



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาเครื่องกลคัดขนาดผลชมพูและเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของ
มะพร้าวอ่อน

Development of Mechanical Sizer for Rose Apple Fruit and Non-Destructive Techniques
for Evaluation of Thai Young Coconut Maturity

นามผู้วิจัย นายกระวี ตรีอำรรค

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(มนุศักดิ์ जानทอง, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงวิ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องกลคัดขนาดผลชมพูและเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของ
มะพร้าวอ่อน

Development of Mechanical Sizer for Rose Apple Fruit and Non-Destructive Techniques for
Evaluation of Thai Young Coconut Maturity

โดย

นายกระวี ตรีอำนาจ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2554

กระวี ตรีอำรรค 2554: การพัฒนาเครื่องกลัดขนาดผลชมพู่และเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของมะพร้าวอ่อน ปรินญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, Ph.D. 155 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาและทดสอบเครื่องกลัดขนาดผลชมพู่ และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพ เสียง และแสง ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายต่อการจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน

ความเร็วและมุมเอียงของสายพานคัดขนาด ความเร็วของสายพานป้อน รูปแบบการวางป้อนผลชมพู่ มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการคัดขนาดผลชมพู่ ($p < 0.05$) สภาพการทำงานที่เหมาะสมต่อการคัดขนาด ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของชมพู่ สมรรถนะการคัดขนาดที่ดีที่สุด พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การคัดผิดเป็น 10.8-16.5 % ที่อัตราการทำงานสูงสุด 149.7-195.1 kg hr⁻¹ โดยที่ไม่ปรากฏความเสียหายเชิงกลต่อผลชมพู่ที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การคัดขนาดด้วยคนของสวนส่งออกมีเปอร์เซ็นต์การคัดผิด 27.9 %

ความถ่วงจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูง ของมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอม มีความแตกต่างกันในมะพร้าวอ่อน วัยอ่อน กับกลุ่มของวัยพอดีและแก่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การตอบสนองทางเสียง มีความแตกต่างกันในแต่ละวัย การดูคลื่นแสงในช่วงแสงสีเขียวและสีเหลือง ที่บริเวณใกล้เปลือกข้าวผลมีศักยภาพที่จะใช้จำแนกวัยมะพร้าวอ่อนได้ ฟังก์ชันการจำแนกวัยจากตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลายทุกตัวแปร เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ Discriminant analysis สามารถจำแนกวัยในมะพร้าวอ่อนได้ดี โดยแยกวัยอ่อนและพอดี ออกจากวัยแก่ ได้ถูกต้อง 88.7% และแยกวัยอ่อนออกจากวัยพอดีได้ถูกต้อง 89.2% ในตัวอย่างมะพร้าวอ่อนที่ถูกทดสอบการจำแนกวัย

Krawee Treemnuak 2011: Development of Mechanical Sizer for Rose Apple Fruit and Non-Destructive Techniques for Evaluation of Thai Young Coconut Maturity. Doctor of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Siwalak Pathaveerat, Ph.D. 155 pages.

The objective of this thesis are development and testing of the rose apple sizing machine prototype and relational study of physical properties, acoustic response and light properties in non-destructive techniques in evaluation of Thai young coconut maturity.

The velocity and inclination angle of sizing belt; feeding belt velocity and the fruit orientation significantly affects the sizing performance at $p < 0.05$. The optimum conditions for continuous mechanical sizing depended on the variety. The optimum sizing performance was characterised by contamination ratio or error of 10.8-16.5 %, the throughput capacity of 149.7-195.1 kg hr⁻¹ with no significantly noticeable damage to the sized fruits. Manual sizing of the exported rose apple had error ratio of 27.9%.

The specific gravity, diameter and height of young coconut fruit were significantly different between immature stage and the group of mature and over-mature stage ($p < 0.05$). The acoustic response was significantly different in each maturity stage. Absorbance spectra in a range of green and yellow on the ridge close to the stem of young coconut could be potentially used in maturity evaluation. The classification functions calculated from non-destructive variables can identify maturity stage of young coconut. The model which analyzed by Discriminant analysis in selected samples gave 88.7% of corrected classification of over-mature stage from a group and 89.2% of immature stage and mature stage classifying in test set samples of young coconut.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอน้อมระลึกถึงพระคุณครูบาอาจารย์ ท่านศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จริโมภาส และท่านรองศาสตราจารย์ ดร.มงคล กวางวโรภาส ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษาขั้นสูงสุดแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และอาจารย์ ดร.มนุศักดิ์ จานทอง ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ Professor Dr. Pictiew Chen สำหรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ และโอกาสในการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานการวิจัยในระดับนานาชาติ

ขอขอบคุณ โครงการเครือข่ายกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา ปี 2549 ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อันเป็นสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเทวรัตน์ ทิพย์วิมล ที่เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนๆ ชาววิศวกรรมเกษตร สำหรับน้ำใจไมตรีและความช่วยเหลือซึ่งกันและกัน เหนือสิ่งอื่นใด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาขั้นสูงและให้การสนับสนุนแก่ข้าพเจ้าจนถึงวันนี้

คุณความดีที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะพึงมี ข้าพเจ้าขออุทิศถึงแต่ คุณพ่อสันติ ตรีอำนรรค ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จริโมภาส และรองศาสตราจารย์ ดร.มงคล กวางวโรภาส

กระวี ตรีอำนรรค

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	75
สรุปและข้อเสนอแนะ	109
สรุป	109
ข้อเสนอแนะ	109
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	110
ภาคผนวก	114
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	155

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณสารอาหารในชมพูน้ำหนัก 100 กรัม	4
2	การพัฒนาของผลมะพร้าวหอม	18
3	ระยะห่างระหว่างช่องคัดขนาดและมุม β ของสายพานคัดขนาด	44
4	ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทุลเกล้าที่ใช้ทดสอบเบื้องต้น	54
5	เปอร์เซ็นต์การเกิดความเสียหายกับผลชมพูพันธุ์ทุลเกล้า	54
6	ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทองสามสีที่ใช้ทดสอบ	56
7	ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ที่ใช้ทดสอบ	56
8	ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทุลเกล้าที่ใช้ทดสอบ	56
9	เปอร์เซ็นต์การเกิดความเสียหายกับผลชมพูทั้ง 3 พันธุ์	56
10	ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพูพันธุ์ทุลเกล้า	75
11	ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์	75
12	ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพูพันธุ์ทองสามสี	76
13	ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทุลเกล้า	76
14	ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทับทิมจันทร์	77
15	ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทองสามสี	77
16	ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทุลเกล้า	78
17	ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทับทิมจันทร์	78
18	ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทองสามสี	79
19	ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพูพันธุ์ทุลเกล้า	80
20	ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์	80
21	ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพูพันธุ์ทองสามสี	81
22	ผลของการจัดวางทรงผลชมพูพันธุ์ทุลเกล้า	82
23	ผลของการจัดวางทรงผลชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์	83
24	ผลของการจัดวางทรงผลชมพูพันธุ์ทองสามสี	83
25	เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน	84
26	เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทองสามสีในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
27	ผลการทดสอบระดับวิสาหกิจของเครื่องคัดขนาดชมพู	85
28	ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทองสามสีในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน	86
29	ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องคัดขนาดผลชมพู	86
30	ลักษณะทางกายภาพของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อแยกตามวัย	91
31	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพ	92
32	การตอบสนองทางเสียงของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อแยกตามวัย	93
33	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพ	94
34	ค่า Correlation ระหว่างตัวแปร จากตัวแปรกลุ่มลักษณะทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง	95
35	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง	96
36	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยกลุ่มตัวแปรการดูดกลืนแสง	98
37	ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ถูกคัดเลือกเป็นตัวแปรจำแนกวัย	99
38	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยทุกตัวแปรของการทดสอบแบบไม่ทำลาย	100
39	ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ถูกคัดเลือกเป็นตัวแปรจำแนกวัย	101
40	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1	104
41	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2	104
42	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1 (leave-one-out)	105
43	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2 (leave-one-out)	105
44	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1	107
45	การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2	108

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเก็บเกี่ยวผลชมพูในสวน	6
2 การคัดแยกผลชมพูโดยเกษตรกร	7
3 การคัดขนาดชมพูด้วยแรงงานคน โดยวิธีการประมาณด้วยสายตา	7
4 (ก) การบรรจุภัณฑ์ชมพูเพื่อจำหน่ายในห้างสรรพสินค้าและตลาดต่างประเทศ (ข) การบรรจุภัณฑ์เพื่อส่งจำหน่ายในตลาดท้องถิ่น	8
5 เครื่องคัดขนาดส้มเขียวหวานแบบตะแกรงทรงกระบอกเจาะรู	9
6 (ก) ภาคตัดขวางของเครื่องคัดขนาดแบบสายพานและแผ่นกั้น (ข) เครื่องคัดขนาดแบบ Greefa	10
7 ลักษณะการคัดขนาดแบบสายพานบานออก	11
8 เครื่องคัดขนาดมังคุดแบบสายพานบานออก	11
9 การเวียนซ้ายหรือเวียนขวาของใบมะพร้าว	13
10 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว	15
11 การสังเกตสีของผลมะพร้าว	20
12 ความยาวคลื่นต่างๆของแสงสีที่มองเห็น	21
13 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงและผลไม้	22
14 ตำแหน่งของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่าง และตัวตรวจจับสำหรับการวัดการสะท้อนแสง	23
15 ตำแหน่งของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่างและตัวตรวจจับ สำหรับการวัดแบบส่งผ่านแสง	23
16 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative	26
17 สเปกตรัมและ Second derivative ของสเปกตรัม	28
18 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC	28
19 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC	29
20 สัญญาณ Reflectance spectra ของมะเขือเทศ ในช่วงความยาวคลื่น 350-2,500 nm	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ผลจากสมการทำนายแบบ PLS ของมะเขือเทศของค่า SSC, ความเป็นกรด, การวัดความแน่นเนื้อแบบทดสอบด้วยแรงกด (Fc) และทดสอบด้วยหัว Puncture (Fp)	39
22	Schematic diagram ของการทดสอบรูปแบบการวัดแสงและการจัดวางผลแพร์	40
23	ภาพตัดแสดงชั้นคุณภาพของผลแพร์ที่ทำการทดสอบ	40
24	การใช้หลักการสายพานบานออกเป็นอุปกรณ์คัดขนาดผลชมพู	42
25	การเคลื่อนที่และระยะต่างๆของระบบคัดขนาด	43
26	ระบบเครื่องคัดขนาดชมพู	45
27	เครื่องป้อนผลชมพู	46
28	เครื่องคัดขนาดผลชมพู	47
29	ลักษณะการเคลื่อนที่ของผลชมพูผ่านถุงผ้าก่อนตกสู่สายพานคัดขนาด	48
30	การทำงานของเครื่องคัดขนาดชมพู	49
31	ผลชมพูที่หุ้มด้วยฟิล์มถนอมอาหารแล้ว	50
32	ผลการคัดชมพูพันธุ์ทูลเกล้าเมื่อ L(Film), S(Film) คือหุ้มฟิล์มและ L, S คือไม่หุ้มฟิล์มถนอมอาหารและ (ก), (ข), (ค) คือความเร็วการคัด 7, 14 และ 21 m/min ตามลำดับ	51
33	(ก) สายพานคัดขนาดก่อนหุ้ม (ข) การบุสายพานคัดขนาดด้วยแผ่นโฟมกันกระแทกความหนา 2 มม.	52
34	(ก) ลักษณะของถุงผ้าที่ใช้ประกอบกับสายพานคัดขนาด ข) ภาพด้านบนแสดงช่องที่ผลชมพูจะตกผ่านลงสู่สายพานคัดขนาด	53
35	(ก) และ (ข) ลักษณะแผ่นโฟมยางเมื่อบุกับสายพานคัดขนาดแล้ว	55
36	ตำแหน่งและระยะต่างๆของผลมะพร้าวอ่อน	67
37	สามเหลี่ยม Reuleaux tri-angle	67
38	การหาความถ่วงจำเพาะของผลมะพร้าวอ่อน (ก) ชั่งน้ำหนักผลมะพร้าวอ่อนในอากาศ (ข) ชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกผลมะพร้าวอ่อนแทนที่	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ไดอะแกรมของการทดสอบวัดค่าทางแสง	69
40	ตำแหน่งการวัดการดูดกลืนแสงบนสันทั้ง 3 ของมะพร้าวอ่อน	69
41	ตัวอย่างสัญญาณการดูดกลืนแสงของมะพร้าวอ่อน	70
42	โครงสร้างของชุดอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติเสียง	71
43	(ก) ตัวอย่างสัญญาณใน Time domain (ข) ตัวอย่างสัญญาณใน Frequency domain	71
44	(ก) ตานี่ม (ข) การวัดความหนาเนื้อด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์	72
45	สัณฐานบริเวณฐานผลของชมพู เมื่อ D max คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและ D min คือเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด	82
46	สัญญาณการดูดกลืนแสงของผลมะพร้าวอ่อน: range A คือ ความยาวคลื่นช่วง 427.99 - 498.14 nm และ range B คือความยาวคลื่นช่วง 650.34-686.26 nm.	97
47	Loading plot ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเมื่อวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย	102

