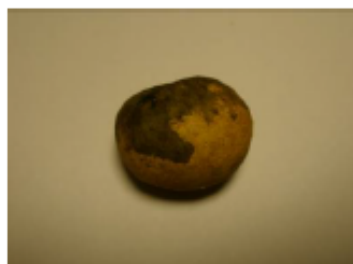
d) Bruised



e) Punctured



f) Decay



g) Black (sulfur)

Figure 1. Mechanical damage of packaged longan

2. Some physical characteristics of fresh longan fruits

The commercial size grading of longan fruit (Table 2.) included three grades based on the maximum diameter, i.e. big (AAA) $a > 34.3$ mm; medium (AA) $29.5 \leq a \leq 34.3$; small (A) $27.2 \leq a < 29.5$. Geometrical mean diameter and sphericity were 28.3 mm and 0.91 respectively (Table 3.). The packing densities for trapezoidal and rectangular crates are 0.38 and 0.35 respectively.

Table 2. Commercial size grading of longan fruit

Grading	a (mm)
Big (AAA)	> 34.32
Medium (AA)	> 29.53 to 34.32
Small (A)	> 27.19 to 29.53

Table 3. Physical characteristics of longan

Physical characteristics	Mean $\pm$ standard deviation
Geometric Mean Diameter (mm)	28.34 ± 1.63
Sphericity	0.91 ± 0.05
Packing Density (PD)	
(Trapezoidal crate)	0.38 ± 1.63
(Rectangular crate)	0.35 ± 0.03

3. Bruise area vs energy beyond threshold

Bruising could be clearly inspected as discoloration on the longan fruit skin corresponding to the loading contact point. The discoloration looked darker brown than the normal skin and was rather circular. Assuming the area of bruising to be circular, the bruised area B_s was found to proportionally vary with the compression energy E_c and the absorbed energy E_a . The related regression equations were:

$$B_s = 0.13 E_c + 8.64 \quad (R^2 = 0.87) \quad (\text{Figure 2.})$$

and $B_s = 0.22 E_a + 8.27 \quad (R^2 = 0.88) \quad (\text{Figure 3.})$

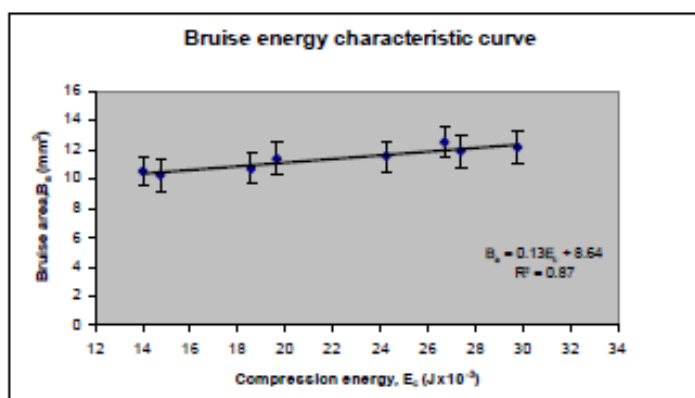


Figure 2. Relationship between bruise area and compression energy of fresh longan under slow compression beyond threshold

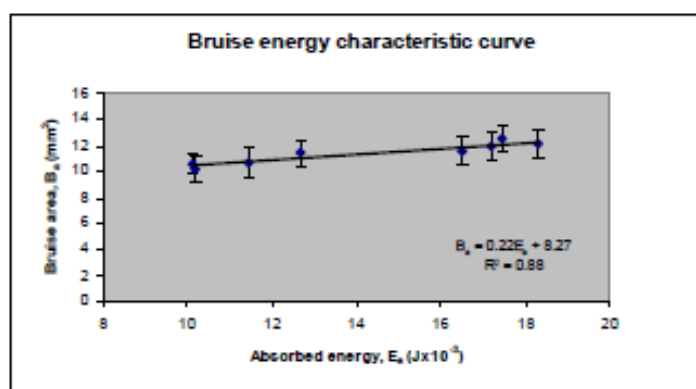


Figure 3. Relationship between bruise area and adsorbed energy of fresh longan under slow compression beyond threshold

4. Bruise area vs compression energy below and at threshold

Figure 4. showed the relationship between the probability of bruise occurrence and compression energy. Too small E_c never bruised longan fruit while too much E_c bruised the fruit. There was a bruise threshold indicating the consistency of bruise occurrence which corresponded to probability of bruise occurrence equal to 1. The energy threshold beyond was about 0.026J. The application of E_c to the energy level below the bruise threshold caused bruising with probability. Figure 4. Presented the linear regression graph between probability of bruise occurrence P and the compression energy E_c , i.e. $P = 0.04E_c + 0.04$ ($R^2 = 0.96$). This fairly complied with the relationship between P and impact energy of cushioned apple reported by [10].

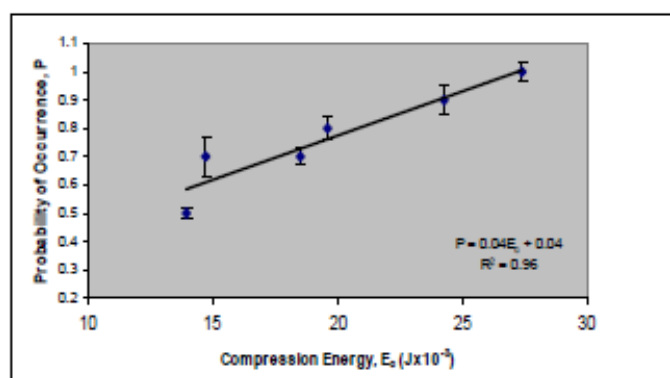


Figure 4. Relationship between probability of bruise occurrence area and compression energy of fresh longan under slow compression before threshold

4. COUCLUSION

This research was conducted to determine the postharvest damage and some physical characteristics of packaged fresh longan fruits. It could be concluded that:

Results showed that the postharvest damage of packaged fresh longan included drop, crack, deformed, bruise, punctures, black due to sulfur treatment and decay. The average total damage was 20.2% occurred at the top container of the rearside of the truck. Majority of the damage was attributed by drop. The small, medium and large longan was designated by the diameter of 27.2-29.5 mm, 29.5-34.3 mm, and greater than 34.3 mm, respectively. Sphericity was 0.91. Packing density for the trapezoidal and rectangular packaging was 0.38 and 0.35 respectively. Bruise area B_b varies linearly with the compression energy E_c and the absorbed energy E_a . The linear regression equation is $B_b = 0.13 E_c + 8.64$ ($R^2 = 0.87$) and $B_b = 0.22 E_a + 8.27$ ($R^2 = 0.88$). Bruise contact area is a function of contact radius and can quantify bruising damage. Probability of bruise occurrence P is equal to $0.04 E_c + 0.04$ ($R^2 = 0.96$) with the energy threshold causing bruise of about 0.027J. The result is useful and necessary for the design of packaging for longan to prevent longan fruit damages.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the Postgraduate Education and Research Development Project in Postharvest Technology, Kasetsart University Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom, Thailand for financial support and Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand for laboratory.

6. REFERENCES

- [1] The Office of Agricultural Economics, Ministry of Agricultural and Cooperatives, [http:// www.oae.go.th/oae_go_th/statlm_Ex.php](http://www.oae.go.th/oae_go_th/statlm_Ex.php), 23/03/2007.
- [2] Mohsenin, N.N. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishes, New York. 1996; 891p.
- [3] Jarimopas, B., Toomsaengtong, S. Singh S. P., Singh, J., Sothornvit, R. Development of wholesale packaging to prevent postharvest damage to rose apples. Journal of Applied Packaging Research. 2007a. 2 (1); 27-44p.
- [4] Jarimopas, B., Rachanukroa, D., Singh, S.P. and Sothornvit, R. Postharvest damage and performance comparison of sweet tamarind packaging. Journal of Food Engineering. 2008a. 88 (2): 193-201p.
- [5] Jarimopas, B., Pushpariksha, P. and Singh, S. P. Postharvest damage of mangosteen and quality grading using mechanical and optical properties as indicators. International Journal of Food Properties. (in press). 2008b.
- [6] Pushpariksha, P. and Jarimopas, B. Mechanical properties of hard rind mangosteen. In Proceedings of the 7th National Conference of Agricultural Engineering, organized by Thai Society of Agricultural Engineering and Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand, 23-24 January. 2006.
- [7] Paleg, K. Produce Handling, Packaging and Distributions AVI Pub. Co. Inc. Connecticut. 1985. 625p.
- [8] ASAE Standard. ASAE. S. 368.2 Compression test of food materials of convex shape. The American Society of Agricultural Engineering. St Joseph, MI. 1998. 472-476p.
- [9] Jarimopas, B. 1984. Failure of Apples Under Dynamic Loading. Unpublished D.Sc. Dissertation. Technion City, Haifa Israel. 1984. 157p.
- [10] Jarimopas, B., Singh, S.P., Sayasoonthorn, S. and Singh, J. Comparison of package cushioning materials to protect postharvest impact damage to apple. Packag. Technol. Sci. 2007b. 20: 315-324p.

The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering
 "International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind",
 Surasammanakhan, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; 1-3 April 2009.

Mechanical Bruising of Fresh Longan Fruit

Teerapong PHOLPHO^{*1}, Bundit JARIMOPAS², Panmanas SIRISOMBOON³,
 Siwalak PATHAVEERAT⁴

Abstract

Fresh Longan is the one of the top two economic crops of Thailand. In the year 2007, Thailand could earn approximately 2,453 million baht from exporting longan, especially to China. Fresh longan is rich of nutritional values and is customarily shipped to markets in container. The packaged longan fruit significantly suffers mechanical bruising due to transport dynamic loading, resulting in costly loss. The information of the mechanism of bruising of fresh longan is still unavailable. Therefore, this research was to determine the mechanical bruising and some related physical properties of fresh longan. Methodology comprised determination of bruising of a longan fruit subjected to impact and slow compression. Physical properties of dimension, sphericity, specific gravity, packing density, angle of repose, porosity and coefficient of friction of an individual intact longan fruit were determined. The longan of 'Dor' variety was impacted by 5 mm spherical plunger mounted to the drop test of varying height (7 - 9.5 cm.). The other fresh longan was slowly compressed by the 5 mm spherical plunger mounted to the Universal Testing Machine at the loading rate of 25 mm/min. Bruise was evaluated as the area of discolored skin under loaded contact. The related bruise-energy relationship under impact and slow compression was measured and statistically analyzed.

Results showed that the large, medium and small longan was designated by the diameter of 27.2-29.5 mm, 29.5-34.3 mm, and greater than 34.3 mm, respectively. Sphericity, specific gravity, angle of repose and porosity were 0.91, 1.097, 26 degree, and 42.6%, respectively. Packing density for the trapezoidal, rectangular and truck bed packaging was 0.375, 0.346 and 0.486, respectively. Static coefficient of friction on various contacting surfaces i.e. plywood, steel, stainless steel and plastic was 0.39, 0.478, 0.321 and 0.312, respectively. Bruise contact area B_a varies linearly as the impact energy E_i . The linear regression equation is $B_a = 99.51 E_i + 11.35$ ($R^2 = 0.97$). Probability of bruise occurrence P is equal to $30.87 E_i - 0.10$ ($R^2 = 0.98$) with the energy threshold causing bruise of 0.034 J. Bruise contact area B_a varies linearly as the compression energy E_c . The linear regression equation is $B_a = 46.11 E_c + 11.61$ ($R^2 = 0.97$). Probability of bruise occurrence P is equal to $34.79 E_c + 0.06$ ($R^2 = 0.96$) with the energy threshold causing bruise of 0.027 J.