การพัฒนาเครื่องคัดขนาดผลชมพูและเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัย ของมะพร้าวอ่อน

Development of Mechanical Sizer for Rose Apple Fruit and Non-Destructive Techniques for Evaluation of Thai Young Coconut Maturity

คำนำ

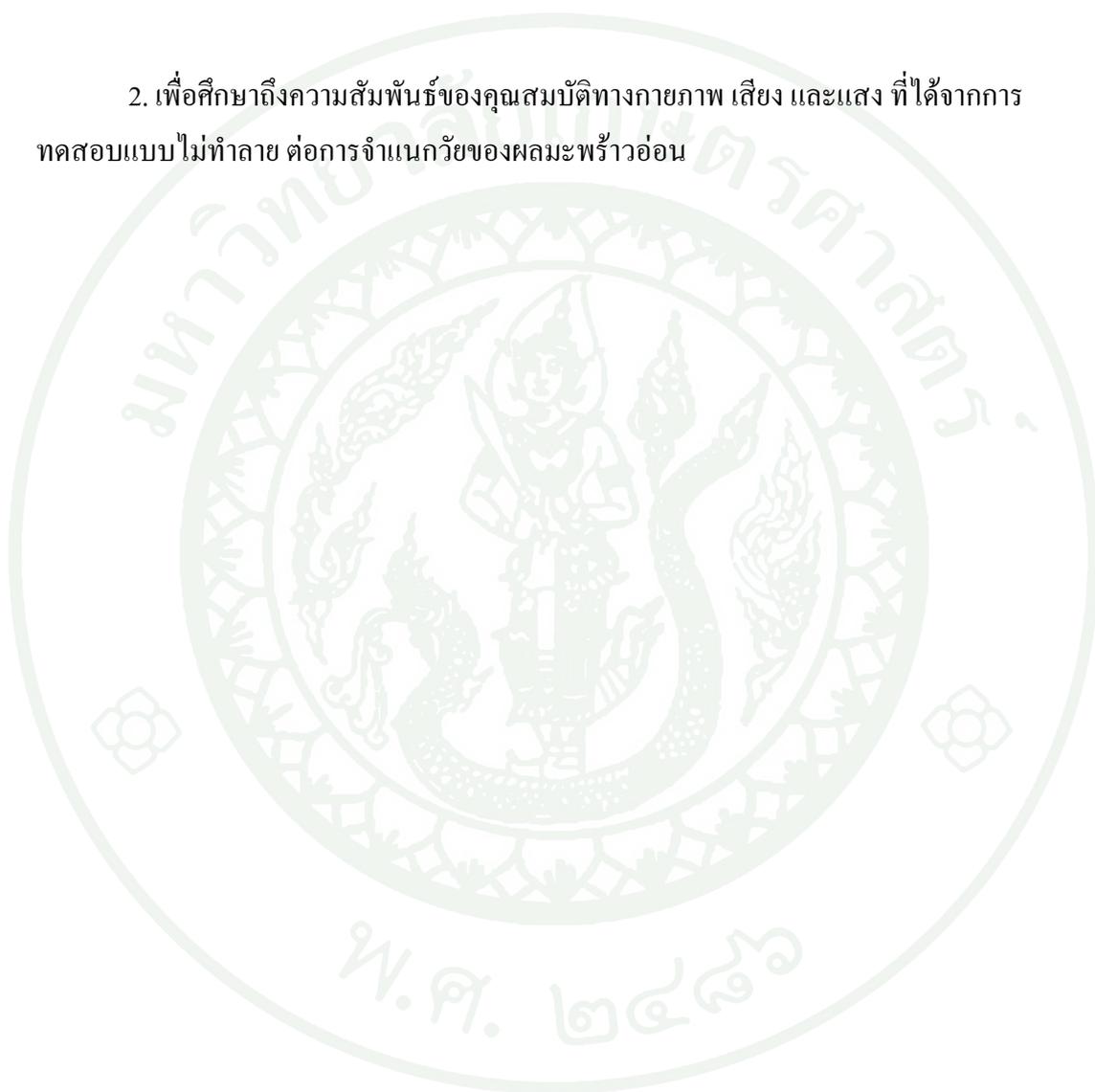
ชมพูเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคแพร่หลายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีสีสวยงามตามสายพันธุ์ มีกลิ่นหอม และมีรสชาติหวาน กรอบ นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมาก (นัฐณี, 2539) และจัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง โดยในปี พ.ศ. 2548 มีปริมาณการส่งออกถึง 93.70 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกถึง 1,405.38 ล้านบาท สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2549) ในปัจจุบันการเพาะปลูกชมพูยังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากขยายพันธุ์ได้ง่าย และเจริญเติบโตเร็ว ตลาดส่งออกที่สำคัญอยู่ในภูมิภาคเอเชีย ได้แก่ สิงคโปร์ ฮองกง ทั้งนี้เนื่องจาก ผลชมพูมีความบอบบางมาก ซ้ำง่าย และมีอายุการเก็บรักษาสั้น เพื่อให้ผลผลิตมีราคาจำหน่ายดี การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวชมพู เกษตรกรจึงต้องคัดคุณภาพและคัดขนาดผลชมพูออกเป็นระดับต่างๆกันก่อนจัดจำหน่าย ซึ่งการคัดขนาดชมพูนี้ปัจจุบันยังจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการคัด เนื่องจากชมพูเป็นผลไม้ที่บอบบางและซ้าได้ง่าย ทำให้มีอัตราการทำงานต่ำ ในช่วงที่ผลผลิตมีปริมาณมาก จะยิ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าจ้างแรงงานสูงขึ้นจากปัญหาดังกล่าว หากได้มีการพัฒนาเครื่องคัดขนาดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับผลชมพู มีประสิทธิภาพและอัตราการทำงานสูง เพื่อช่วยลดความอ่อนล้าของผู้ปฏิบัติงานและช่วยให้ทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น จะยิ่งส่งเสริมให้ชมพูเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจต่อไปได้

มะพร้าวเป็นไม้ผลที่เจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมของประเทศไทยได้ดี พบได้ทั่วไปทุกภูมิภาคของประเทศ ซึ่งเราใช้ประโยชน์จากส่วนต่างๆของมะพร้าว ได้แก่ ใช้ใบและกะลาในงานหัตถกรรม ใช้ลำต้นเป็นวัสดุในการก่อสร้าง เปลือกและใบมะพร้าวใช้ทำเป็นวัสดุปลูก และทำปุ๋ยหมัก ผลที่เป็นเนื้อใช้ปรุงอาหารทั้งคาวหวาน น้ำมันมะพร้าวใช้ดื่มทำให้ร่างกายสดชื่นแฉ่ำใส (นพรัตน์, 2542) โดยเฉพาะมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอม ที่รู้จักและนิยมบริโภคกันทั่วไปทั้งตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากน้ำมันมะพร้าวมีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย ซึ่งไม่มีในมะพร้าว

อ่อนจากประเทศอื่น (สุพจน์, 2543) มะพร้าวอ่อนที่นิยมปลูกเพื่อการส่งออก คือพันธุ์น้ำหอม และพันธุ์หมูสี ในปี 2550 มีมูลค่าการส่งออกรวม 353.45 ล้านบาท (กรมการค้าต่างประเทศ, 2550) มะพร้าวอ่อนจึงเป็นไม้ผลที่มีศักยภาพในการส่งออกสูง ทั้งที่ความต้องการมะพร้าวอ่อนในตลาดโลกมีสูงมาก แต่ปัจจุบันกลับพบว่าการผลิตมะพร้าวอ่อนเพื่อส่งออกของประเทศไทยนั้นมีมูลค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศมาเลเซีย ฟิลิปปินส์และศรีลังกา ซึ่งเป็นประเทศผู้ส่งออกรายใหญ่ ปัญหาส่วนหนึ่งเนื่องจากเกษตรกรไทยไม่สามารถระบุระยะการเจริญเติบโตที่แท้จริงของผลมะพร้าวที่เก็บเกี่ยวได้ วิธีการที่นิยมปฏิบัติได้แก่การสังเกตการแทงจั่นใหม่ ลักษณะผิวและสีของผล ลักษณะของระแงหรือหางหนู วิธีการเหล่านี้อาจคลาดเคลื่อนได้ตามฤดูกาลและสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้จึงกระทบทั้งระยะการเจริญเติบโตและระดับคุณภาพกัน ส่งผลกระทบต่อมาตรฐานการผลิตมะพร้าวอ่อนและทำให้สูญเสียมูลค่าหรืออาจถูกปฏิเสธผลผลิตจากประเทศคู่ค้าเมื่อส่งออกไปแล้วได้ วิธีการตรวจสอบคุณภาพของผลผลิตเกษตรที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูงและสามารถทดแทนแรงงานคนได้ดี คือการใช้เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive techniques) ได้แก่ การวัดค่าทางแสงและสี การตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของผลไม้ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงมีความมุ่งหวังที่จะพัฒนาเทคนิคดังกล่าว เพื่อใช้กับการตรวจประเมินระยะการเจริญเติบโตของผลมะพร้าวอ่อนให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวของมะพร้าวอ่อนเพื่อเพิ่มคุณภาพผลผลิตให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบ สร้าง ทดสอบ ประเมินผลทางวิศวกรรม ต้นแบบเครื่องคัดขนาดผลชมพูเชิงการค้า
2. เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพ เสียง และแสง ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ต่อการจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน



การตรวจเอกสาร

1. การพัฒนาเครื่องกลัดขนาดผลชมพู

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของชมพู

ชมพู (Rose-Apple) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและต่อมาได้แพร่กระจายไปตามประเทศเขตร้อนทั่วไปโดยเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และไทย เป็นผลไม้ในสกุล *Eugenia* (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Eugenia javanica* Lamk วงศ์ *Myrtaceae* หรือ *Myrtle* ได้แก่ หว้า ชมพู หรือ ฝรั่ง เป็นต้น) เป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคผลสด และจัดได้ว่าเป็นผลไม้เพื่อสุขภาพอีกชนิดหนึ่ง เพราะมีสารอาหารต่างๆ ในปริมาณสูง (ตารางที่ 1) เนื่องจากมีโรคและแมลงรบกวนน้อย สารเคมีตกค้างก็มีน้อยมากเนื่องจากชาวสวนจะห่อผลตั้งแต่ชมพูยังมีขนาดเล็กซึ่งช่วยลดการปนและตกค้างของสารเคมีลงไปได้มาก (เปรมปรี, มปป)

ตารางที่ 1 ปริมาณสารอาหารในชมพูน้ำหนัก 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ
พลังงาน	24 kCal
โปรตีน	1.5 g
คาร์โบไฮเดรต	5.5 g
แคลเซียม	2 mg
ฟอสฟอรัส	18 mg
เหล็ก	0.3 mg
วิตามินซี	32 mg

ที่มา: เปรมปรี (มปป)

ชมพูที่นิยมปลูกในปัจจุบันมีอยู่หลายพันธุ์ ทั้งพันธุ์ที่เกิดจากการกลายพันธุ์หรือการผสมจากพันธุ์ภายในประเทศและพันธุ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ สำหรับชมพูพันธุ์เศรษฐกิจและพันธุ์ที่

น่าสนใจในปัจจุบันมีหลายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์เพชรสุวรรณ, ทูลเกล้า, เพชรสายรุ้ง, ทับทิมจันทร์, เพชรน้ำผึ้ง และทองสามสี (เปรมปรี, มปป) พันธุ์ชมพูที่ใช้ในการวิจัยมี 3 พันธุ์ดังนี้

พันธุ์ทูลเกล้า เป็นพันธุ์การค้าที่ได้รับความนิยมมานาน ไม่มีหลักฐานที่ชัดเจนว่าชมพูพันธุ์นี้เกิดที่สามพรานหรือนำเข้าจากอินโดนีเซีย คุณสมบัติเด่นของชมพูพันธุ์นี้คือ ออกดอกติดผลง่าย สามารถออกดอกได้หลังจากปลูกได้ 6 เดือน ดอกทยอยทั้งปี ให้ผลผลิตสูง ทูลเกล้าเป็นชมพูที่มีรูปทรงผลสวย ผลค่อนข้างยาว สีผลออกสีเขียวอมเหลือง แต่ในช่วงร้อนสีจะออกขาวซีด ความแน่นเนื้อ 6.5-7 N/mm ความหวานไม่สูงนัก ประมาณ 10 องศาบริกซ์ (นิค, 2545)

พันธุ์ทับทิมจันทร์ เป็นพันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในตลาด นำพันธุ์เข้าจากประเทศอินโดนีเซีย เดิมมีชื่อว่า ชิตร้า คุณสมบัติของผลผลิตโดดเด่นทั้งสีส้ม รูปทรง ขนาดผล รวมทั้งรสชาติที่หวาน อร่อยโดดเด่นกว่าชมพูพันธุ์อื่น โดยที่เป็นชมพูที่มีผลขนาดใหญ่ ความแน่นเนื้อสูง ปริมาณเนื้อมาก น้ำหนักดี ประมาณ 120-130 กรัมต่อผล หรือประมาณ 5-6 ผล/กิโลกรัม รสชาติอร่อย ความหวานสูง 12-13 องศาบริกซ์ ไม่มีเมล็ด รูปทรงผลสวยทรงระฆัง สีแดงเข้ม ผิวมันเป็นประกาย มีสันขึ้น เป็นแนวตามยาวของผล (นิค, 2545)

พันธุ์ทองสามสี เป็นชมพูพันธุ์ผสม ซึ่งได้นำกิ่งพันธุ์มาจากประเทศอินโดนีเซียมาผสมกับพันธุ์เพชรสามพราน โดยคุณลุง ทองสามสี อำเภอวัดเพลง จังหวัดราชบุรี อายุชมพู 3 ปี ผลผลิตได้ไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัมต่อต้น หากควบคุมบังคับการออกดอกติดผลในช่วงเดือนตุลาคม การเก็บเกี่ยวทยอยตั้งแต่เดือนมกราคม ซึ่งเป็นราคาผลไม้ในเทศกาลปีใหม่ และมีไปถึงตรุษจีน เกษตรกรจะเร่งให้ชมพูออกในเดือนนี้เป็นต้นไป ก่อนการเก็บเกี่ยวต้องงดการให้น้ำ 2 วัน เพื่อให้สภาพชมพูมีรสหวานตลอด คุณสมบัติของชมพูสายพันธุ์จากอินโดนีเซีย คือเก็บเกี่ยวง่าย สะดวกกว่าชมพูไทย และขนาดผลใหญ่กว่าชมพูพันธุ์ไทย ไม่เน่าเสียง่าย ราคาขายสูงถึงกิโลกรัมละ 80 บาท (นิค, 2545)

1.2 การเก็บเกี่ยวและการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว

หลังจากชมพูแก่อายุพร้อมที่จะเก็บเกี่ยว ควรจะเก็บเกี่ยวทันทีหากทิ้งไว้จะทำให้ผลแตกและเน่าเสีย การปฏิบัติในทุกขั้นตอนต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่าให้ผลช้ำหรือเกิดแผลขึ้น เพราะชมพูเป็นผลไม้ที่ผิวผลบางมาก จึงเน่าเสียได้ง่ายและเก็บรักษาได้ยากเมื่อถูกน้ำ ขั้นตอนการปฏิบัติมีดังนี้

1. การเก็บควรรู้ใช้กรรไกรตัดขั้ว โดยเก็บมาทั้งถุงที่ห่อเอาไว้ (ภาพที่ 1)
2. จากนั้นคัดแยกผลชมพูที่มีแผลแตก, ผลเน่าเสีย และผลที่ผิดปกติทรงออก หากมีฝุ่นหรือคราบดำต้องล้างออกด้วยน้ำสะอาดแล้วผึ่งให้แห้ง (ภาพที่ 2)
3. การคัดขนาดผลชมพูแต่ละพันธุ์ ถูกเรียกเป็นเกรดหรือเป็นเบอร์ตามขนาดกลุ่ม ในแต่ละพันธุ์หรือสวนหรือแหล่งจำหน่ายจะมีการคัดขนาดผลแตกต่างกันไปทั้งขนาดและการเรียกชื่อขนาดผลนั้นโดยทั่วไปจะคัดขนาดผลตามความรู้สึกที่เห็น เช่นอาจแบ่งเป็นผลขนาดใหญ่ กลางและเล็ก ชมพูแต่ละพันธุ์มีการคัดขนาดผลแตกต่างกัน (ทีมงานเฉพาะกิจ, 2546) โดยปกติจะแบ่งขนาดออกเป็น 3 ขนาด คือ จัมโบ้, ยอด และ พิเศษ หากชมพูตกรวด หรือมีตำหนิหรือแตกร้าว ในทั้ง 3 เกรดเจ้าของสวนจะนำไปขายยังตลาดท้องถิ่น ในราคาต่ำ การคัดขนาดนี้ทำโดยใช้คนคัด (ภาพที่ 3)
4. บรรจุลงตะกร้าพลาสติก หรือกล่องกระดาษ ชั่งน้ำหนักและบันทึก



ภาพที่ 1 การเก็บเกี่ยวผลชมพูในสวน



ภาพที่ 2 การคัดแยกผลชมพู่โดยเกษตรกร



ภาพที่ 3 การคัดขนาดชมพู่ด้วยแรงงานคน โดยวิธีการประมาณด้วยสายตา

ภายหลังจากการคัดแยกและคัดขนาดผลแล้ว ผลชมพูที่มีลักษณะดีและไม่มีรอยตำหนิ ซ้ำ หรือถลอกจะถูกหุ้มด้วยตาข่ายโฟมกันกระแทกทุกผลและบรรจุในตะกร้าพลาสติกเพื่อส่งจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศหรือห้างสรรพสินค้า ส่วนผลที่ผิดรูปทรงและมีตำหนิเล็กน้อยจะใส่ถุงพลาสติก ถุงละ 3 ผล โดยไม่มัดปากถุงแล้วจึงบรรจุลงในกล่องกระดาษเพื่อส่งขายในตลาดประจำท้องถิ่นต่อไป (ภาพที่ 4)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 (ก) การบรรจุภัณฑ์ชมพูเพื่อจำหน่ายในห้างสรรพสินค้าและตลาดต่างประเทศ (ข) การบรรจุภัณฑ์เพื่อส่งจำหน่ายในตลาดท้องถิ่น

1.3 การคัดขนาด

การคัดขนาดผลิตผล คือ การคัดเลือกผลิตผลเป็นช่วงต่างๆ กัน ซึ่งช่วงขนาดจะแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางชีววิทยา อากาศ และวิทยาการทางเขตกรรม (บัณฑิต, 2544) และการคัดขนาดทำขึ้นเพื่อให้ผู้ซื้อผู้ดีกว่าของมีคุณภาพดี (Sale appeal) ทั้งยังช่วยกำหนดราคาแตกต่างระหว่างของขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้ กำหนดปริมาณของผลผลิตได้ และกำหนดรูปแบบการบรรจุได้ ซึ่งตัวแปรในการคัดขนาดที่สำคัญ ได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว หรือทั้งสองอย่าง เส้นรอบรูป เส้น Projection ปริมาตร น้ำหนัก ในเครื่องคัดขนาดส่วนมาก ตัวแปรที่ใช้คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นผ่าศูนย์กลางร่วมกับความยาว และน้ำหนัก

1.4 เครื่องคัดขนาด

1. เครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกเจาะรู เป็นเครื่องคัดขนาดที่ใช้ความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของผลไม้เป็นเกณฑ์กำหนดขนาด ใช้คัดขนาดได้ดีกับผลไม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ลักษณะเครื่องจะประกอบด้วยตะแกรงทรงกระบอก 4-5 ลูก วางเรียงกัน ทรงกระบอกจะหมุนและลำเลียงผลไม้เปรียบเทียบกับขนาดรูตะแกรง สำหรับเครื่องคัดขนาดที่ใช้หลักการนี้ที่เห็นอยู่ทั่วไปได้แก่เครื่องคัดขนาดส้มเขียวหวาน (บัณฑิต, 2544)

บัณฑิต และคณะ (2531) ได้ทดสอบเครื่องคัดขนาดส้ม (ภาพที่ 5) ประกอบด้วยตะแกรงทรงกระบอก 5 อัน มีเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องตะแกรง 51, 56, 60, 67 และ 70 มม. สามารถคัดส้มเขียวหวานได้ 6 ขนาด ที่การทำงาน 1.5 ตัน/ชม. ประสิทธิภาพการคัดขนาด 87.5%

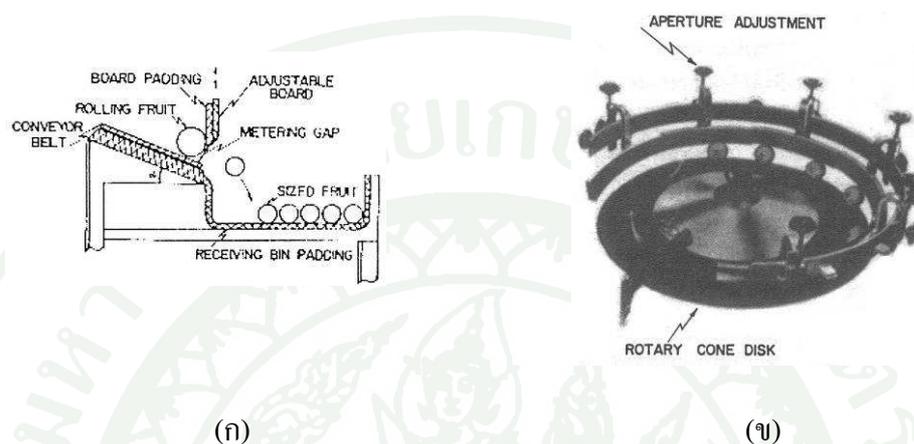


ภาพที่ 5 เครื่องคัดขนาดส้มเขียวหวานแบบตะแกรงทรงกระบอกเจาะรู

ที่มา: บัณฑิต (2549)