[Keywords] mechanical, bruising, longan, physical property

I Introduction

The longan is an important economic fruit of Thailand. In the year 2007, Thailand exported fresh and frozen longan at the total amount of 160, 513 tons costing about 2,453 million baht [OAE, MAC., 2007], especially to China. Longan like other tropical fruit is subjected to mechanical bruising due to the processes of packaging, handling, and transportation from the orchard to the market. The packaged longan fruit significantly suffers mechanical bruising due to transport dynamic loading, resulting in costly loss. The major sources

of bruising are compression and impact forces [Jarimopas, B., et.al. 2007]. The effect of impact forces usually results in bruises, permanent damage and lower perceived quality. Bruising sensitivity has also been reported to increase with storage time [Brown GK., et.al.1993]. Impact damage to apples usually materializes as bruising [Bollen AF., et.al.1999]. Several researches have studied apple bruising, due to impacts [Jarimopas, B.1984, Holt JE. et.al.1997, Bajema RW.et.al.1998, School D. 1980, Chan P. et.al.1991, Ragni L.et.al.2001]. Some researches have found that an

* Corresponding author, Tel.: 089-455-1249; E-mail address: kpteerap@kmitl.ac.th, t_pholpo@yahoo.com

¹ Post Graduate Education and Research Development Project in post-harvest Technology, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, Thailand, 10520

² Professor, Department of Agricultural Engineering, Kamphaengsaen Engineering Faculty, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, Thailand, 73140

³ Assoc. Professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

⁴ Asst. Professor, Department of Agricultural Engineering, Kamphaengsaen Engineering Faculty, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, Thailand, 73140

apple, when exposed to small impacts, exhibits no bruising but that noticeable bruising could be detected beyond a certain amount of impact energy [Jarimopas, B., et.al. 2004, Jarimopas, B.1984]. The threshold of apple bruising has also been studied by some researchers. Bollen et.al (2001) expressed the phenomenon of apple bruise threshold as a curve plotted between the probability of bruising against the drop height or energy. However, information of Mechanical bruising of fresh longan fruit in Thailand has never been available. This research was then aimed to evaluate the mechanical bruising of fresh longan fruit.

II Materials and Method

1. Determination of physical characteristics of fresh longan

Uniform, damage-free fresh longan was selected at random for 30 fruits of each size. Each fruit was measured for a, b and c by vernier caliper. The corresponding geometrical mean diameter (d) (mm) and sphericity (sp) were determined as follows [Mohsenin, 1996]:-

$$d = (a b c)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$sp = (a b c)^{\frac{1}{3}} / a \quad (2)$$

where a = the longest diameter (mm)

b = the longest diameter along the axis perpendicular to the axis of a (mm)

c = the longest diameter along the axis perpendicular to the axis a and b (mm)

Fresh individual longan fruit of uniform size was filled into two kinds of plastic crates (trapezoidal and rectangular design). Number of the filled-up longan fruit was counted. The a, b and c of each individual fruit were measured. The dimensions of the crates were measured. There were 3 replicates of each design. Packing density of longan (PD) was calculated as follows (Paleg.K, 1985):-

$$PD = V_f / V_c \quad (3)$$

where V_f = fruit volume = $n (\pi \bar{d}^3 / 6)$ (mm³)

n = total longan fruit in a crate

$\bar{d}$ = average d of longan fruit (mm)

V_c = volume of crate (mm³)

For trapezoidal crate

$$V_c = \frac{1}{2} * h (A + A_1) \quad (4)$$

Rectangular crate

$$V_c = L * W * H \quad (5)$$

where h = the height between area A and A_1 (mm)

A = the area at the mouth of the crate (mm²)

A_1 = the area at the bottom of the crate (mm²)

L = the length of the crate (mm)

W = the width of the crate (mm)

H = the depth of the crate (mm)

Porosity (η) in % is the parameter indicating the amount of pores in the bulk material. It is calculated (Mohsenin, 1996) from:

$$\eta = (1 - (\rho_B / \rho_1)) * 100 \quad (6)$$

where η = the porosity (%)

ρ_B = the bulk density of longan (g/cm³)

ρ_1 = the solid density of longan (g/cm³)

The thirty samples previously used in dimension measurement was reused in the measurement of specific gravity by means of water displacement technique according to Mohsenin(1996). Instead of water, toluene of the density of 0.845 gm/cc. was used.

Sg = Weight of displaced toluene / weight of a fruit in air (7)

Angle of repose (AR) is the characteristic of the bulk material which indicates the cohesion among the individual units of the material. The higher the cohesion, the higher angle of repose. The angle of repose of longan was measured in two ways, filling method and emptying method. The filling method followed the method used by Amin et al.(2004), but instead of a hollow cylindrical mould of 100 mm. diameter and 150 mm. in height and wooden table, a galvanized steel cylinder 109 mm. in diameter and 107mm.in height and acrylic method followed by Bart-Plange and baryeh(2003). This was done in thirty samples.

Coefficient of static friction (μ) of longan was determined against surfaces of plywood, steel, stainless and plastic. The fruits was placed on the inclined plane with replaceable surface of the friction coefficient measuring device developed by Jarimopas et al.(2004). Two control conditions were four contact surfaces (plywood, steel, stainless and plastic. The static coefficient of friction (μ) was obtained from tangent of the inclination angle (θ) causing the fruit started sliding which was automatically given by the device. Analysis of variance and Duncan Multiple Range Test were thus performed. This was done in thirty samples.

2. Determination of the relationship between bruise-energy under impact and slow compression

Uniform, damage-free longan fruit was slowly compressed by 5 mm spherical plunger mounted to the Texture Analyzer

(model TA-HD plus, Stable Micro System, UK). The compression was performed with the loading rate of 25 mm/min [ASAE, 1998]. Thirty fruit samples were repeated. After the impact and slow compression, all the loaded fruit was stored at room temperature for the observation of bruise occurring for one week. The relationship between bruise area and compression or absorbed energy was analyzed. The bruise area (BA) (mm²) was calculated from:

$$BA = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (8)$$

where D = diameter of bruise area (mm)

The thirty fruit samples in the impact tester. This impact system comprises sectional cylindrical steel rod with a 5 mm. diameter spherical plunger of tip 50g weight and the plunger mounted for the drop test of varying height 7-9.5 cm. After the impact, all the loaded fruit was stored at room temperature ($\approx 27^\circ\text{C}$) for the observation of bruise occurring for one week. The impact energy was calculated from:

$$E = mgh \quad (9)$$

where E = Impact energy (J)

m = mass of impactor (kg)

g = gravity (m/s²)

h = the dropping height (m)

III Result and Discussion

1. Physical characteristics of fresh longan

Table 1 showed the commercial size grading of longan fruit. Table 2 Presented of Physical properties of longan and the exhibited Geometrical mean diameter and sphericity were 28.34 mm and 0.91 respectively. Sphericity, specific gravity, angle of repose and porosity were 0.91, 1.10, 26 degree, and 42.59%, respectively. The angle of repose obtained from emptying method was higher than that from filling method and was 38.08, 26.13, respectively. Static coefficient of friction on various contacting surfaces i.e. plywood, steel, stainless steel and plastic was 0.39, 0.48, 0.32 and 0.31, respectively. The average μ of longan fruit on stainless steel and plastic surfaces significant lever of 5% based on the DMRT. Packing densities for the trapezoidal and rectangular crates are 0.38 and 0.35 respectively.

Table 1 Commercial size grading of longan fruit

Grading	a (mm)
Large(AAA)	> 34.3
Medium(AA)	> 29.5 to 34.3
Small(A)	> 27.2 to 29.5

Table 2. Physical properties of longan

Physical characteristics	Mean $\pm$ standard deviation
Geometric Mean Diameter (mm)	28.34 $\pm$ 1.63
Sphericity	0.91 $\pm$ 0.05
Specific Gravity (SG)	1.10 $\pm$ 0.03
Porosity (η)%	42.59 $\pm$ 1.49
Angle of Repose (Degrees)	
Filling method	26.13 $\pm$ 3.15
Emptying method	38.09 $\pm$ 2.75
Coefficient of static friction (μ) on various surfaces	
Plywood	0.39 $\pm$ 0.04b
Steel	0.48 $\pm$ 0.06c
Stainless steel	0.32 $\pm$ 0.04a
Plastic	0.31 $\pm$ 0.03a
Packing Density (PD)	
(Trapezoidal crate)	0.38 $\pm$ 1.63
(Rectangular crate)	0.35 $\pm$ 0.03
(Pick-up track bed)	0.49 $\pm$ 0.03

2. Bruise area vs compression energy and impact energy beyond threshold

Bruise was evaluated as the area of discolored skin under loaded contact. The discoloration looked darker brown than the normal skin and was rather circular. Assuming the area of bruising to be circular, the bruised area B_a increased with compression energy (Fig.1) and impact energy (Fig.2) and the rupture parts of the fruit increased gradually until the compression energy and impact energy reached 0.041 J and 0.047 J, respectively, the rupture reached 100% rupture. The related regression equations were: $B_a = 46.11 E_c + 11.07$ ($R^2 = 0.97$) (Fig.1) and $B_a = 99.51 E_i + 11.35$ ($R^2 = 0.97$) (Fig.2).

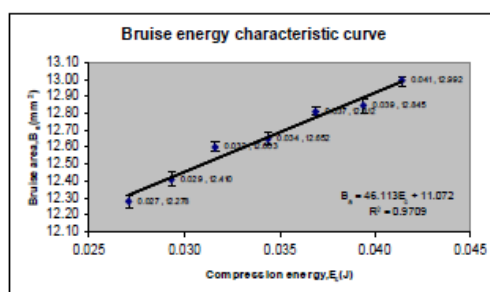


Fig.1 Relationship between bruise area and compression energy of fresh longan under slow compression beyond threshold

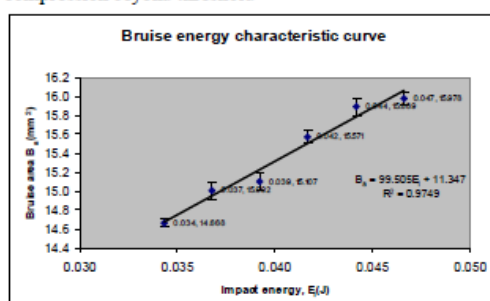


Fig.2 Relationship between bruise area and impact energy of fresh longan under impact beyond threshold

3. Probability of bruise occurrence vs compression and impact energy before threshold

Fig. 3 and 4 showed the relationship between the probability of bruise occurrence vs compression and impact energy, respectively. Too small E_c and E_i never bruised longan fruit. There was a bruise threshold indicating the consistency of bruise occurrence which corresponded to probability of bruise occurrence equal to 1. The application of E_c and E_i to the energy level below the bruise threshold caused bruising with probability. The linear regression

graph between probability of bruise occurrence (P) and compression energy and impact energy varies linearly. The compression E_c and impact energy E_i had the energy threshold causing bruise at 0.027J and 0.034J, respectively. The relationship between P and impact energy of cushioned apple reported by Jarimopas, B., et.al. 2007. The related linear regression equations were: $P = 34.79 E_c + 0.06$ ($R^2 = 0.96$) (Fig. 3) and $P = 30.87 E_i - 0.10$ ($R^2 = 0.98$) (Fig. 4).