2. เครื่องคัดขนาดแบบสายพานและแผ่นกั้น ลักษณะของเครื่องประกอบด้วยสายพานลำเลียงวางในลักษณะด้านข้างทำมุม α กับแนวระดับ ซึ่งจะทำให้ผลไม้กลิ้งไปสู่แผ่นกั้น โดยแผ่นกั้นจะสามารถปรับระยะห่างจากสายพานในแนวตั้งได้ทำให้เกิดช่องคัดขนาด สายพานจะพาผลไม้ไปด้านหน้าและจะสอบเทียบขนาดผลไม้กับช่องคัด ซึ่งผลไม้ที่มีขนาดเล็กกว่าช่องนั้นจะตกลงก่อนช่องคัดขนาดนี้จะบานขยายออกเรื่อยๆ เพื่อคัดผลไม้ที่มีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 6ก) เครื่องคัดขนาดชนิด

นี้เหมาะกับการคัดขนาดผลไม้ทรงกลมเช่น เครื่องคัดขนาดแบบ Rotary Greefa ซึ่งใช้คัดขนาดมังคุด ได้ดัดแปลงโครงสร้างของเครื่องจากสายพานมาเป็นแผ่นรูปกรวย ผลไม้จะเคลื่อนที่เป็นวงกลม เส้นรอบรูปของมันประกอบด้วยแผ่นกั้นในแนวตั้งที่ปรับได้ เป็นตัวกำหนดช่อง (ภาพที่ 6)

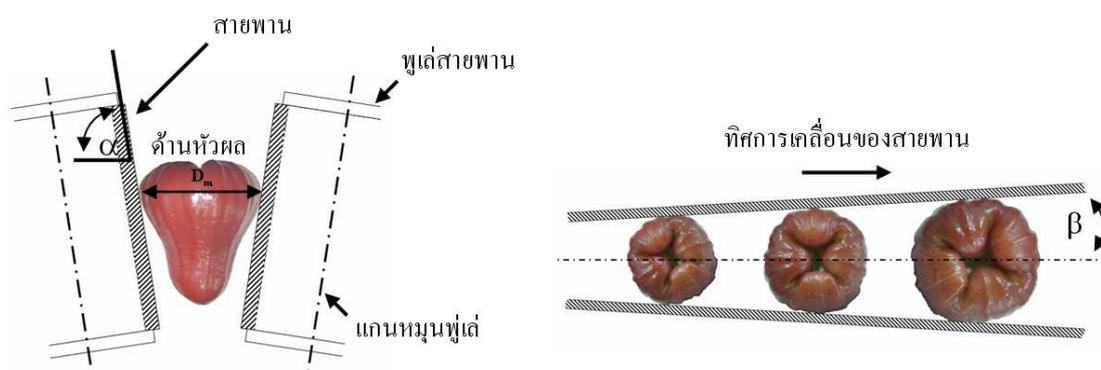


ภาพที่ 6 (ก) ภาคตัดขวางของเครื่องคัดขนาดแบบสายพานและแผ่นกั้น (ข) เครื่องคัดขนาดแบบ Greefa

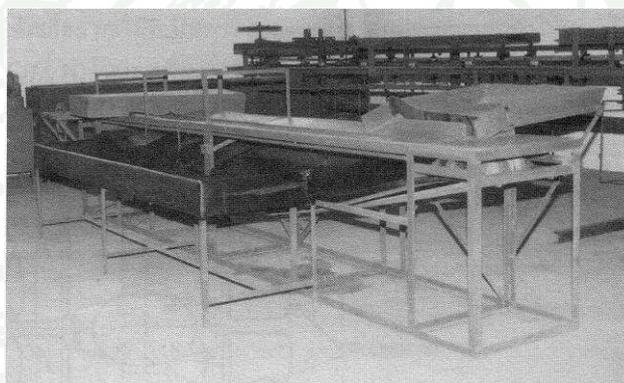
ที่มา: บัณฑิต (2544)

3. เครื่องคัดขนาดแบบสายพานบานออก เครื่องคัดขนาดมีลักษณะดังภาพที่ 7 ซ้าย ผลไม้จะเคลื่อนที่เป็นแถวเรียงเดียว ระหว่างสายพานลำเลียง 2 เส้นในลักษณะแบบตัววี ความลาดเอียงของสายพานน้อยจะทำให้เครื่องยาว และในทางตรงกันข้ามถ้าความลาดเอียงของสายพานมีมากเครื่องจะสั้นลงเพราะผลไม้เคลื่อนที่ระยะสั้นก็ถึงช่องคัดเกรด เมื่อผลไม้เคลื่อนที่ไปช่องคัดระหว่างสายพานก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ผลไม้ที่มีขนาดเล็กกว่าจะตกลงก่อน เครื่องคัดขนาดแบบนี้เหมาะสำหรับคัดขนาดลูกแพร์ ่อโวคาได้ หรือผลไม้รูปทรงแบบลูกแพร์

Jarimopas, *et al.* (1988) ได้ประยุกต์หลักการดังกล่าวมาพัฒนาเครื่องคัดขนาดมังคุด ดังภาพที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยสายพานบานออก 2 อัน วางเอียงเข้าหากันมีความลาดเอียง 25 องศา ยาว 4 เมตร สามารถคัดขนาดได้ 3 เกรด คือ Extra, A และ B สมรรถนะของเครื่องเท่ากับ 1,100 กก/ชม. ที่ประสิทธิภาพการคัดขนาด 80% ข้อดีของเครื่องคือใช้งานง่าย สะดวก ใช้ผู้ปฏิบัติงานเพียง 1 คน ข้อเสียคือ สายพานไม่เรียบทำให้ช่องขนาดไม่คงที่ ส่งผลให้การคัดขนาดเกิดความผิดพลาดขึ้นได้



ภาพที่ 7 ลักษณะการคัขนาดแบบสายพานบานออก



ภาพที่ 8 เครื่องคัขนาดมังกุดแบบสายพานบานออก

ที่มา: Jarimopas *et al.* (1988)

ปิยดา และอภิชาติ (2547) ได้พัฒนาเครื่องคัขนาดชมพูแบบสายพานบานออกพบว่าชมพูพันธุ์ทุลเกล้าและทับทิมจันทร์ มีความสามารถในการคัและประสิทธิภาพการคัที่ 357.41 กก./ชม., 516.97 กก./ชม. และ 89.12%, 93.26% ตามลำดับ ตัวเครื่องใช้มุมเอียงสายพาน 75 องศา ข้อเสียคือไม่สามารถคัขนาดชมพูที่ความเร็วรอบมากกว่า 350 รอบ/นาทีได้ เนื่องจากเกิดการสั่นคลอนที่เพลาขับสายพานด้านหัวเครื่องสูง และความสูงจากสายพานคัขนาดถึงถาดรองรับผลชมพูมากเกินไป ทำให้เกิดความเสียหายง่าย

2. เทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของมะพร้าวอ่อน

2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะพร้าว

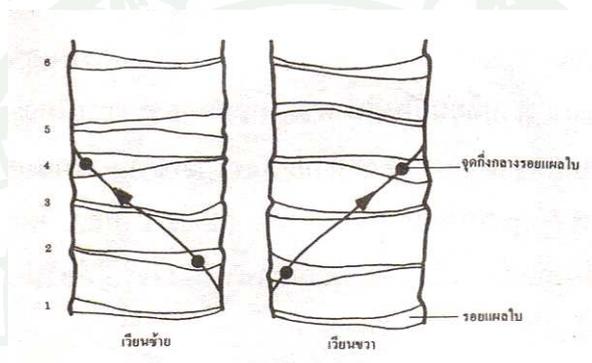
มะพร้าวเป็นพืชในสกุล *Arecaceae* (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera* Linn) เป็นพันธุ์ไม้เก่าแก่ของโลกชนิดหนึ่ง เป็นพืชในวงศ์ปาล์ม (Family Palmae) มีสกุล (Genus) ต่าง ๆ ประมาณ 27 สกุล (ณรงค์, 2530) มะพร้าวเป็นพืชที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์มาก ปลูกได้แทบทุกภาคของประเทศ สามารถใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่รากจนถึงยอด โดยจั่นหรือช่อดอก ใช้ทำน้ำตาลมะพร้าว สำหรับบริโภคสด หรือเคี้ยวเป็นน้ำตาลได้ น้ำและเนื้อมะพร้าวเมื่ออ่อนใช้รับประทาน พอแก่นำเนื้อมาขูดฝอยทำขนมหรือคั้นทำน้ำกะทิ ใช้ทำอาหารได้ทั้งคาวและหวาน เนื้อมะพร้าวแห้งใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันมะพร้าว ใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆ หรือจะใช้ทำเนยเทียม สบู่ น้ำมันหล่อลื่น ฯลฯ กากเนื้อที่เหลือใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ และวัสดุเพาะเชื้อราในอุตสาหกรรมยาได้ดี เปลือกหรือกาบมะพร้าว นำมาแยกเอาเส้นใย ใช้ทำเชือกที่มีคุณภาพดี หรือใช้ทำแปรงถูบ้าน พรหมเช็ดเท้า ไม้กวาด ทำเบาะหรือที่นอน ขุยที่แยกออกใช้เป็นวัสดุเพาะชำต้นไม้ได้ดี กะลามะพร้าวมีประโยชน์มากเช่นกัน นอกจากใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนสูงแล้ว ยังใช้เป็นวัสดุในงานหัตถกรรมต่างๆ และทำเครื่องดนตรีไทย เช่น ซออู้ กะลามะพร้าวที่เผาเป็นถ่านแล้วเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในเครื่องกรองและหน้ากากกรองสารพิษได้เป็นอย่างดี ลำต้นแก่ใช้เป็นไม้ในงานก่อสร้างต่างๆ ยอดอ่อนใช้ประกอบอาหาร ส่วนของใบใช้ห่อขนมหรืออาหารได้ หรือใช้เป็นวัสดุคลุมหลังคาหรือวัสดุคลุมดิน ก้านใบใช้ทำไม้กวาด ไม้กีด ไม้จิ้มผลไม้ รากและเยื่อใบใช้ทำสีย้อมผ้าและใช้เป็นยาสมุนไพรแก้เจ็บคอและปวดฟันได้ (ศักดิ์สิทธิ์, 2533)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาประกอบไปด้วย

1. ลำต้น (Stem)

มะพร้าวมีลำต้นสูงชูด, มักจะโค้งเล็กน้อย, ความสูงเมื่อโตเต็มที่แล้วแต่กลุ่มพันธุ์, ตั้งแต่ 8-10 เมตร (ต้นเตี้ย) จนถึง 15-20 เมตร (ต้นสูง) เป็นลำต้นเดี่ยว ไม่มีกิ่งก้าน เพราะปราศจากตาข้าง (Lateral bud) เมื่อเกิดบาดแผล ลำต้นจะไม่สามารถรักษาแผลได้ เพราะภายในต้นไม่มีเนื้อเยื่อเจริญ (Cambium) มีตายอด (Apical meristem) เพียงตาเดียวที่จะเจริญเติบโตเพิ่มความสูงขึ้นไปเรื่อยๆ พร้อมทั้งสร้างอวัยวะอื่นๆ หากตายอดนี้ถูกทำลาย ต้นมะพร้าวต้นนั้นก็จะตาย บริเวณ

โคนต้นเรียกว่า สะโพก (Bole) ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์ของกลุ่มพันธุ์ต้นสูง ตามลำต้นจะมีรอยแผลใบ (Leaf scar) ที่เกิดจากการที่ใบร่วงหล่นไป รอยแผลใบนี้อาจใช้คำนวณอายุของต้นมะพร้าวได้ กล่าวคือ โดยทั่วไปมะพร้าวจะเกิดใบ 12-14 ใบต่อปี ดังนั้น อายุของมะพร้าวจึงเท่ากับจำนวนรอยแผลใบบวกกับจำนวนใบที่มีอยู่ในขณะนั้น หากด้วย 12 หรือ 14 รอยแผลใบนี้อาจเวียนขวา (Counter clockwise) หรือเวียนซ้าย (Clockwise) ก็ได้ สังเกตได้จากการลากจุดกึ่งกลางรอยแผลของใบที่สามที่อยู่ถัดขึ้นไป (ใบที่อ่อนกว่า) ดังภาพที่ 9 ถ้าเส้นเชื่อมต่อเนื่องกันไปทางใด แสดงว่าใบเวียนไปทางนั้น ในกรณีเวียนขวา ทะลายจะออกทางซ้ายของใบที่รองรับทะลาย ถ้าเวียนซ้ายก็จะออกทางขวา (ณรงค์, 2530)



ภาพที่ 9 การเวียนซ้ายหรือเวียนขวาของใบมะพร้าว

ที่มา: ณรงค์ (2530)

2. ใบ (Leaf)

ใบมะพร้าวเป็นใบรวม (Feather leaf) ประกอบด้วยก้านใบ (Rachis) และใบย่อย (Leaflet) จำนวน 200-300 ใบ, ออกเป็นคู่ ใบยาวประมาณ 4.5-6.0 เมตร ใบอ่อนเกิดขึ้นจากใจกลางของลำต้น มีลักษณะยาวเรียวคล้ายดาบ, มีกาบใบหุ้มอยู่ในระยะที่ยังอ่อนอยู่ เมื่อมีอายุมากขึ้นและใบย่อยขยายแผ่กว้างขึ้น ใบจะค่อยๆ เอนออกจากใจกลางต้น, แล้วโน้มต่ำลงเรื่อยๆ ตามอายุ การเกิดใบจากลำต้นมีการเรียงตัว (Phyllotaxy) เป็นเกลียวเวียนซ้ายหรือขวา โดยมีจำนวนใบ 5 ใบต่อ 1 รอบลำต้น

3. ราก (Root)

มะพร้าวไม่มีระบบรากแก้ว แต่เป็นรากแบบ Adventitious root ซึ่งมีขนาดเท่าๆกัน (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ซม.) เจริญออกจากโคนต้นตามแนวราบในระดับลึกประมาณ 50-90 ซม. โดยเฉลี่ยมะพร้าวต้นหนึ่งจะมีรากประมาณ 4,000-7,000 ราก และแผ่นออกรอบลำต้นในรัศมีประมาณ 6 เมตร ถ้ารากเหล่านี้ได้รับอันตรายจะแตกรากแขนงได้ และมีขนาดเท่ากับรากเดิม จากรากเหล่านี้มีรากขนาดเล็ก (Rootlet) จำนวนมากแตกแขนงออกเพื่อช่วยในการดูดน้ำและอาหาร มะพร้าวไม่มีรากขนอ่อน (Root hair) ดังเช่นรากพืชชนิดอื่นๆ นอกจากรากเหล่านี้แล้ว มะพร้าวยังมีรากอากาศ (Pneumatophore) เพื่อช่วยลำเลียงอากาศบนผิวดินลงสู่รากใต้ผิวดิน

4. ช่อดอก (Inflorescence)

ช่อดอกของมะพร้าวจะเกิดเหนือก้านใบที่ติดกับลำต้น โดยปรกติเมื่อมะพร้าวถึงวัยที่จะออกดอกได้ จะเกิดช่อดอกจากมุมใบ (Leaf axil) ดังนั้น อัตราการเกิดใบจึงเป็นตัวบ่งถึงปริมาณช่อดอก (และผลผลิต) ของมะพร้าว ฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของใบ มะพร้าวเป็นพืชประเภท Monoecious กล่าวคือมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียแยกกันอยู่คนละดอก แต่เกิดอยู่บนต้นเดียวกัน (และช่อดอกเดียวกันด้วย) ช่อดอกของมะพร้าวเป็นแบบ Panicle ซึ่งประกอบด้วย แกนกลาง (Rachis) และก้านย่อย (Rachilla) แยกออกจากแกนกลาง ชาวสวนนิยมเรียกก้านย่อยนี้ว่า ระแงะหรือ หางหนู ช่อดอกของมะพร้าวมีชื่อเรียกทางวิชาการว่า Spadix (ชาวสวนเรียกจั่น) มีความยาว 0.75-2.00 เมตร เมื่อแรกเกิด, มีกาบหุ้ม ต่อมากาบจะโค้งออกและค่อยๆแตกออกเพื่อเปิดช่อดอกให้เจริญขยายตัวออกไป

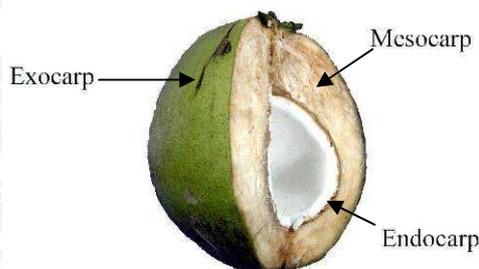
5. ผล (Fruit)

เมื่อมีการผสมเกสร ดอกตัวเมียจะพัฒนาขึ้นเป็นผล ผลมะพร้าวเป็นแบบ Fibrous drupe (นิยมเรียกว่า Nut) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ Exocarp (หรือ Epicarp), Mesocarp และ Endocarp

Exocarp คือ เปลือกนอกสุดของผลเป็นแผ่นของเส้นใยที่เหนียวและแข็ง เมื่อผลแก่จะมีสีเขียว แดง หรือเหลืองตามลักษณะประจำพันธุ์ สำหรับผลที่แก่และแห้งจัดจะมีสีน้ำตาลเข้ม

Mesocarp เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากเปลือกนอกเข้ามา เมื่อผลยังอ่อนมีลักษณะอ่อนนุ่ม บางพันธุ้อาจมีรสหวานรับประทานได้ แต่เมื่อผลแก่จะกลายเป็นชั้นของเส้นใยเรียกว่า กาบมะพร้าว (Coir) ซึ่งชั้นนี้จะหนาประมาณ 4-8 เซนติเมตร (ตามแต่พันธุ์)

Endocarp เป็นชั้นในสุดที่มีกาบมะพร้าวหุ้มล้อมรอบ เมื่อผลแก่จะมีลักษณะแข็งสีน้ำตาลดำ ที่เรียกว่า กะลา (Husk หรือ Shell) ซึ่งผิวด้านนอกของกะลาจะมีสันนูน 3 สัน ที่กะลาด้านที่อยู่ทางซ้ายของผลจะมีตาอยู่ 3 ตา Carpel ละ 1 ตา โดยมีตาแข็ง 2 ตา และตานิ่มอันใหญ่ 1 ตา ตานิ่มนี้จะอยู่บนส่วนของกะลาอันใหญ่ที่สุด เมื่อมะพร้าววางอกหน้าออกมา คันอ่อนจะแทงทะลุผ่านตานิ่มอันนี้ (ธนรัตน์, 2550) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว

ที่มา: ญัฐพงศ์ (2545)

6. เมล็ด (Seed)

คือส่วนของผลทั้งหมดที่อยู่ในกะลา นับตั้งแต่แผ่นเยื่อบางๆ (แต่แข็ง) สีน้ำตาลและน้ำมะพร้าว (Liquid endosperm) เนื้อมะพร้าวมีสีขาว เมื่อผลยังอ่อนอยู่จะบางและอ่อนนิ่ม มีรสหวาน แต่พอผลแก่ เนื้อจะแข็ง หนา 4-20 มม. และมีน้ำมันสะสมอยู่มาก น้ำมะพร้าวเป็นน้ำที่มีคุณค่าทางอาหารและมีรสชาติดี โดยเฉพาะในบางพันธุ์ สิ่งสำคัญที่สุดที่อยู่ในเมล็ดก็คือ คัพพะ (Embryo) ซึ่งเป็นอวัยวะแทรกตัวอยู่ในเนื้อตานิ่มมีขนาดเล็กและมีสีเหลืองอ่อน

2.2 พันธุ์มะพร้าวอ่อน

มะพร้าวอ่อนที่นิยมบริโภคจัดเป็นพันธุ์กลุ่มมะพร้าวต้นเตี้ย มีลำต้นเล็กไม่มีสะโพกทางใบสั้น พุ่มใบเล็ก โตเต็มที่ต้นสูงไม่เกิน 12 เมตร ให้ผลดกถึง 120ผล/ต้น/ปี ผลตกเร็ว เริ่มออกผลเมื่อมีอายุประมาณ 3 ปีหลังปลูก ไม่ค่อยกลายพันธุ์เพราะมีโอกาสผสมตัวเองมาก มีผลเล็ก นิยมรับประทานผลอ่อน เนื้อและน้ำรสดี บางชนิดมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น น้ำหอม ผลทิ้งไว้จนแก่เนื้อจะบาง ขายไม่ได้ราคา และไม่เหมาะในการใช้ในงานอุตสาหกรรม (ศักดิ์สิทธิ์, 2533) มะพร้าวในกลุ่มนี้ได้แก่ นกคุ้ม หมูสีเขียว ทุ่งเคล็ด ปะทิว น้ำหอม น้ำหวาน หมูสีเหลือง กะทิ และนาฬิกา (พานิชย์, 2544)

สำหรับมะพร้าวน้ำหอม ส่วนใหญ่จะไม่น้ำหวาน ต้องปล่อยให้อายุของผลมากขึ้นจนเนื้อหนาจึงมีรสหวาน เหมาะต่อการแปรรูปเป็นมะพร้าวเผา ขนาดของผลเมื่อเปรียบเทียบกับมะพร้าวอ่อนด้วยกันแล้วมีผลใหญ่กว่า ผลผลิตน้อยกว่าพันธุ์น้ำหวาน ความหอมของมะพร้าวน้ำหอมซึ่งไม่พบในมะพร้าวอ่อนทั่วไป จึงเป็นที่นิยมบริโภค เมื่อพิจารณาส่วนต่างๆ ของมะพร้าวน้ำหอม พบว่ามีส่วนที่เราสามารถทดสอบความหอมได้ เช่น ปลายรากอ่อนของหน่อมะพร้าว, กะลาของผลอ่อน, น้ำและเนื้อมะพร้าว และในส่วนอื่นๆของมะพร้าว เนื่องจากสารหอมระเหยจะเกิดในเนื้อเยื่อต่างๆ ของพืชด้วย (พานิชย์, 2544) ในมะพร้าวน้ำหอมด้วยกันยังแยกเป็นชนิดได้อีก 3 ชนิด (กลุ่มเกษตรสัญจร, 2531) มีลักษณะและขนาดของผลแตกต่างกัน ส่วนความหวานและความหอมของน้ำใกล้เคียงกัน ไม่มีชนิดใดเหนือกว่าอย่างชัดเจน มะพร้าวน้ำหอมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่

1. มะพร้าวน้ำหอมชนิดผลยาวหรือผลเล็ก มะพร้าวน้ำหอมชนิดนี้มีขนาดผลเล็ก ลักษณะผลยาวรี ผลภายในห้ท้ายแหลม ทรงผลไม่สวยงาม

2. มะพร้าวน้ำหอมชนิดผลกลม มะพร้าวน้ำหอมชนิดนี้มีขนาดผลใหญ่ที่สุดในบรรดามะพร้าวน้ำหอมด้วยกันคือใหญ่ทั้งขนาดภายนอกและขนาดภายใน มะพร้าวชนิดนี้มีผลกลม มีเปลือกบางกว่ามะพร้าวน้ำหอมชนิดอื่น ปัจจุบันนิยมผลิตมะพร้าวชนิดนี้มาก เนื่องจากตัดแต่งผลได้ง่ายและสวยงามกว่ามะพร้าวน้ำหอมชนิดอื่น ๆ