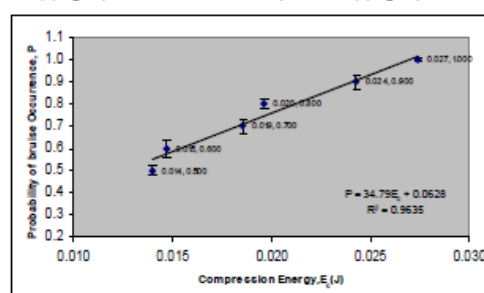


Fig.3 Relationship between probability of bruise occurrence area and compression energy of fresh longan under slow compression before threshold

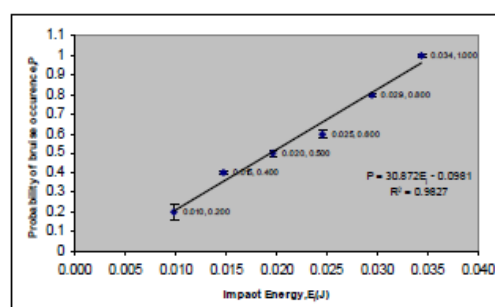


Fig.4 Relationship between probability of bruise occurrence area and impact energy of fresh longan under impact before threshold

IV Conclusion

This research was conducted to determine the mechanical bruising of damage fresh longan fruits. The physical properties included geometric mean meter, sphericity, specific gravity, angle of repose, porosity and static coefficient of friction on ply wood, steel, stainless steel and plastic were reported. Packing density of longan fruits in the trapezoidal, rectangular and truck bed packaging was 0.375, 0.346 and 0.486, respectively. The compression and impact energy threshold causing bruise were 0.027J and 0.034J, respectively. The relationship between compression and impact energy and bruise area, and probability of bruise occurrence area were illustrated.

The knowledge of quantitative mechanical bruising of fresh longan fruits will lead to the development of new technique for protection of bruising to assure of fresh longan fruit quality.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Postgraduate Education and Research Development Project in Postharvest Technology, Kasetsart University Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom, Thailand for financial support and Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand for laboratory.

References

- The Office of Agricultural Economics, Ministry of Agricultural and Cooperatives, Bangkok, Thailand. http://www.oae.go.th/statIm_Ex.php. 23/03/2007.
- Mohsenin, N.N., 1996. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishes, New York. 891p.
- ASAE Standard. 1998. S.368.2. Compression test of food materials of convex shape. The American Society of Agricultural Engineering. St Joseph, MI. 472-476p.
- Bart-Ptange, A. and Baryeh, E. A., 2003. The physical properties of category B cocoa beans. Journal of food Engineering. 60(3). 219-227p.
- Paleg, K. 1985. Produce Handling, Packaging and Distributions AVI Pub. Co. Inc. Connecticut. 625p.
- Brown Gk, Schults NL, Timm EJ, Armstrong PR, Marshall DE. 1993. Reduce apple bruise damage. Journal of Tree Fruit Postharvest. 4(3):6-10 p.
- Jarimopas B., Singh S.P., Sayasoonthorn S. and Jagjit Singh. 2007. Comparison of Package cushioning materials to Protect Post-harvest Impact damage to apple. Packag. Technol. Sci. 20:315-324p.
- Jarimopas B., Mahayosannan T., Srianeek N. 2004. Study of capability of net made of banana string for apple protection against impact. Engineering Journal of Kasetsart. 17(51):9-16p.
- Jarimopas B. 1984. Failure of apple under dynamic loading. Unpublished D.Sc. Dissertation, Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Israel Institute of Technology.
- School D., Holt JE., 1980. Bruise resistance measurements in apples. Journal of Texture Studies: 11(0):389-394p.
- Holt JE., School D. 1997. Bruising and energy dissipation in apples. Journal of Texture Studies: 7(0):421-432p.
- Bajema RW., Hyde Gm. 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. Trans. Ani. Soc. Agri> Eng.; 41(5):1399- 1405 p.
- Chan P., Yazdeni R. 1991. Prediction of apple bruising due to impacting on different surfaces. Trans. Am. Soc. Agri. Eng.: 43(3):956-961p.
- Ragni L., Berandinelli A. 2001. Mechanical behavior of apples and damage sorting and packaging. J. Agri. Eng. Res.: 78(3):273-279 p.

ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติกายภาพของผลลำไยสดพันธุ์ชัมพูและพันธุ์เปี้ยวเขียว
Post-harvest Damage and Physical Properties of Chompoo and Biawkhiaiw variety Fresh Longan

ธีรพงศ์ ผลโพธิ์¹, ศิวลักษณ์ ปรุวิรัตน์² และ ปานมนัส สิริสมบุญ³
 Teerapong Pholpho¹, Siwalak Pathaveerat² and Panmanas Sirisomboon³

Abstract

This research was to determine the post-harvest damage and physical properties of fresh Chompoo and Biawkhiaiw longan. Methodology comprised sampling of fresh longan packaged from two wholesale markets (Talat Thai and Sri Moommeng). Results showed that the postharvest damage of packaged fresh longan included detached, crack, deformed, bruise, puncture, black due to sulfur treatment and decay. The maximum damage of Chompoo and Biawkhiaiw ranging were $\cong 15.32$ - 19.46% , 0.74 - 5.29% , respectively. The damages mostly occurred at the top container placed at the rearside of the truck. Majority of the damage was characteristic by puncture. For Chompoo variety small, medium and large longan were designated by the diameter of 23.23-27.39 mm, 27.39-31.52 mm, and greater than 31.52 mm, respectively, and for Biawkhiaiw variety were 25.03-28.72 mm, 28.72-32.41 mm, and greater than 32.41 mm, respectively. Static coefficients of friction on various contacting surfaces (e.g. plywood, steel, stainless steel and plastic) of Chompoo variety were 0.33, 0.45, 0.26, and 0.31 respectively, and for Biawkhiaiw variety were 0.39, 0.40, 0.35, and 0.35 respectively. Sphericity, specific gravity, porosity, firmness and angle of repose (filling and emptying method) of Chompoo variety were 0.93, 1.12, 49.74%, 5.14 N/mm, 14.70 and 28.01degree respectively, and for Biawkhiaiw variety were 0.94, 1.11, 49.58%, 5.09 N/mm, 16.89 and 35.71degree respectively. Packing density for the trapezoidal, rectangular and truck bed packaging of Chompoo variety were 0.35, 0.37 and 0.47 respectively and for Biawkhiaiw variety were 0.38, 0.35 and 0.44 respectively.

Key word: Postharvest, damage, longan, physical properties

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะหาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติทางกายภาพของผลลำไยสดพันธุ์ชัมพูและพันธุ์เปี้ยวเขียว วิธีการศึกษาประกอบด้วย การสุ่มซื้อผลลำไยจากบรรจุก้นชั้นส่ง ณ ตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศ ได้แก่ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท การวิเคราะห์หาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวทำทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ ค่าความเสียหายมากที่สุดของทั้งสองพันธุ์ $\cong 15.32$ - 19.46% และ $\cong 0.74$ - 5.29% ซึ่งเกิดกับบรรจุก้นชั้นบนสุดที่ทำयरบรทุกชั้นส่ง ความเสียหายส่วนใหญ่เป็นแบบแทงทะลุ สำหรับผลลำไยทั้งสองพันธุ์ขนาด เล็ก กลาง ใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 23.2-27.39 มม., 27.39-31.52 มม. และโตกว่า 31.52 มม. และ 25.03-28.72 มม., 28.72-32.41 มม. และโตกว่า 32.41 มม. ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผิวสัมผัสไม้ขัด เหล็ก สแตนเลส และพลาสติกของทั้งสองพันธุ์เป็น 0.33, 0.45, 0.26 และ 0.31 ตามลำดับและ 0.39, 0.40, 0.35 และ 0.35 ตามลำดับ สำหรับค่าความกลม ความถ่วงจำเพาะ ความพรุน ความแน่นเนื้อ มุมกอง (แบบบรรจุและแบบถ่ายเท) ของทั้งสองพันธุ์เป็น 0.93, 1.12, 49.74%, 5.14 นิวตันต่อมิลลิเมตร, 14.70 และ 28.01 องศา และ 0.94, 1.11, 49.58%, 5.09 นิวตันต่อมิลลิเมตร, 16.89 และ 35.71 องศาตามลำดับ และความหนาแน่นของการบรรจุสำหรับภาชนะบรรจุทั้งสามชนิดของทั้งสองพันธุ์เป็น 0.35, 0.37, 0.47 และเป็น 0.38, 0.35, 0.44 ตามลำดับ

คำสำคัญ หลังการเก็บเกี่ยว, ความเสียหาย, ลำไย, สมบัติทางกายภาพ

¹ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

² Postharvest Technology Innovation Center, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom 73140

³ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakorn pathom 73140

³ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

³ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และเป็นผลไม้ที่ทางรัฐบาลโดยกรมวิชาการเกษตรได้จัดให้อยู่ในกลุ่มสินค้าส่งออก ซึ่งปฏิบัติกันในหลายรูปแบบ กล่าวคือ ผลสด ผลแห้ง ผลแช่แข็ง และบรรจุกระป๋อง ในปี พ.ศ.2548 มีพื้นที่เพาะปลูกลำไยทั่วประเทศจำนวน 979,000ไร่ เป็นพื้นที่ที่ให้ผลจำนวน 821,000ไร่ ได้ผลผลิตจำนวน 712,000ตัน ในปีเดียวกันมีการส่งออกลำไยสดและแช่แข็งจำนวน 134,433 ตัน มูลค่า 2,198.03 ล้านบาท ลำไยอบแห้งจำนวน 94,774 ตัน มีมูลค่าการส่งออก 2,350.85 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) พันธุ์ที่นิยมปลูกคือ ดอ ชมพู เบี้ยวเขียว และแก้ว ผลผลิตลำไยที่บริโภคภายในประเทศมีเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือส่งออกต่างประเทศในรูปแบบผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูป (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของลำไยเกิดในระหว่างกระบวนการบรรจุ การลำเลียง และการขนส่ง จากสวนไปยังตลาด ความเสียหายของลำไยในบรรจุภัณฑ์มีประมาณ 9.6%-14.8% (Jarimopas, 1985) ความเสียหายของผลไม้ทำให้เพิ่มต้นทุนการผลิต และลดรายได้ Mohsenin (1996) บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้คือเชงและตะกร้าพลาสติก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ลำไยเสมอ เนื่องจากการกระทบกระเทือนในการขนส่ง ดังนั้นหากมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของลำไยก็จะช่วยลดความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลลำไยได้ ซึ่งปัจจุบันความรู้เรื่องนี้ยังไม่มี งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติทางกายภาพของผลลำไย

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัสดุและอุปกรณ์

ผลลำไยทั้งสองพันธุ์ถูกใช้ในการศึกษาโดยการสุ่มซื้อผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ขนส่ง จากตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศ ได้แก่ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท ตลาดละ 3 ตระกร้าๆละ 20 กิโลกรัม, เครื่อง Texture Analyzer (UK), เวอร์เนียร์คาลิเปอร์, เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ OHAUS รุ่น ARC 120 และ UWE รุ่น AFN TC, กระบอกตวงขนาด 150 ซี.ซี, กล้องพลาลดิกตวงขนาด 7500 ซี.ซี, กระบอกตวงขนาด 50 ซี.ซี

2. วิธีการทดลอง

1. หาค่าปริมาตรและน้ำหนักของภาชนะในการบรรจุ ทั้ง 3 ชนิด ดังนี้คือ 1) ตะกร้าพลาสติกทรงก้นเล็ก (Trapezoidal) 2) ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) และ 3) รถบรรทุกขนาด 1 ตัน (Pick-up truck bed)

2. สุ่มซื้อผลลำไยจากบรรจุภัณฑ์ขนส่ง จากตลาดผลไม้ใหญ่ของประเทศ ได้แก่ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท โดยเลือกภาชนะชั้นบนสุด กลาง และล่างที่อยู่ท้ายรถบรรทุกของแต่ละตลาดๆจำนวน 3 ตะกร้า นำมาหาค่าความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกล ในการเลือกสุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่ 1 และ 2 แล้วบันทึกผล

3. ทดสอบหาสมบัติกายภาพ ได้แก่

3.1 หาค่ามิติ (Dimension) ของลำไยสามารถกำหนดขนาดจากเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometer Mean Diameter, GMD) โดยในการหาค่านี้ใช้ลำไยจำนวน 30 ผล แล้วบันทึกผล

3.2 หาค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity, Sp) เป็นการบ่งบอกความเป็นทรงกลมของลำไย โดยทำการวัดขนาดจำนวน 30 ผลในการหาค่าแล้วบันทึกผล

3.3 ความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ (Packing Density, PD) ที่ใช้ในการขนส่งผลลำไยนั้นก็คือปริมาตรของลำไยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั้งหมดต่อปริมาตรของภาชนะ

3.4 หาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) โดยหาได้จากค่าความหนาแน่นเนื้อของผลลำไยต่อผลลำไยต่อความหนาแน่นของน้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ผล แล้วบันทึกผล

3.5 มุมกองพื้น (Angle of Repose, AR) มุมกองพื้นของวัสดุ หมายถึงมุมที่กองวัสดุทับกับพื้นราบ สามารถหาได้ 2 แบบคือ 3.5.1) แบบบรรจุ (Filling) เป็นแบบที่ทำโดยนำเอาผลลำไยที่จะทำการทดลองบรรจุลงในภาชนะทรงกระบอกคำนวณหาค่ามุมกองพื้น (Amin et al., 2003) น้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผล 3.5.2) แบบถ่ายเท (Emptying) เป็นแบบที่ทำโดยนำลำไยที่จะทำการทดสอบบรรจุลงในกล่องทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผล

3.6 หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ) ความเสียดทานของวัสดุมีส่วนสำคัญและเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลเกษตร และอาหาร โดยความเสียดทานที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุที่เคลื่อนที่ หรืออยู่ในลักษณะของแรงที่กระทำต่อภาชนะที่บรรจุวัสดุนั้นๆในไซโลหรือโรงเก็บเมล็ดพืช แรงที่กระทำดังกล่าวกับผนังนั้น โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งแล้วบันทึกผล ในการวัดค่านี้จะใช้แผ่นวัสดุ 4 ชนิดคือ 1) แผ่นไม้ขัด 2) แผ่นเหล็ก 3)

แผ่นสแตนเลส และ 4) พลาสติกสีขาว และนำค่าทั้ง 4 ไปวิเคราะห์หาความแปรปรวน โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้งของแผ่นผิวสัมผัสแต่ละชนิด

3.7 ความพรุน (Porosity, η) ของผลลำไยเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณช่องว่างที่มีอยู่ในกองผลลำไย

3.8 ความแน่นเนื้อ (Firmness) ความแน่นเนื้อของผลไม้หาได้จากแรงกระแทกสูงสุดต่อระยะห่างที่กระทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเสียรูปร่างมากที่สุด

ผลการทดลอง

1. ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว

ในการสุ่มซื้อผลลำไยทั้งสองพันธุ์คือพันธุ์สีชมพู และเขียวจากบรรจุก้นชั้นลง พบว่าค่าความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นความเสียหายเชิงกลเฉลี่ยทั้ง 2 ตลาดของทั้งสองพันธุ์ซึ่งได้แก่ ผลแทงทะลุ ข้ำ ผลแตก ร่วง ผลเปลี่ยนรูป ค่า เนื่องจากถูกรุมด้วยก้ามแมลงมากเกินไป และเน่า และความเสียหายประเภทต่างๆแสดงใน Fig.1 การเลือกสุ่มนี้จะใช้ภาชนะบรรจุแบบที่ 1 และ 2 แล้วบันทึกผลลงใน Table 1.

Table 1 Mechanical damage of two variety fresh longan packaged in plastic crate type 1 and type 2

Variety	Market place	Total Weight (kg)	Mechanical Damage (%)*						
			detached	cracked	deformed	bruised	punctured	Black (sulfur)	decay
Chompoo	Talad Thai	20.34	0.37	0.45	0.17	1.15	3.36	0.26	0.09
		±0.90	±0.55	±0.18	±0.15	±0.28	±0.36	±0.05	±0.09
	See	20.32	0.05	0.52	0.17	1.17	3.02	0.63	0.14
	Moommueng	±0.81	±0.01	±0.13	±0.08	±0.15	±0.15	±0.37	±0.06
	Average	20.33	0.21	0.49	0.17	1.16	3.19	0.05	0.11
Biawkhaw		±0.77	±0.40	±0.14	±0.11	±0.20	±0.31	±0.41	±0.07
	Talad Thai	20.92	0.03	0.11	0.03	0.32	0.75	0.06	0.03
		±1.10	±0.00	±0.13	±0.05	±0.44	±0.52	±0.10	±0.05
	See	20.57	0.05	0.07	0.06	0.89	1.18	0.07	0.05
	Moommueng	±0.70	±0.01	±0.06	±0.02	±0.03	±0.03	±0.07	±0.03
	Average	20.75	0.04	0.09	0.04	0.61	0.97	0.06	0.04
		±0.85	±0.01	±0.09	±0.04	±0.42	±0.40	±0.08	±0.04

Mechanical Damage (%) = (No. of damaged longan (kg) / Total Weight of longan in container (kg))*100



a) Detached b) Cracked c) Deformed d) Bruised e) Punctured f) Decay g) Black (sulfur)

Figure 1 Mechanical damage of packaged longan in plastic crate type 1 and type 2

2. สมบัติทางกายภาพของผลลำไย

1) มิติ หรือเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (GMD) พันธุ์สีชมพูและพันธุ์เขียว ซึ่งมีการขายในช่วงเดือนสิงหาคมจนถึงต้นเดือนกันยายนโดยแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ 1) AAA, 2) AA และ 3) A (Table 2)

Table 2 Commercial size grading of two variety longan fruit

Grading	a (mm)	
	Chompoo	Biawkhaw
Large(AAA)	> 31.5	> 32.4
Medium(AA)	> 27.4 to 31.5	> 28.7 to 32.4
Small (A)	> 23.2 to 27.4	> 25.0 to 28.7

2) ความกลมเฉลี่ย (Sp), 3) ค่าความถ่วงจำเพาะ(SG), 4) ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเฉลี่ย (η), 5) ค่ามุมกองพื้นเฉลี่ย (AR) แบบบรรจุ (Filling) และแบบถ่ายเท (Emptying), 6) ค่าความหนาแน่นของภาชนะบรรจุ(PD) มีภาชนะบรรจุ 3 แบบโดยแบบที่ 1(Trapezoidal) แบบที่ 2 (Rectangle) และเฉลี่ยแบบที่ 3 (Rectangle) 7) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (μ) ทั้งสองพันธุ์ เมื่อนำค่าต่างๆมาหาค่าทางนัยสำคัญที่ระดับ 0.05% ซึ่งค่าเฉลี่ยของพันธุ์สีชมพูได้ค่าแผ่นสแตนเลส แผ่นเหล็กมีแตกต่างทางนัยสำคัญ(0.05) ส่วนแผ่นพลาสติกสีขาวและแผ่นไม้ขัดไม้แตกต่างทางนัยสำคัญและค่าแผ่นพลาสติกสีขาวและแผ่นไม้ขัดมีค่า

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(0.05) กับแผ่นเหล็กและแผ่นสแตนเลส ส่วนพันธุ์เขียวเขียวแผ่นสแตนเลสและแผ่นพลาสติกสีขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แผ่นไม้ไผ่และแผ่นเหล็กไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนแผ่นไม้ไผ่และแผ่นเหล็กมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(0.05)กับแผ่นสแตนเลสและแผ่นพลาสติกสีขาว และ 8) ค่าความแน่นเนื้อ (F) ค่าเฉลี่ยทั้งหมดแสดงใน Table 3

Table 3 Physical properties of two variety longan fruit

Physical Properties	Average $\pm$ Sd	
	Chompoo	Biawkhiaw
Geometric Mean Diameter (mm ³)	26.17 $\pm$ 1.15	28.37 $\pm$ 1.40
Sphericity	0.93 $\pm$ 0.02	0.94 $\pm$ 0.03
Specific Gravity (SG)	1.12 $\pm$ 0.04	1.11 $\pm$ 0.04
Porosity (Γ)%	49.74 $\pm$ 0.86	49.58 $\pm$ 1.23
Angle of Repose (Degrees)		
Filling method	14.70 $\pm$ 2.28	16.89 $\pm$ 3.26
Emptying method	28.01 $\pm$ 3.89	35.71 $\pm$ 2.42
Packing Density (PD)		
PD(Trapezoidal)	0.35 $\pm$ 0.00	0.38 $\pm$ 0.00
PD(Rectangle)	0.37 $\pm$ 0.03	0.35 $\pm$ 0.03
PD(Pick-up track bed)	0.44 $\pm$ 0.03	0.44 $\pm$ 0.03
Coefficient of static friction (μ) on various surfaces		
Plywood	0.33 $\pm$ 0.04b	0.39 $\pm$ 0.06b
Steel	0.45 $\pm$ 0.06c	0.40 $\pm$ 0.03b
Stainless steel	0.26 $\pm$ 0.02a	0.35 $\pm$ 0.02a
Plastic	0.31 $\pm$ 0.03b	0.35 $\pm$ 0.02a
Firmness(N/mm)	5.14 $\pm$ 0.95	5.38 $\pm$ 1.77

ผลจากการศึกษาภาชนะบรรจุลำไยทั้ง 3 แบบ มีค่าปริมาตรและน้ำหนักของตะกร้าเปล่าดังนี้ แบบที่ 1 ตะกร้าพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมปริมาตรหัวตัดมีปริมาตร 0.0488m³และน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 kg แบบที่ 2 ตะกร้าทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีปริมาตร 0.0532m³ และน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 kg และแบบที่ 3 แบบใช้ร่อนบรรจุขนาด 1 ตัน ซึ่งมีปริมาตร 5.6753 m³ และน้ำหนักการบรรจุ 1,500 - 2,000 kg