3. มะพร้าวน้ำหอมชนิดผลรีหรือชนิดก้นจีบ เป็นมะพร้าวน้ำหอมที่มีลักษณะกึ่งกลางระหว่างมะพร้าวผลยาวกับมะพร้าวผลกลม ขนาดผลของมะพร้าวน้ำหอมชนิดก้นจีบมีขนาดใหญ่พอสมควร แต่เล็กกว่าพันธุ์ลูกผสมเล็กน้อย

2.3 การพัฒนาของผลมะพร้าวอ่อนและการเก็บเกี่ยว

การติดผลของดอกมะพร้าว จำนวนดอกตัวเมียของจันทมะพร้าวอาจพบตั้งแต่น้อยกว่า 10 ดอก จนกระทั่งมากกว่า 40 ดอกต่อจันท ทั้งนี้ขึ้นกับความสมบูรณ์ของต้นมะพร้าว ฤดูกาลและพันธุ์มะพร้าวต้นเตี้ยจะมีดอกตัวเมียส่วนหนึ่งผสมกับละอองเกสรตัวผู้ภายในจันทเดียวกันทำให้ไม่กลายพันธุ์ ซึ่งการกลายพันธุ์จะมากหรือน้อยขึ้นกับพันธุ์ของมะพร้าวเองด้วย เช่น มะพร้าวน้ำหอมผลสีเขียวและสีน้ำตาล จะมีช่วงการบานของดอกตัวเมีย (Female phase) ประมาณ 2-3 วัน แต่มะพร้าวน้ำหอมผลสีเหลืองจะมีช่วงการบานของดอกตัวเมียนานกว่า คือประมาณ 1 สัปดาห์ ดังนั้นการกลายพันธุ์ของมะพร้าวน้ำหอมผลสีเหลืองจะมีน้อยกว่าพันธุ์อื่นๆ จากการศึกษามะพร้าว น้ำหอมผลสีเขียว พบว่าดอกตัวเมียจะเจริญเป็นผลได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ (ภายหลังจากดอกบานและได้รับการผสมเกสรแล้ว 3 เดือน) หลังจากนั้นจะถึงระยะเก็บเกี่ยวผลอ่อนมีโอกาสร่วงได้อีกจากสาเหตุต่างๆ 5-10 เปอร์เซ็นต์ และในผลที่เก็บเกี่ยวมาแล้วอาจพบว่าไม่สมบูรณ์อีก 5-10 เปอร์เซ็นต์ เช่น ผลลี ผลเล็กผิดปกติ ผลไม่มีเนื้อมีแต่น้ำที่มีรสเปรี้ยว เป็นต้น (พานิชย์, 2544)

การพัฒนาของผล ดอกตัวเมียของจันทมะพร้าว ภายหลังจากได้รับการผสมเกสรจะเจริญเติบโตไปเรื่อยๆ จนครบเวลา 11-12 เดือน ผลจึงแก่ แต่การบริโภคผลอ่อนจะต้องเก็บเกี่ยวในช่วงที่กำลังพอเหมาะ คือ น้ำมีรสหวานและเนื้ออ่อนนุ่มกำลังรับประทาน เมื่อผลอ่อนมีอายุประมาณ 22 สัปดาห์ จะเริ่มสร้างเนื้อเป็นวุ้นบางจากด้านตรงข้ามกับขั้วผล ผลระยะนี้ยังไม่หวาน ระยะที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวคือ ผลอ่อนมีอายุนับจากจันทบานประมาณ 26 สัปดาห์ เป็นระยะที่น้ำมีรสหวานและเนื้ออ่อนนุ่ม สามารถบริโภคเนื้อได้ทั้งผล หลังจากนั้นเมื่ออายุมากขึ้นน้ำอาจมีรสหวานเพิ่มขึ้นแต่เนื้อมะพร้าวจะหนาเกินไป เมื่อผลมะพร้าวมีอายุมากขึ้นเรื่อยๆ ความหวานของน้ำมะพร้าวจะลดลงจนกระทั่งผลแก่เต็มที่ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การพัฒนาของผลมะพร้าวน้ำหอม

อายุนับจากจันทันบาน	เนื้อมะพร้าว	น้ำมะพร้าว	^o Brix ของน้ำ
20 สัปดาห์	ไม่มีเนื้อ กะลาแข็งอ่อน	รสอมเปรี้ยว	4.6
22 สัปดาห์	เป็นวุ้นบาง ประมาณ 1/3 ผล กะลาเริ่มแข็งขึ้น	ไม่หวาน	4.6
23 สัปดาห์	เป็นวุ้นบาง ประมาณ 1/2 ผล	มีรสหวานเล็กน้อย	5.0-5.6
24 สัปดาห์	เป็นวุ้นบางเต็มผล มีกลิ่นหอม	มีรสหวานเล็กน้อย	5.6
25 สัปดาห์	เป็นเนื้อนุ่มประมาณ 1/2 ผล	หวานไม่มาก	6.0
26 สัปดาห์	เนื้อนุ่มสามารถบริโภคได้ทั้งผล	หวาน	7.0
27 สัปดาห์	บริเวณตรงข้ามหัวผลเนื้อเริ่ม หนาขึ้นเล็กน้อย	หวาน	7.0
28 สัปดาห์	เป็นเนื้อหนาประมาณ 1/2 ผล	หวาน	7.0
30 สัปดาห์	เนื้อหนาเต็มผล ไม่เหมาะ สำหรับบริโภค	หวานมาก	7.6-8.0
31 - 35 สัปดาห์	เนื้อจะหนาขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับ เริ่มสร้างคัพกะ	หวานมาก	7.6-8.0
36 สัปดาห์	-	มีรสซ่าและมีไขมัน ปะปนในน้ำมะพร้าว	7.6-8.0
38 สัปดาห์ - แก่จัด	-	ความหวานเริ่มลดลง	-

ที่มา: พานิชย์ (2544)

ลักษณะการเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อน การเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อนในระยะเวลาที่เหมาะสมจะได้ผลมะพร้าวที่มีคุณภาพดี คือ น้ำมีรสหวาน (พานิชย์,2544) และเนื้อนุ่มเหมาะสำหรับรับประทานในการเก็บเกี่ยวชาวสวนจะแบ่งผลมะพร้าวออกเป็น 3 ประเภทโดยดูจากความหนาของเนื้อเป็นเกณฑ์ คือ

1. มะพร้าวชั้นเดียว ผลมะพร้าวมีอายุหลังจากจั่นบานประมาณ 170 วัน น้ำมะพร้าวยังไม่หวาน วัดความหวานได้ประมาณ 5.0 – 5.6 เปอร์เซ็นต์บrix มะพร้าวเริ่มจะสร้างเนื้อภายในกะลา การเกิดเนื้อมะพร้าวจะเกิดบริเวณก้นผลก่อน แล้วจะหนาขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงหัวผล เนื้อจะมีลักษณะเป็นวุ้นบางๆ ประมาณครึ่งผล เมื่อเปิดส่วนก้นแล้วมองลงไปตรงๆ ไปที่ส่วนหัวของมะพร้าวจะมองเห็นกะลาสีเหลืองอ่อนได้อย่างชัดเจน ไม่เหมาะในการบริโภค

2. มะพร้าวชั้นครึ่ง ผลมะพร้าวมีอายุหลังจากจั่นบานประมาณ 180 – 185 วัน น้ำเริ่มหวานขึ้น วัดความหวานได้ประมาณ 6.0 – 6.6 เปอร์เซ็นต์บrix มะพร้าวเริ่มสร้างเนื้อมากขึ้นจนเกือบเต็มกะลา แต่บริเวณส่วนชั้นของผลยังคงมีลักษณะเป็นวุ้นอยู่บ้าง มะพร้าวชนิดนี้ยังถือว่าอ่อน ไม่เหมาะแก่การขายทั้งผล แต่เหมาะสำหรับบรรจุแก้วใส่ในตู้เย็น ชนิดที่แต่ละแก้วมีทั้งน้ำทั้งเนื้ออยู่ด้วยกัน อย่างไรก็ตามมีผู้บริโภคบางรายชอบบริโภคมะพร้าวแบบชั้นครึ่งนี้เหมือนกัน

3. มะพร้าวสองชั้น ผลมีอายุหลังจากจั่นบานประมาณ 200 – 210 วัน น้ำมีรสหวาน วัดความหวานได้ 6.6 – 7.0 เปอร์เซ็นต์บrix มะพร้าวที่มีเนื้อหนาอ่อนนุ่ม เต็มผลแต่ยังไม่แก่จนเกินไป หรือไม่แก่จนเนื้อภายในแข็ง สามารถบริโภคเนื้อได้ทั้งผล ส่วนใหญ่ชาวสวนจะเก็บเกี่ยวมะพร้าวในช่วงนี้

2.4 ดัชนีการเก็บเกี่ยวมะพร้าว

วิธีการสังเกตอายุการเก็บเกี่ยวมะพร้าวที่เหมาะสม (กลุ่มเกษตรสัญจร, 2531) ได้แก่

1. นับทะลาย นับทะลายที่จะเก็บเกี่ยวเป็นทะลายที่หนึ่ง แล้วนับทะลายที่ออกตามมาเป็นทะลายที่สองและสามไปเรื่อยๆ เมื่อจั่นที่ 12 แทงออกและกาบหุ้มยังไม่แตกเป็นระยะที่มะพร้าวทะลายแรกอยู่ในช่วงที่อ่อนกำลังดี

2. สังเกตจากหางหนู มะพร้าวที่มีอายุผลมาก จนกะลาเริ่มสีดำหางหนูจะแห้งตั้งแต่ขั้วผลไปจนจดปลาย มะพร้าวอ่อนหางหนูแห้งครึ่งหนึ่ง ส่วนอีกครึ่งหนึ่งยังสดอยู่ วิธีนี้อาจคลาดเคลื่อนได้ในฤดูร้อนที่แดดจัดมากๆ เพราะหางหนูอาจแห้งก่อนกำหนด

3. สังเกตจากสีผล บริเวณรอยต่อของขั้วกับตัวผลของผลมะพร้าวอ่อนจะมีสีขาวเป็นวงรอบขั้วผล ถ้าสีขาวยังเป็นวงกว้างก็แสดงว่ามะพร้าวยังอ่อนอยู่มาก ต่อเมื่อส่วนสีขาวบริเวณรอยต่อเหลือเพียงเล็กน้อยพอเป็นวงรอบขั้วก็แสดงว่าได้ระยะเก็บเกี่ยวพอดี



ภาพที่ 11 การสังเกตสีของผลมะพร้าว

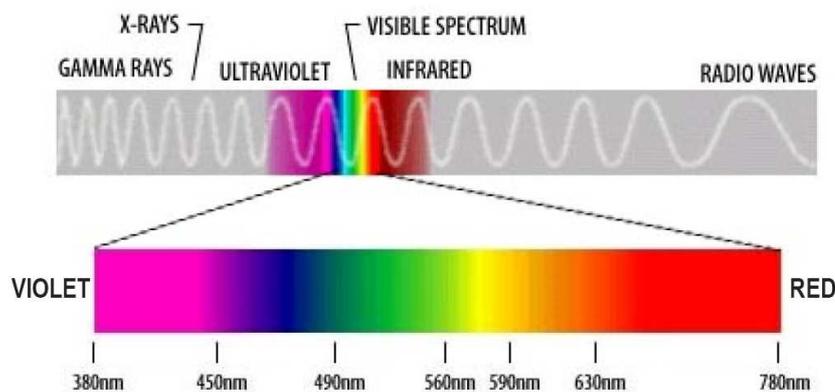
ที่มา: ธนรัตน์ (2550)

2.5 คุณสมบัติเชิงแสงของผลิตภัณฑ์เกษตร

แสง (Light) คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic) ชนิดหนึ่ง ที่กระจายอยู่ทุกอนุในธรรมชาติรอบตัวเรา มีความยาวคลื่นใช้หน่วยนับเป็นนาโนเมตร (Nanometer: nm) ในแต่ละช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยแสงและรังสีที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้มากมาย ได้แก่ รังสีแกมมา (Gamma Rays), รังสีเอกซ์ (X-Rays), แสงอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet), แสงสีที่มองเห็นได้ (Visible Color), แสงอินฟราเรด (Infrared), คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) (บัณฑิต, 2546)

คลื่นเหล่านี้เรียกรวมว่า Electromagnetic Spectrum โดยแต่ละคลื่นมีความยาวคลื่นต่างกัน คลื่นวิทยุมีความยาวที่สุด ตั้งแต่ 1 มม. ถึงหลายกิโลเมตรและรังสีแกมมามีความยาวน้อยที่สุด คือมีความยาวน้อยกว่า 0.1 นาโนเมตร ตาของมนุษย์สามารถรับรู้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วงแคบๆ คือช่วงระหว่าง 780 - 380 นาโนเมตร เรียกช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible Spectrum / Visible Light) หรือ แสง (Light) นั่นเอง แสงที่มนุษย์มองเห็นนี้ เห็นเป็นแสงสีขาว (Light White) ซึ่งประกอบไปด้วยสี 7 สีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน คือ สีม่วง (Violet) 380 - 450 nm, สีน้ำเงิน (Blue) 450 - 490 nm,

สีเขียว (Green) 490 - 560 nm, สีเหลือง (Yellow) 560 - 590 nm, สีส้ม (Orange) 590 - 630 nm และ สีแดง (Red) 630 - 780 nm. ดังภาพที่ 12



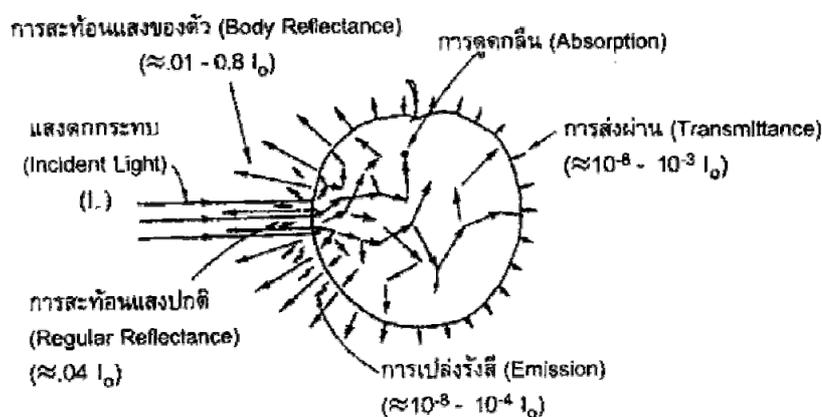
ภาพที่ 12 ความยาวคลื่นต่างๆของแสงสีที่มองเห็น

เมื่อลำแสงสว่างตกลงบนวัตถุหนึ่ง ส่วนหนึ่งของลำแสงตกกระทบถูกสะท้อนโดยพื้นผิวของวัตถุนั้น ส่วนที่เหลือถูกส่งผ่านเข้าไปในวัตถุที่ซึ่งถ้าไม่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุ ก็อาจจะถูกสะท้อนกลับไปสู่พื้นผิว (การสะท้อนของตัว, Body reflectance) หรือการส่งผ่านวัตถุออกไป ส่วนของรังสีแสงที่ถูกดูดกลืนอาจจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบรังสีอื่น เช่น แสงฟลูออเรสเซนซ์ การเปล่งรังสีแสงสว่างล่าช้า (Delayed-light emission) ซึ่งหมายถึง แสงสว่างที่ถูกปล่อยจากตัวอย่างหลังจากเอาต้นกำเนิดแสงออกไปแล้ว ปริมาณของพลังงานแสงในการสะท้อน การส่งผ่าน การดูดกลืน การเปล่งรังสี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุและรังสีตกกระทบ ดังนั้น การหาคุณลักษณะเชิงแสงของวัตถุสามารถจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุนั้นได้ (บัณฑิต, 2546)

1. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงและวัสดุเกษตร

วัสดุเกษตรส่วนมากไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะประกอบด้วยผนังกัน (Interface) ภายในอันเล็กๆ มากมาย แสงสว่างที่เข้าไปในวัสดุนั้นจะกระจายในทุกทิศทาง (ภาพที่ 13) เมื่อลำแสงสว่างอันหนึ่งตกกระทบผลไม้ประมาณ 4% ของรังสีตกกระทบถูกสะท้อนกลับออกมาจากผิวผลไม้เป็นการสะท้อนแสงปกติ รังสีที่เหลือเดินทางผ่านผิวผลไม้และชนกับผนังกันเล็กๆ ในโครงสร้างเซลล์และกระจายไปทุกทิศทาง ส่วนใหญ่ของรังสีจะกระจายกลับออกไปสู่ผิวผลไม้และออกจากผลไม้ในบริเวณที่แสงตกกระทบสำหรับการสะท้อนแบบนี้ Birth (1976) เรียกว่า การ

สะท้อนของตัวแสงที่กระจัดกระจาย ที่เหลือจะแพร่ลึกเข้าไปในผลไม้ และสุดท้ายอาจจะออกไปถึงผิวผลไม้ อีกด้านที่ ห่างจากจุดกระทบออกไป ในขณะที่แสงเดินทางผ่านผลไม้ ปริมาณแสงจำนวนหนึ่งจะถูกดูดกลืนโดยส่วนประกอบต่างๆ ของผลไม้ การดูดกลืนจะแปรผันกับส่วนประกอบของผลไม้ ความยาวคลื่น และความยาวของการเดินทางของแสง พลังงานดูดกลืนถูกแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นกับวัสดุบางอย่าง ส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืนอาจถูกแปลงเป็นแสงฟลูออเรสเซนซ์ การเปล่งรังสีแสงสว่างล่าช้า ดังนั้น รังสีแสงที่ออกจากผิวของผลไม้ อาจประกอบด้วย การสะท้อนแสงปกติ การสะท้อนแสงของตัว การส่งผ่านและการเปล่งรังสี

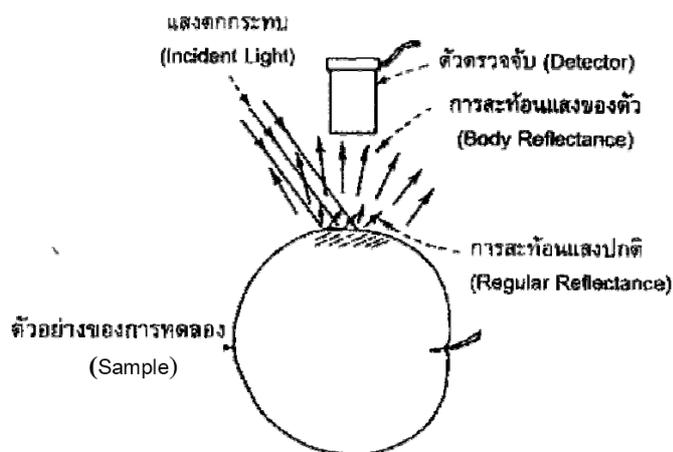


ภาพที่ 13 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงและผลไม้

ที่มา: บัณฑิต (2546)

2. ตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่าง และเครื่องตรวจจับ

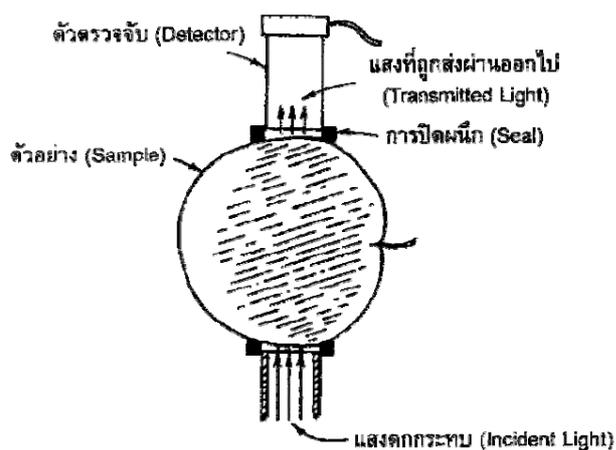
ในการวัดปัจจัยที่เกี่ยวกับคุณภาพ ณ บริเวณหนึ่ง ๆ ของตัวอย่าง จำเป็นต้องระบุตำแหน่งต้นกำเนิดแสง ตัวอย่างและตัวตรวจจับแสง เพื่อให้แสงส่วนใหญ่ผ่านบริเวณที่เราสนใจตรวจวัด ในภาพที่ 14 บริเวณเรเงาแสดงพื้นที่โดยประมาณซึ่งเราต้องการวัดการสะท้อนของแสง (Reflectance mode) ซึ่งแสงที่สะท้อนนี้จะให้ข้อมูลคุณลักษณะบริเวณผิวที่แสงตกกระทบ ซึ่งการวัดแบบนี้เหมาะสำหรับตรวจองค์ประกอบเชิงคุณภาพ เช่น สีภายนอก ความเสียหายที่ผิว การเข้า ความแตกต่างระหว่างวัตถุทดสอบและวัตถุสอบเทียบมาตรฐาน เป็นต้น



ภาพที่ 14 ตำแหน่งของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่าง และตัวตรวจจับสำหรับการวัดการสะท้อนแสง

ที่มา: บัณฑิต (2546)

รูปแบบในภาพที่ 15 เป็นการวัดการส่งผ่านแสงในตัวอย่าง (Transmittance mode) ซึ่งเหมาะกับการตรวจวัดคุณภาพภายใน เช่น สีภายในมะเขือเทศ หรือการเกิดหัวใจกลวง (Hollow heart) ในมันฝรั่ง



ภาพที่ 15 ตำแหน่งของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่างและตัวตรวจจับ สำหรับการวัดแบบส่งผ่านแสง

ที่มา: บัณฑิต (2546)

สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดทางแสงหรือสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) มีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ ดังนี้ (อาทิตย์, 2550)

2.1 กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (Monochromatic light) ซึ่งก็คือแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous) สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” (วิชัย และคณะ, 2527)

2.2 กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” (วิชัย และคณะ, 2527)

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มขึ้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad (1)$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

เพราะฉะนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc = \log \frac{1}{T} \quad (3)$$

เมื่อ I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียว

ϵ = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและอุณหภูมิ

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลาง เมื่อ $b = 0$

b = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร

A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

2.6 การปรับปรุงสัญญาณขั้นต้น (Pretreatment of spectral data)

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดทางแสงอาจมีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากการกระเจิงของแสงและความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัด ซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (Additive scattering) ทำให้สเปกตรัมเพิ่มขึ้น ตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้ สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสง เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนกัน (Overlapping band) ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงควรนำไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อให้สเปกตรัมมีความเด่นชัดมากขึ้นและลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีการที่นิยมใช้มี 2 วิธี (อนุพันธ์, 2545) คือ