สรุป

ความเสียหายเชิงกลของผลลำไยในบรรจุภัณฑ์ พบว่าความเสียหายมากที่สุดเกิดกับบรรจุภัณฑ์ที่यरอบบรรจุขนส่งภาชนะบนสุด ซึ่งภาชนะบรรจุลำไยเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความเสียหายส่วนใหญ่ของเป็นผลถูกแทงทะลุ (สีชมพู $\geq$ 15.7%, เขียวเขียว $\geq$ 4.67 %,) รองลงมาเป็นผลแตก ผลชำรุด ผลร่วง ผลเปลี่ยนรูปร่าง ผลเน่า และดำ ตามลำดับ ส่วนสมบัติกายภาพของผลลำไยพันธุ์สีชมพูพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผิวสัมผัสของแผ่นไม้ไผ่ และพลาสติกมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่แผ่นสแตนเลส แผ่นเหล็ก มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (0.05) ส่วนพันธุ์เขียวพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผิวสัมผัสของแผ่นไม้ไผ่และแผ่นเหล็กมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (0.05) กับแผ่นสแตนเลส และแผ่นพลาสติกสีขาว

คำขอขอบคุณ

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- บัณฑิต จริโมภาส.2529. ความเสียหายของลำไยในการขนส่ง วารสารวิศวกรรมเกษตร มกราคม - มีนาคม 2529. สมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. น.33-38.
- บัณฑิต จริโมภาส.2529. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน นครปฐม. น.20-21.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2534. วัสดุและอุปกรณ์การขนถ่าย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). ISBN 974-7949-628. น.5
- ปานมนัส ศิริสมบุญและคณะ.2538.สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของข้าวสาลี.แผนกค้ำา.คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ.น.7,26, 41,43,54.
- สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศโดยความร่วมมือของกรมศุลกากรสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ www.oae.go.th/oae.go.th/statim_Ex.php, 23/03/2551
- Mohsenin,N.N. 1996. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishes, New York. 78 p.



Classification of longan fruit bruising using visible spectroscopy

T. Pholpho^a, S. Pathaveerat^b, P. Sirisomboon^{c,*}

^a Post graduate Education and Research Development Project in Post-harvest Technology/Post-harvest Technology Innovation Center, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom, Thailand

^b Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakornpathom, Thailand

^c Agricultural Engineering Curriculum, School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 August 2010

Received in revised form 8 December 2010

Accepted 12 December 2010

Available online 16 December 2010

Keywords:

Longan

Visible range

Spectroscopy

Bruise

Principal Component Analysis (PCA)

Partial Least Square Discriminant Analysis

(PLS-DA)

Soft Independent Modeling of Class Analogy

(SIMCA)

ABSTRACT

This research showed the potential of using visible spectroscopy for classification of non-bruised and bruised longan fruits. The visible spectra of bruised and non-bruised longan fruits were acquired from 400 to 700 nm with 10 nm resolution by the spectrophotometer. The principal component analysis (PCA), Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) and Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) were used to develop classification models. The Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) showed better classification accuracy than SIMCA with 100% correctness. The result was found to be helpful for the application in the industry for on-line and portable application.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Longan fruit (*Dimocarpus longan* Lour.) is native to south-east Asia, spanning from India to southern China. It is an economically important fruit for Thailand. In the year 2009, Thailand exported fresh, dry and frozen longan to the amount of 409,976 tons with a value of ~200 million USD (Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Co-Operatives, 2009). Longan contains a number of important vitamins and minerals, including iron, magnesium, phosphorus and potassium, and large amounts of vitamins A and C. The most popular variety of the fruit is the Edo type. Mature Edo longan fruit is approximately 1.5–2 cm diameter, conical, heart-shaped or spherical in shape and light brown in color (Jiang et al., 2002).

Bruising is the most common type of post harvest mechanical injury. Most post harvest pathogens cannot infect healthy tissue, and typical enter through dead or wounded tissue before contaminating the rest of the fruit and it is likely that minor mechanical injuries were not counted by the market inspectors and were only manifested by their consequent fungal infection, and thus mechanical injury could be the most important cause of defects and disease (Van Zeebroeck et al., 2007). According to the study of Pholpho

et al. (2008), the bruise of longan was 0.5% after transportation in 10 h by 10 wheel trucks and storing in room temperature for 24 h. The longan fruit bruises occur during transportation and storage by the impact and compression forces. The result of Pholpho et al. (2009) indicated that the compression and impact energy threshold causing bruise were 0.027 J and 0.034 J, respectively. It means that at these energy levels or higher the longan fruit will be ruptured. The bruised will be occurred under these energy levels. Detecting bruises on fruits and vegetables is a challenging, but necessary work required to maximize the value of agricultural crops. For Jonagold apples, bruised areas are usually darker than the green color but lighter than the blush color (Leemans et al., 1999). Spectral analysis offers to the traditional methods in food quality analysis (Geoola and Peiper, 1994; Lammertyn et al., 1998). For example, Gao et al. (2003) conducted bruise identification studies on apples with Raman spectroscopy. They stated that the spectroscopic technique should not only be used in laboratory but also be added to the array of on-line inspection devices to insure the accurate sorting of fruits. In addition, Xing et al. (2005a,b) used visible/near infrared spectroscopy for detecting bruises on Jonagold apples. In this case it was possible to separate pale flesh from red flesh (Xing et al., 2007). They used multivariate data analysis techniques to extract the key features associated with bruised fruit from the wide range of wavelengths assessed. Near-infrared (NIR) and visual (VIS) spectroscopy has also been ap-

* Corresponding author. Tel.: +66 2 329 8000x5120; fax: +66 2 329 8336.
E-mail address: kspanman@kmit.ac.th (P. Sirisomboon).

plied to discriminate bruised from non-bruised healthy spots on 'Golden Delicious' apples (Xing et al., 2003). Near-infrared (NIR) spectroscopy has increasingly been adopted as a tool in a number of analytical applications. These spectroscopic methods are commonly used in conjunction with chemometrics methods such as Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) (Abajo et al., 2004; Chen et al., 2005; Sirisomboon et al., 2009), principal component analysis (PCA) (Cozzolino et al., 2003; Sirisomboon et al., 2009) and partial least-squares discriminate analysis (PLSDA) (Andre, 2003; Sirisomboon et al., 2009). These techniques could also be applied to any optical data including VIS wavelength range.

In this study we investigate the potential of using visible spectroscopy for classification of normal and bruised longan fruits using the multivariate methods SIMCA and PLSDA.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Baskets (36.5 × 59 × 30.5 cm for each basket) of fresh longan fruits (*D. longan* Lour. Variety Edo) were bought from a wholesale fruit market in Thailand (Talat Tai at Pathumthani province) and transported to our laboratory at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) for experimental analysis. Before the analysis of the samples, all fruit were manually classified into 2 groups (a group of 300 non-bruised and 100 bruised fruits (Fig. 1)). The average size of the longan fruit was 1.5–2 cm in diameter. Experiments were conducted at room temperature of 27 °C. Fig. 1a shows non-bruised fruit: this was circular fruit with a brown color that had no bruises. Fig. 1b shows bruised fruit: the fruit had discolored skin from contact loads during transportation and storage. The discolored area is characterized by a color which is darker brown than the normal longan skin.

2.2. Spectra acquisition

The visible reflectance spectra, expressed in the percentage reflectance, were collected from individual fruits with spectrophotometer (MiniScan XE Plus 45/0 LAV, Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, USA) from 400 to 700 nm with a resolution of 10 nm using reflectance mode. A D65 illuminant with 10° observer angle was used. Fig. 2 shows the schematic diagram of how the sample was analysed in the spectrophotometer. For each scan, the fruit was placed on the light opener of the spectrometer (no glass); the cylindrical black hollow cylinder (60 mm height × 75 mm in diameter) was used to cover the fruit to protect the interference from outer light. Each fruit was scanned at one position, 300 for the non-bruised, and 100 for the bruised samples. Three scans were performed at each position and the resultant spectra were averaged.

2.3. Spectral data processing

The reflectance spectra of non-bruised fruits were totally of 300 spectra while those of bruised fruits were 100 spectra. The spectra

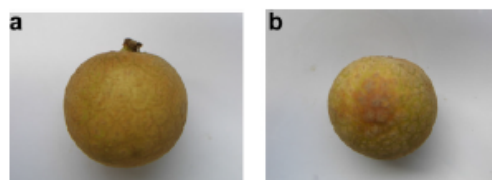


Fig. 1. Longan fruit and damage. (a) Non-bruised fruit (b) bruised fruit.

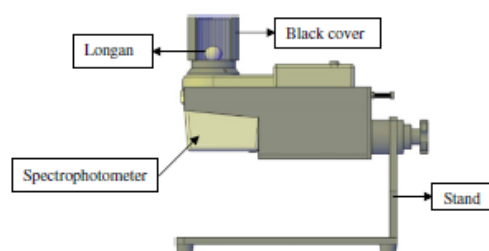


Fig. 2. Schematic diagram of VIS scanning system for longan.

for the bruised and non-bruised fruit were randomly separated into calibration and validation sets. Two hundred and twenty five spectra were assigned to the calibration set, and 75 spectra into the validation set for non-bruised fruits. For the bruised fruit, 75 spectra were assigned to the calibration set and 25 spectra to the validation set.

Principal component analysis (PCA) models were generated using the Unscrambler 9.8 program (Camo ASA, Oslo, Norway) in an effort to classify the bruised and non-bruised fruits into two distinct classes. The full cross validation method was applied to PCA. The PCA model was subsequently applied to the validation to assess the classification ability of the model. The X-loading at each wavelength was calculated to show how well a variable is taken into account by the model components. If a variable has a large positive or negative loading, this means that the variable is important for the component concerned, in this case, bruised and non-bruised longan fruits.

Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) and Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) were also performed using Unscrambler 9.8 (Camo ASA, Oslo, Norway) to develop supervised classification models for the non-bruised and bruised of longan fruit. PLS-DA is the classification method based on modeling the differences between several classes with PLS. If there are only two classes to separate, the PLS model uses one response variable, which codes for class membership as follows: -1 for members of one class, +1 for members of the other one. SIMCA is based on making a PCA model for each class in the training set. Unknown samples are then compared to the class models and assigned to classes according to their analogy to the training samples.

3. Results and discussion

3.1. PCA models

Fig. 3 shows the average reflectance spectra in visible range of non-bruised and bruised fruits at different VIS wavelength. The spectra of both groups of fruits had a similar profile with reflection peaks at 630 nm and 640 nm, respectively. In addition, the highest reflectance was at 700 nm for both groups. The reflections were found to drop at 670 nm and then increase at 700 nm. Reflectance of the bruised fruits was lower than that of non-bruised fruits.

Fig. 4 shows the X-loading plot of PCA for non-bruised and bruised fruits models. The X-loading plot indicated that the reflectance at a wavelength of around 670 nm had the greatest discriminatory effect on the model of non-bruised fruits while the wavelength at 680 nm was more discriminatory for the bruised fruit model.

From the corresponding PCA score plots of the validation set (Fig. 5), clear separation between the non-bruised and bruised fruits by PC1 and PC2 can be seen. In addition, Table 1 shows the result of longan classification by the PCA model. The PCA model

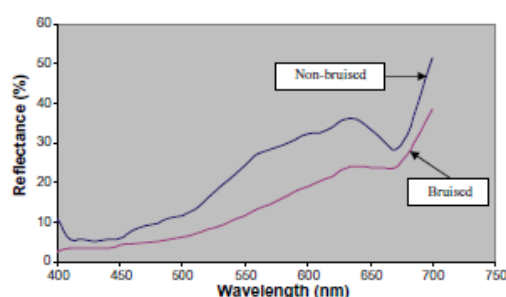


Fig. 3. Average visible reflectance spectra of non-bruised and bruised fruits.

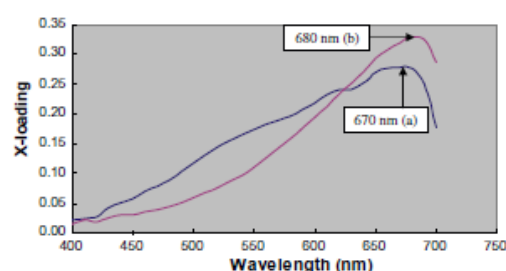


Fig. 4. X-loading plot of PCA model of non-bruised (a) and bruised (b) fruits.

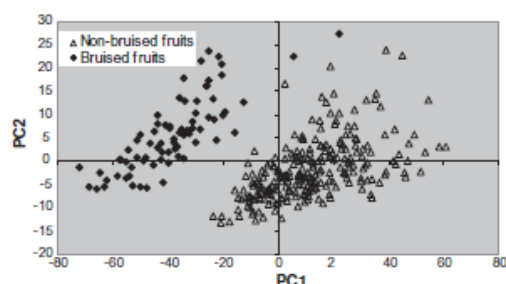


Fig. 5. Score plot of non-bruised and bruised fruits.

of non-bruised fruits had a correct classification rate of 93.88% while the same model was 100% correct in classifying bruised fruits. The PCA model of bruised fruits had self classification of 100% correctness, while the same model provided 100% correctness in classifying of the non-bruised fruits.

3.2. SIMCA and PLS-DA models

Table 1 also shows the result of the longan fruits which classified by SIMCA and PLS-DA models. The SIMCA model could classify the non-bruised and bruised longan fruits with 86.49% success overall of the validation set. The PLS-DA showed better performance than SIMCA with 100% success in classification of the validation set.

Table 1

Percentage of correct classification of the non-bruised and bruised longan fruits using spectra between 400 and 700 nm by PCA, SIMCA and PLS-DA models.

Sample model	Non-bruised	Bruised
PCA (non-bruised)	93.88	100
PCA (bruised)	100	75
SIMCA	86.49	
PLS-DA	100	

Xing et al. (2003) employed the canonical discriminant analysis (CDA) to classify the bruises and non-bruised healthy spots of "Golden Delicious" apples using the reflectance VIS/NIR spectra in the range of 400–1700 nm. Their results showed the squared canonical correlations (CR^2) were 0.74 and 0.68 for impact bruises and compression bruises, respectively. The result of Xing et al. (2005a) which used the hyperspectral imaging with the wavelength between 400 and 1000 nm was corresponded with our result that the 93% of the non-bruised apples were recognized as sound. However, Xing et al. (2005b) used PLS-DA in classifying bruised and non-bruised apples using the wavelength range between 400 and 1700 nm and reported that the models based on Norris' first derivative data were able to separate bruised from healthy tissue better than MSC data in terms of the highest total classification accuracy which was 94.07% more than 91.53%.

From our results, for longan, the visible wavelength could provide better correctness of classification (100%) of bruises and non-bruises by PLS-DA. This indicated that the best method is depended on the type or characteristic of fruits and vegetables.

4. Conclusion

The visible reflectance spectroscopy was proved for the first time in its ability for classifying bruised and non-bruised longan fruits. In this study, we have the novelty on the use of visible spectroscopy combined with PCA, SIMCA and PLS-DA. The PCA was also used to study the feasibility in using this technique for the classification. The accuracy of the methods for bruise classification of longan was compared. The Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) showed the best classification performance with 100% classification success rate on the validation set and was found to be better than Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA). This information could prove helpful in the on-line and portable application of longan fruit in the industry.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Postgraduate Education and Research Development Project in Postharvest Technology/Post-harvest technology Innovation Center, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom, Thailand for the sponsoring this project and King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand for laboratory.

References

- Abajo, M.J., González-Sáiz, J.M., Pizarro, C., 2004. Near infrared spectroscopy and pattern recognition methods applied to the classification of vinegar according to raw material and elaboration process. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 12, 207–219.
- Andre, M., 2003. Multivariate analysis and classification of the chemical quality of 7-aminocapalopranic acid using near-infrared reflectance spectroscopy. *Analytical Chemistry* 75 (14), 3460–3467.
- Chen, Q., Zhao, J., Zhang, H., Liu, M., Fang, M., 2005. Qualitative identification of tea by near infrared spectroscopy based on soft independent modeling of class analogy pattern recognition. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 13, 327–332.
- Cozzolino, D., Smuth, H.E., Gishen, M., 2003. Feasibility study on the use of visible and near-infrared spectroscopy together with chemometrics to discriminate

- between commercial white wines of different varietal origins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51 (26), 7703–7708.
- Gao, X., Heinemann, P.H., Irudayaraj, J., 2003. Non-destructive apple bruise on-line test and classification with Raman spectroscopy. ASAE Meeting Paper No. 033025, St. Joseph, Michigan, USA.
- Geoola, F., Peiper, U.M., 1994. A spectrophotometric method for detecting surface bruises on "Golden Delicious" apples. *Journal of Agricultural Engineering and Research* 58, 47–51.
- Jiang, Y.M., Zhang, Z., Joyce, D.C., Ketsa, S., 2002. Postharvest biology and handling of longan fruit. *Postharvest Biology and Technology* 26 (3), 241–252.
- Lammertyn, J., Nicola, B., Ooms, K., De Smedt, V., De Baerdemaeker, J., 1998. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of 'Jonagold' apples using NIR spectroscopy. *Transaction of the ASAE* 41 (4), 1089–1094.
- Leemans, V., Magin, H., Destain, M.F., 1999. Defect segmentation on Jonagold apples using color vision and a Bayesian classification method. *Computers and Electronics in Agriculture* 23, 43–53.
- Office of Agricultural Economics, (2009). Ministry of Agriculture and Co-Operatives, [Online] Accessed from: <http://www.oae.go.th/jae_report_import/export_result.php>.
- Pholpho, T., Jarimopas, B., Sirisomboon, P., Pathaveerat, S., 2009. Mechanical bruising of fresh longan fruit. 10th International Conference of Thailand Society of Agricultural Engineering on "Innovations of Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind", 1–3 April 2009, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Pholpho, T., Jarimopas, B., Sirisomboon, P., 2008. Postharvest damage and some physical properties of fresh longan. CR 3–12, Proceedings of the 9th Thai Society of Agricultural Engineering Annual Meeting – Technology for Sustainable Agriculture and Agro-Industry, January 31–February 1, 2008, Faculty of Engineering and Agricultural Industry, Maejo University, Thailand (in Thai).
- Sirisomboon, P., Hashimoto, Y., Tanaka, M., 2009. Study on non-destructive evaluation methods for defect pods for green soybean processing by near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 93, 502–512.
- Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolaï, B.M., Tijskens, E., 2007. Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology* 45 (2), 157–167.
- Xing, J., Landahl, S., Lammertyn, J., Vrindits, E., De Baerdemaeker, J., 2003. Effects of bruised of on discrimination of bruised and non-bruised 'Golden Delicious' apples by Vis/NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 30, 249–258.
- Xing, J., Bravo, C., Jancsó, P.T., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., 2005a. Detecting bruises on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. *Biosystems Engineering* 90 (1), 27–36.
- Xing, J., Linden, V.V., Vanzeebroeck, M., De Baerdemaeker, J., 2005b. Bruise detection on Jonagold apples by visible and near-infrared spectroscopy. *Food Control* 16, 357–361.
- Xing, J., Ngadi, M., Gunenc, A., Presher, S., Garipey, C., 2007. Use of visible and spectroscopy for quality classification of intact pork meat. *Journal of Food Engineering* 82, 135–141.



การพัฒนาและทดสอบเครื่องสั่นสะเทือนสำหรับทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ Development and Vibration Machine for Fruit and Vegetable Package Testing

ธีรพงศ์ ผลโพธิ์¹ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์² ปานมนัส ศิริสมบุญ³
Teerapong Pholpho¹ Siwalak Pathaveerat² Panmanas Sirisomboon³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบเครื่องสั่นสะเทือนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM D999 method A2 ซึ่งมีการสั่นสะเทือนแบบ Rotary motion เครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในช่วงความถี่ 2-5 Hz มีการเคลื่อนที่ 25 mm. โดยให้ความถี่ที่กำหนดคงที่สำหรับภาระและเวลาของการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงไป frequency resolution อยู่ในช่วง 0.13-0.29% รับน้ำหนักได้สูงถึง 270 kg. เครื่องสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ โครงสร้างฐาน โครงสร้างชุดขับ เพลา ลูกเบี้ยว ชุดส่งกำลัง มอเตอร์ไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์และชุดถ่วงสมดุล ผลการทดสอบเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 2 และ 5 Hz ผลการทดสอบพบว่าเครื่องสั่นสะเทือนให้ความถี่ที่กำหนดคงที่ที่ภาระและเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปไม่แตกต่างกันสำคัญที่ 5% และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความถี่ (Δf , %) ของ 2, 5 และ 3.83 Hz มีค่าเท่ากับ 0.13, 0.29 และ 0.37% ตามลำดับ การเปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย ที่ความถี่ 4 Hz (ที่ความเร่งของการสั่นสะเทือนที่ 0.81g) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ส้มเขียวหวานเบอร์ 0 บรรจุในตะกร้าพลาสติก พบว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีความซ้ำของผลส้มเขียวหวานสูงกว่าเครื่องที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย 4.52 % อย่างไรก็ตามเครื่องสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ใช้งบประมาณ 16,000 บาท ซึ่งถูกกว่าเครื่องที่นำเข้ามาก

คำสำคัญ: สั่นสะเทือน บรรจุภัณฑ์

ABSTRACT

The objective of this research is to develop the vibration machine for fruit and vegetable package based on ASTM standard D999 method A2. The vibration machine was operating constantly at the selected frequency between 2-5 Hz, The frequency resolution between 0.13-0.29% and maximum load was 270 kg. This machine composes by the structure unit, top structure, camshaft, power transmission, electric motor, inverter and balance unit. The result shows that at the tested frequency, 2 and 5 Hz. the machine gave the constant values of frequency for all ranges of loaded weight at the 5% significant. The frequency solutions (Δf , %), tested at 2, 3.83 and 5 Hz. were found at 0.13, 0.29 and 0.37% respectively. Comparative testing between Thai Packing Center imported vibration testing machine and development machine with tangerine no.0 in plastic basket at 4 Hz. (0.81g) for 1 hour indicated that fruits bruising due to the development machine was 4.52 % higher than the machine of Thai Packing Center. However, the development machine cost about 16,000 bath which was much cheaper than the imported one.

Keywords: vibration, package

¹ Post Graduate Education and Research Development Project in Post-harvest Technology, Kasetsart University Kamphaengsaen Campus, Nakhonpathom

² Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhonpathom

³ Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok

บทนำ

ผักผลไม้เมื่อถูกเก็บเกี่ยวแล้ว จำเป็นต้องส่งต่อมายังตลาดเพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภค การนำผลไม้จำนวนมากไปสู่ตลาดต้องจัดการด้วยการบรรจุภัณฑ์ และการขนส่งเป็นเครื่องมือพาบรรจุภัณฑ์ผลิตผลไป การขนย้ายและขนส่งทำให้เกิดภาวะเชิงกลได้แก่ การกระแทก และการสั่นสะเทือนส่งผลให้ผลิตผลเสียหาย(Mohsenin, 1978)

นักวิจัยหลายคน(O'Brin et al,1963; Jarimopas et al., 2005; Chonhenchob และ Singh, 2004; Guillon, 1963; วสันต์, 2545; ทรงธรรม และคณะ, 2549) ได้ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพล และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผักและผลไม้ทั้งการทำการทดลองกับการขนส่งผักผลไม้จริง Hinsch et al.,1993; Jarimopas et al.,2005 ใช้เครื่องมือทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อจำลองสถานการณ์ขนส่งการสั่นสะเทือนทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหาย ทำให้สินค้าขายไม่ออกหรือจำเป็นต้องลดราคา Ceponis and Butterfield 1974,1981,1985;Ceponis and Cappellini,1985 พบว่าผลไม้ และผักสดที่ได้รับความเสียหายระหว่างการเก็บเกี่ยวขนส่ง การจำหน่าย ได้แก่ เซอร์ มะเขือเทศและลูกแพร์ มีค่าอยู่ระหว่าง 15-68% ของความเสียหายทั้งหมด Sommer (1957) พบว่าผิวของผลไม้ที่เปลี่ยนสีมีสาเหตุมาจากการสั่นสะเทือนในการขนส่งถึงแม้ว่าเนื้อภายในของผลไม้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเสียหายของผิวผลไม้เป็นปัญหาลำคัญทางด้านตลาด การสั่นสะเทือนบ่อยๆทำให้ผลไม้หม่นเกิดสีเปลี่ยนหรือเป็นรอยคล้ำรอบๆผลไม้ หรือเรียกว่ารอยช้ำโรลเลอร์ (roller bruising)ในการศึกษาเพิ่ม Sommer พบว่าการสั่นสะเทือนก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ผลไม้เกิดการสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้คุณภาพของผลไม้ลดลง O'Brien et al. (1965) ได้ศึกษาความเสียหายจากการขนส่งผลไม้ พบพบว่าการชำรุดขึ้นในระหว่างการขนส่ง โดยอธิบายว่าเมื่อความถี่ Amplitude ของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งเพียงพอจะทำให้ผลไม้ชั้นบนของผลิตภัณฑ์เคลื่อนย้ายอย่างอิสระ มีทั้งการหม่นของผลไม้และการถูกกันเองทำให้เกิดการเปลี่ยนสี และแตกของเนื้อเยื่อที่ผิวได้ Timothy G.Weigel and Marshall S.White (1999) ได้ศึกษาแรงสั่นสะเทือนที่เกิดกับแท่นวางสินค้า(Pallet) โดยทำการทดสอบที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ 3-50 Hz พบว่าแท่นวางสินค้าสามารถทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหายได้ และได้แนะนำถึงการออกแบบแท่นวางสินค้าให้มีลักษณะของการยึดแน่นที่จะไม่เกิดการสั่นคลอนจึงจะช่วยลดปริมาณความเสียหายกับผลิตผล เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนมีหลายแบบได้แก่ vertical motion table, rotary motion table, และ electro-hydraulic table เป็นต้น จึงต้องมีการใช้เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อจำลอง

สถานการณ์ขนส่งเพื่อความสะดวกในการทดลอง วิจัยและเป็นLab. สอนนักศึกษา งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D999 method A2 ซึ่งมีกระแสที่ 25 mm. แบบ Rotary Motion โดยทำงานในช่วง 2-5 Hz. (ASTM, 1991)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การออกแบบ

เครื่องสั่นสะเทือนสำหรับทดสอบทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ที่พัฒนามีมิติประมาณ 1.5 m x 1.5 m x 0.8 m มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ โครงสร้างฐาน โครงสร้างชุดบนพร้อมแผ่นไม้อัด เพลาลูกเบี้ยว ชุดส่งกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสยี่ห้อ Mitsubishi ขนาด 5 hp 3 phase อินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Sumitomo AF-500 ขนาด 5 hp ส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าไปยังเพลาลูกเบี้ยวกำลังโดยสายพานและโซ่ ซึ่งมีอัตราทด 1:0.22 โครงสร้างชุดบนพร้อมแผ่นไม้อัดรองพื้นจะเคลื่อนที่เยื้องศูนย์ของลูกเบี้ยวซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ 12.5 mm. กับโครงสร้างฐานซึ่งจะยึดติดกับพื้นคอนกรีต โดยจะเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวระดับและชุดตัวสมดุล 16 น้ำหนักก้อนละ 2.20 kg โดยจะติดที่ปลายเพลาด้านนอกสามารถเพิ่มหรือลดเพื่อทำให้สมดุลกับน้ำหนักของวัสดุที่ทดลอง(Fig.1)

2. วิธีการทดสอบ

ทำการเตรียมกระสอบดินจำนวน 30 กระสอบ ชั่งน้ำหนักกระสอบดินทุกกระสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล EXCELL รุ่น FAW- 300kg น้ำหนักเฉลี่ยกระสอบละ 9 kg เขียนหมายเลขกระสอบที่ทดลองและบันทึกค่า วางกระสอบดินบนเครื่องทดสอบชุดละ 3 กระสอบ ยึดให้แน่น เปิดเครื่องและปรับ inverter จนความเร็วรอบของเครื่องอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที ($f_r = 2$ Hz.) ตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบยี่ห้อ Digicon CT-235T บันทึกค่าความเร็วรอบทุก 3 นาทีจนครบ 15 นาที ปรับ inverter จนความเร็วรอบของเครื่องอยู่ที่ 300 รอบต่อนาที ($f_r = 5$ Hz.) บันทึกค่าความเร็วรอบทุก 3 นาทีจนครบ 15 นาที(ทรงธรรม และคณะ, 2549) เพิ่มกระสอบดินครั้งละ 3 กระสอบ ทำตามขั้นตอนข้างต้นจนครบ 15 ชุด(30 กระสอบ)

วางกระสอบดินบนเครื่องทดสอบ 15 ชุด เปิดเครื่องปรับ inverter จนความเร็วรอบอยู่ที่ 230 รอบต่อนาที ($f_r = 3.83$ Hz.) บันทึกค่าความเร็วรอบทุก 5 นาทีจนครบ 45 นาที (Hanlon, 1984) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 120, 300 และ 230 รอบต่อนาที วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความถี่ Δf

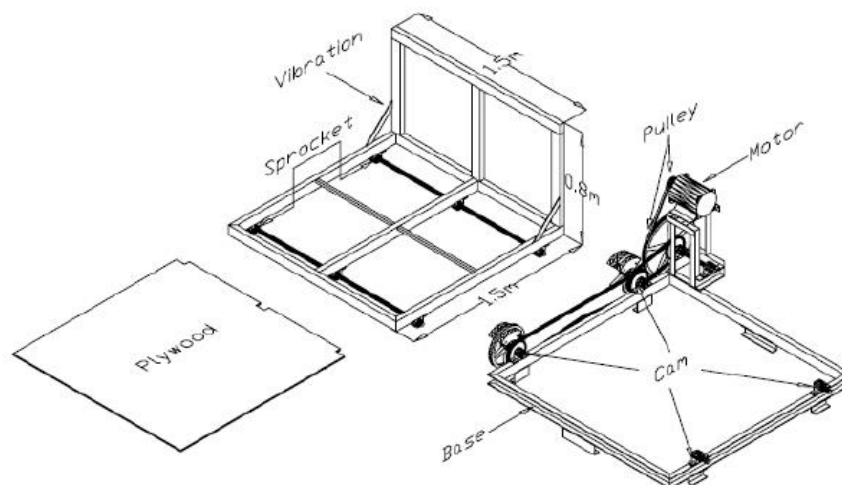


Fig.1 The components of development vibration machine for fruits and vegetable packing testing

สุ่มตัวอย่างส้มเขียวหวานเบอร์ 0 ตะกร้าละ 20 ผล เป็นชุดควบคุม นำส้มทั้ง 3 ตะกร้า ไปทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนยี่ห้อ Landsmont รุ่น MS 2000 ของศูนย์บรรจุหีบห่อไทย โดยทดสอบที่ 4 Hz. (ความเร่งหรือ ความเข้มของการสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.81g) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำส้มมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตรวจสอบว่าช้ำหรือไม่ ทำซ้ำขั้นตอนเดิมแต่เปลี่ยนเครื่องที่สร้างขึ้นมาใหม่

การวิเคราะห์

$$\text{ความเร่ง (g)} = \left[\frac{\text{ช่วงชัก (นิ้ว)}}{70400} \right] \times \left[\frac{\text{ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)}}{60} \right]^2 \quad (\text{Mohsenin, 1996})$$

$$\text{ความช้ำ (\%)} = \frac{\text{จำนวนส้มที่ช้ำ}}{\text{จำนวนส้มทั้งหมด}} \times 100$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงความถี่ (\Delta f, \%)} = \frac{\text{ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง}}{\text{ความถี่ที่กำหนด}} \times 100$$



Fig.2 Landsmont (MS- 2000) vibration machine at Thai Packing Center



Fig.3 development machine

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลกระทบของน้ำหนักของวัสดุที่ถูกสั่นสะเทือนและเวลาต่อความถี่ของการสั่นสะเทือน

ผลกระทบของน้ำหนักของวัสดุที่ถูกสั่นสะเทือนและเวลาต่อความถี่ของการสั่นสะเทือน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยควบคุมได้แก่ น้ำหนักของวัสดุที่ถูกสั่นสะเทือน และระยะเวลาของการสั่นสะเทือน ต่อความถี่ของการสั่นสะเทือน ปรากฏว่าความถี่ที่กำหนด (f_R) 2 และ 5 Hz น้ำหนักของวัสดุ (Load) และระยะเวลาของการสั่นสะเทือน (Time) ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความสำคัญ 5% (Table 1, 2 และ 3) ต่อความถี่ของการสั่นสะเทือน การเปลี่ยนแปลงความถี่ (Δf) ที่ความถี่ที่กำหนด (f_R) 2 และ 5 Hz เป็น 0.13% และ 0.29% ตามลำดับ

การทดสอบการสั่นสะเทือนน้ำหนัก 270 kg คงที่นาน 45 นาที ที่ความถี่ 3.83 Hz (230 รอบต่อนาที) ปรากฏว่า frequency resolution (Δf) = 0.37% (Table 1, Fig.4)

2. ผลการทดสอบเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนตะกร้าบรรจุส้มเขียวหวานระหว่างเครื่องสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นกับเครื่องสั่นสะเทือนของศูนย์บรรจุหีบห่อไทย

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนผลส้มเขียวหวานในตะกร้าพลาสติกซึ่งมีน้ำหนักประมาณตะกร้าละ 25 kg โดยใช้เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนของศูนย์บรรจุหีบห่อไทยและเครื่องที่สร้างขึ้น (Fig.3) การทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D999 method A2 และ Chonhenchob และ Singh (2005) ปรากฏว่าความซ้ำของผลส้มในตะกร้าพลาสติกที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทยและที่ลาดกระบังเป็น 39.99% และ 41.51% ตามลำดับโดยหักค่าเฉลี่ยของชุดควบคุม 3.25% ออกแล้ว

Table 1 Regulated frequency (f_r), measured frequency (f_m), and frequency resolution (Δf) of local made vibration machine at the frequency of 2, 5 and 3.83 Hz (means $\pm$ standard deviation)

f_r (Hz)	f_m (Hz)	Δf (%)
2	2.00 $\pm$ 0.01	0.13 $\pm$ 0.11
5	4.99 $\pm$ 0.03	0.29 $\pm$ 0.26
3.83	3.84 $\pm$ 0.00	0.37 $\pm$ 0.03

f_r =regulated frequency (Hz), f_m =measured frequency (Hz), Δf = frequency resolution (%)

Table 2 ANOVA analysis of load and time effects upon frequency of 2 Hz

Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F statistics
Load	0.000233	10	0.0000232	0.75 NS
Time	0.00012	4	0.00003	0.96 NS
Error	0.00124	40	0.000031	
Total	0.001593	54		

Table 3 ANOVA analysis of load and time effects upon frequency of 5 Hz

Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F statistics
Load	0.008891	10	0.000889	1.47NS
Time	0.002611	4	0.000653	1.08NS
Error	0.024109	40	0.000603	
Total	0.035611	54		

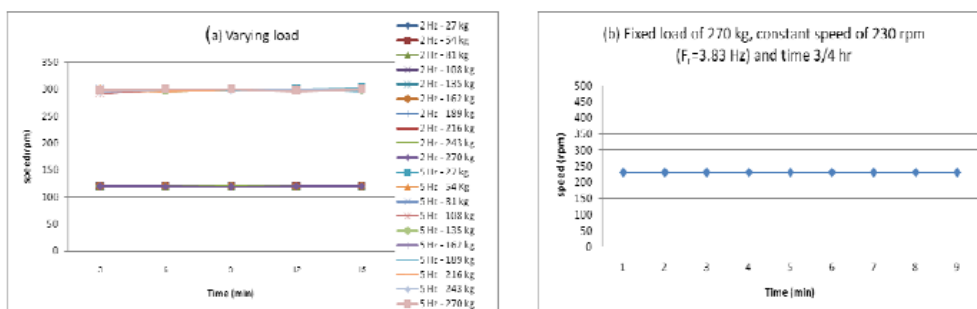


Fig.4 Speed of fabrication vibration machine with respect to time

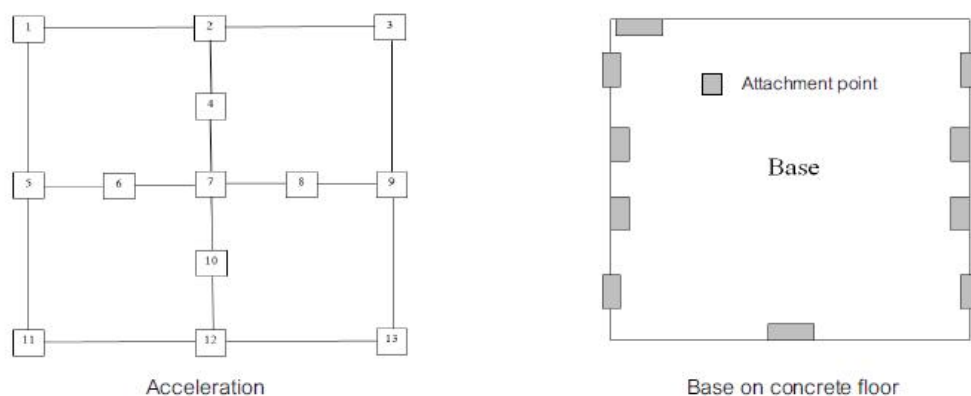
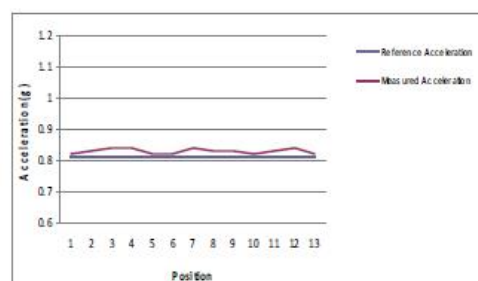


Fig. 5 Position of measurement and installation



RION vibration meter

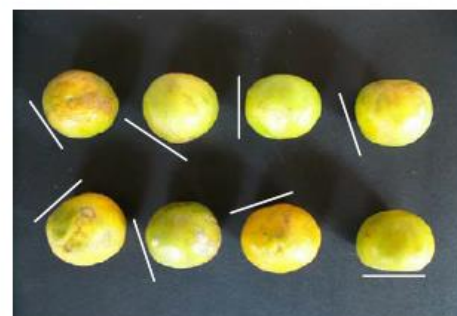


Distribution of acceleration with respect to position

Fig. 6 Acceleration measurement



Normal



Bruised and skin deformation line

Fig. 7 Appearance of tangerine fruit

การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้เครื่องวัดความเข้มหรือความแรงของการสั่นสะเทือนยี่ห้อ RION รุ่น VM-61 ที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 13 ตำแหน่ง (Fig.5, 6) บนพื้นของเครื่องสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นปรากฏว่าได้ค่าเฉลี่ยความแรง $0.83 \pm 0.01g$ ซึ่งสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ($0.81g$) ประมาณ $0.02g$

จากนั้นทำการทดลองด้วยการใช้ผลส้มเขียวหวานเบอร์ 0 บรรจุในตะกร้าพลาสติกขนาด $36 \text{ cm} \times 55.5 \text{ cm} \times 31 \text{ cm}$ จากตลาดไท จำนวน 6 ตะกร้า วางใส่ท้ายรถกระบะ

สองตอนขนาด 1 ตัน เดินทางจากตลาดไทมาที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย สุ่มตัวอย่างส้มเขียวหวานตะกร้าละ 20 ผล เป็นกลุ่มตัวอย่าง เขย่าส้ม 3 ตะกร้า ด้วยเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนยี่ห้อ Landsmont รุ่น MS 2000 ที่ความถี่ 4Hz. เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเดินทางออกจากศูนย์บรรจุหีบห่อไทยมาที่ สาขาวิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทดสอบกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นที่ (Fig.3) ความถี่ 4Hz. เวลา 1 ชั่วโมง

เช่นกัน เก็บตัวอย่างทั้งสองสถานที่ มาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง(27°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตรวจสอบว่าชำรุดหรือไม่โดยจุดที่สัมผัสจะมีลักษณะผิวเรียบ แบนสังเกตเห็นได้ชัด (Fig.7) และเมื่อสัมผัสจะพบว่าภายในผลสัมผัสมีลักษณะนิ่ม ไม่ต้านแรงกด ปรากฏว่าเครื่องสั่นสะเทือนที่พัฒนานั้นช้าสูงกว่าเครื่องที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย 4.52% แต่อย่างไรก็ตามเครื่องที่พัฒนาขึ้นนั้นมีราคาประมาณ 16,000 บาท ซึ่งถูกกว่าเครื่องที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทยที่มีราคาประมาณ 170,000 บาท

สรุป

เครื่องสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นสำหรับทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้มีมิติโดยประมาณ 1.5m x 1.5 m x 0.8 m สามารถทำงานในช่วงความถี่ 2-5 Hz. และรับน้ำหนักสูงสุดได้ 270 kg. ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องสั่นสะเทือนที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทยกับเครื่องที่พัฒนาขึ้น ที่ความถี่ 4Hz. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ผลสัมประสิทธิ์ความเร่ง 0 พบว่าเครื่องสั่นสะเทือนที่พัฒนาขึ้นทำให้ผลสัมประสิทธิ์ความเร่งสูงกว่าเครื่องสั่นสะเทือนที่ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย 4.52 % โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นสำหรับทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้มีราคาประมาณ 16,000 บาท

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเครื่องกล(หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ ดร. ทรงธรรม ไชยพงษ์ ที่ให้คำแนะนำในการพัฒนาเครื่อง

เอกสารอ้างอิง

- ทรงธรรม ไชยพงษ์, สุวรรณ หอมหวาน และบัณฑิต จริโมภาส. 2549. เครื่องสั่นสะเทือนทำในประเทศสำหรับ ทดสอบบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้. วารสารสมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1(12):48-53.
- วสันต์ แสงนิล. 2549. การสั่นสะเทือนของตะกร้าพลาสติกบรรจุส้มเขียวหวานระหว่างการขนส่งทางรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- American Society for Testing Materials. 1991. Standard method for vibration testing of shipping container. Selected ASTM Standards on

Packaging. 3rd ed. Baltimore, USA.

- Chonhenchob, V. and S.P. Singh, 2003. A comparison of corrugated boxes and reusable plastic containers for mango distribution. Packaging Technology and Science. 16:231-237.
- Chonhenchob, V. and S.P. Singh, 2004. Testing and comparison of various packages for mango distribution., J. Testing and Evolution. 32(1): 69-72
- Chonhenchob, V. and S.P. Singh, 2005. Packaging performance comparison for distribution and export of papaya fruit. Package. Technol. Sci. 18:125-131
- Guillou, R., 1963. Setting packed fruit by vibration. Transactions of the ASAE. 6(3):190-191 and 194
- Hanlon, J.F. 1984. Handbook of Package Engineering. 2nd ed. McGraw-hill book company, New York
- Hinsch, R.T,D.C. Slaughter, W.L. Craig and J.F. Thompson. 1993. Vibration of fresh fruits and vegetable during refrigerated truck transport. Tran. ASAE 36 (4): 1039-1042
- Jarimopas, B., S. P. Singh and W. Sangnil., 2005. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged Tangerines during transit. Packaging Technology and Science. 18 :179-188.
- O'Brien,M.,J.P. Gentry and R.C. Gibson. 1965. Vibrating characteristics of fruits as related to in-transit injury. ASAE : 241-243
- Singh, S. P. 1992. New package system for fresh berries. Packaging. Hilgardia. 5:3-10
- Singh, S. P., G.Burgess and Ming-Xu. 1992. Burising of apples in four different packages using simulated truck vibration. Packaging Technology and Science. 5:145-150.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีรพงศ์ ผลโพธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	25 ธันวาคม 2505
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีเครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย M.S Agri. Eng. Central Luzon State University Philippines
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยเทคโนโลยี หลังการเก็บเกี่ยว (ADB) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2550)