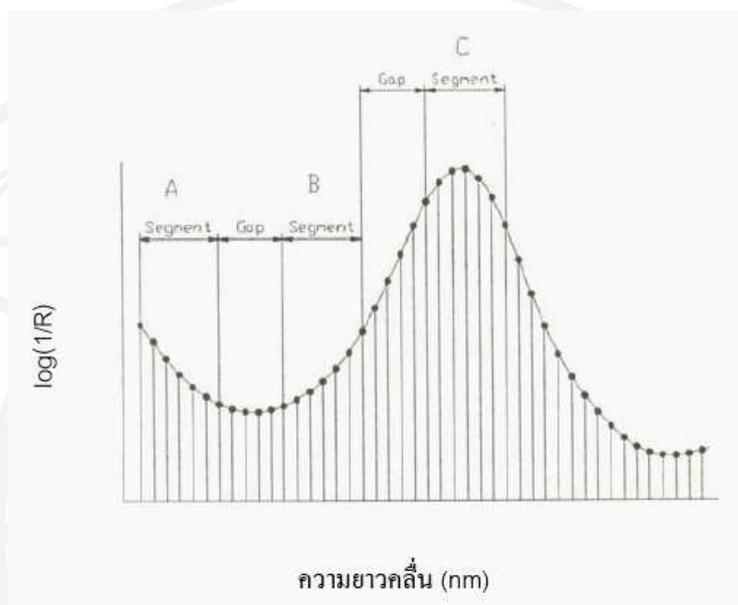
1. Derivative transformation

First derivative การคำนวณ Derivative หรือ ความชันของสเปกตรัม คำนวณได้จากสมการ (4) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{First derivative} &= \text{Slope} \\ &= B - A \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ A และ B คือ ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่มีช่วงเท่ากันและอยู่ติดกัน ในการคำนวณจะกำหนดขนาดของ Segment (ขนาดของความยาวคลื่นที่เราทำการเฉลี่ยให้ได้ค่าใหม่เพื่อเป็นตัวแทนขึ้นมาหนึ่งจุด) และ Gap (ช่วงความยาวคลื่นที่ทำการข้ามไป เพื่อเริ่มนับเป็นจุดแรกในการคำนวณ Segment ต่อไป) ในภาพที่ 16 เป็นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นที่แต่ละจุดห่างกัน 2 nm มีขนาด Segment และ Gap เท่ากับ 12 และ 10 nm ตามลำดับ โดยที่ จุด A คือ จุดที่ได้จากการหาค่า

เฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 12 nm (ขนาด Segment) จากนั้นข้ามไป 10 nm (ขนาด Gap) แล้วจึงเฉลี่ยอีกครั้งในช่วงความยาวคลื่น 12 nm เพื่อให้เป็นจุด B แล้วนำค่า A ลบจากค่า B ผลที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้นของ Segment แรก ซึ่งการคำนวณจะกระทำทุก Segment ต่อเนื่องกันไปจนตลอดความยาวคลื่น ต่อจากนั้นก็ขยับ Segment ไปทางขวา 1 จุด หรือ 2 nm แล้วคำนวณซ้ำเหมือนที่กล่าวมา จนเสร็จสิ้น



ภาพที่ 16 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative

ที่มา: อนุพันธ์ (2545)

First derivative ใช้ได้ผลกับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอและมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอทั่วถึง นอกจากนั้นแล้ว First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น

Second derivative คือ การคำนวณผลลบของค่าที่ได้จาก First derivative ที่ติดกัน หรือรู้จักกันว่า เป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม คำนวณได้จากสมการ (5) และ (6)

$$\text{Second derivative} = \frac{d^2 \log\left(\frac{1}{R}\right)}{d^2 \lambda}$$

ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$= d^2 \log \left(\frac{1}{R} \right) \quad (5)$$

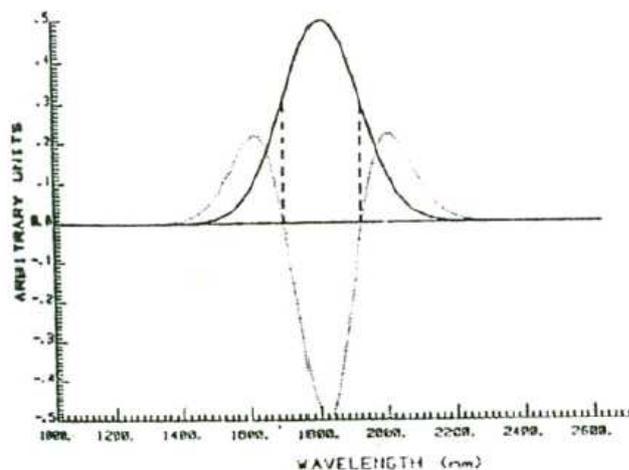
สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Second derivative} &= \text{change in slope} \\ &= \text{First derivative แรก} - \text{First derivative ถัดมา} \\ &= (C-B) - (B-A) \\ &= C - 2B + A \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่ติดกันและมีช่วงเท่ากัน

การคำนวณคล้ายกับ First derivative โดยในการคำนวณค่า Second derivative ของจุดแรก ต้องหาค่า C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สาม หรือ C ในภาพที่ 9 แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment แรกและ Segment ที่สอง ซึ่งก็คือ B-A แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment ที่สองและ Segment ที่สาม ซึ่งก็คือ C-B แล้วนำผลลบค่าแรกมาลบออกจากผลลบค่าที่สอง ตามสมการ ค่าผลลบสุดท้ายที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของ Segment แรก และคำนวณผลลบตามสมการ ไปจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ต่อจากนั้นจึงเลื่อนไปทางขวา 1 จุดหรือ 2 nm แล้วทำการหาซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์

การใช้ Second derivative จะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง ทั้งที่เป็นผลเชิงบวกที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจนที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น และผลเชิงลบที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่น Second derivative ใช้ได้ผลดีกับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ผสมผสานกันอยู่ First derivative ให้ความหมายเป็นค่าความยาวคลื่นที่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งทำให้แปลความหมายยากกว่า Second derivative ซึ่งได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจาก Second derivative จะให้จุดยอดตรงกับจุดยอดของสเปกตรัมเดิม แม้ว่าจะกลับหัว ดังภาพที่ 17

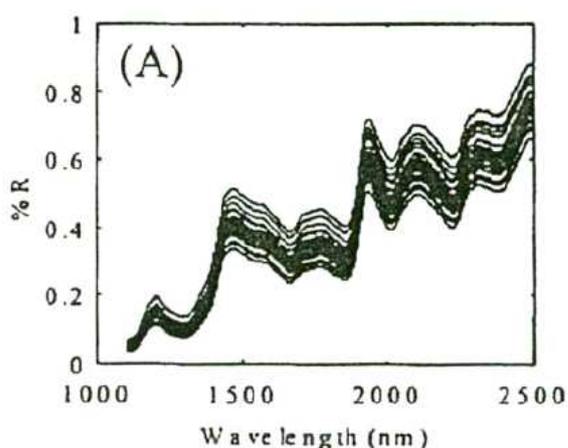


ภาพที่ 17 สเปกตรัมและ Second derivative ของสเปกตรัม

ที่มา: Hruschka (1987)

2. Multiplicative scatter correction (MSC)

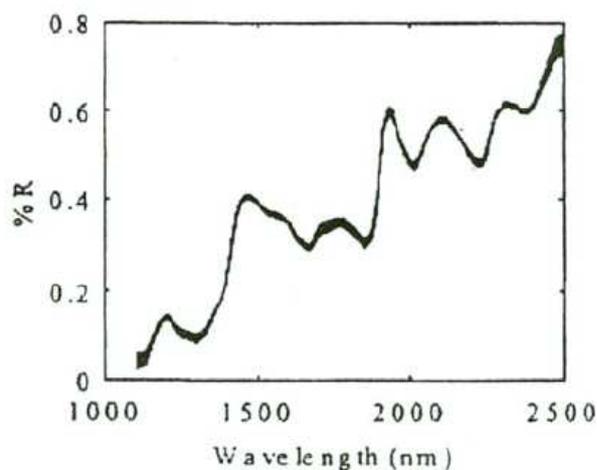
เป็นวิธีการที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง ซึ่งโดยทั่วไปการกระเจิงของแสง ทำให้ความชันของสเปกตรัมโดยรวมเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 18 คล้ายกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุด



ภาพที่ 18 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC

ที่มา: Boyworth and Booksh (2001)

วิธีการ MSC คือ ทำการหมุนสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างให้มาตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย มีขั้นตอนคือ ในแต่ละตัวอย่างต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมเพื่อลดผลที่เกิดจากการเลื่อนตัวของสเปกตรัม และต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาหาร ค่า $\log(1/R)$ ของทุกๆจุดเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป ได้สเปกตรัมดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC

ที่มา: Boyworth and Booksh (2001)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการ Calibration เพื่อใช้เป็น model ในการวัดค่าคุณลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ตามที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการ Calibration ที่สร้างขึ้นด้วยการทำ Validation เพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสมและสามารถทำนายค่าได้แม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำสมการ Calibration ที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการต่อไป

2.8 การสร้างสมการ Calibration

การหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ มีวิธีการหา 2 วิธีหลัก คือ

1. Wavelength selection เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ เฉพาะความยาวคลื่น ที่ น่าจะมีความ สัมพันธ์กับตัวแปรที่จะทำการวิเคราะห์ เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายแบบเช่น

1.1 เลือกจากความรู้ความชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิง ที่บ่งบอกถึงช่วงความยาว คลื่นที่คาดว่าน่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์

1.2 อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าน่าจะมี ความสัมพันธ์ เช่น Multiple regression หรือการสร้าง Correllelogram เพื่อตรวจสอบกราฟความ สัมพันธ์ระหว่าง แกน X คือ ความยาวคลื่น กับ แกน Y คือ ค่า Correlation อย่างง่ายของความ สัมพันธ์ระหว่าง Optical data ณ ความยาวคลื่นนั้น กับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธี Reference measurement ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็น ไปได้ที่จะสัมพันธ์ กับค่าวิเคราะห์วิธีการสร้างสมการ Calibration แบบ Wavelength selection อาศัยหลักการทางสถิติ มาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple linear regression, Multiple linear regression เป็นต้น

การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย ทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำหรือสูงกว่าค่าแท้จริง เพราะเกิดความผิดพลาดจากการสร้างสมการ หรือเกิด ปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการน้อย และทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ และทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือในที่สุด

1.2.1 Simple linear regression หมายถึง สมการ regression ที่ประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) เพียงตัวเดียวในสมการ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ อธิบายความหมายของข้อมูลให้ได้มากที่สุด เส้นตรงที่ได้นี้เรียกว่า Linear regression

สมการของ Linear regression คือ $y = b_0 + b_1X$

โมเดลของ Linear regression คือ $Y = b_0 + b_1X + e$

เมื่อ b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y

b_1 = ค่าคงที่ Regression หรือ ค่าความชันของกราฟ

e = ผลต่างระหว่างค่า $Y - y =$ เเรซิดัล (Residual) หรือค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งคำนวณได้จาก

$$b_0 = \sum \bar{Y} - b\bar{X} \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

โดย n = จำนวนตัวอย่าง (Observation)

การสร้างสมการด้วยวิธี Simple linear regression จะพิจารณาโดยให้มีค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) น้อยที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความแปรปรวนที่เกิดจากการประมาณค่า Y ภายใต้อาณา X (Minimize sum of square error: SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1X_i)^2 \quad (9)$$

การวัดความน่าเชื่อถือของการประมาณโดยใช้สมการ Regression วัดได้จาก Standard Error of Calibration (SEC) หรือ Residual standard deviation ซึ่งคำนวณได้จาก

$$SEC = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1X_i)^2}}{n-2} = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} \quad (10)$$

หรือวัดจาก Root Mean Square Error of Calibration (RMSEC) ซึ่งคำนวณจาก

$$\text{RMSEC} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}}{n-2} \quad (11)$$

โดยที่ $y_i = b_0 + b_1 X_i$ และ $Y_i = b_0 + b_1 X_i$

นอกจากนี้ยังมีการวัดระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) โดยวัดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ Correlation coefficient (R) โดยมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้ามีค่า R สูงหมายถึง ถ้าตัวแปรอิสระ (X) เปลี่ยนแปลงจะมีอิทธิพลมากกับตัวแปรตาม ถ้าค่า R = 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน ค่า R คำนวณได้จาก

$$R = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)(\sum Y^2 - n\bar{Y}^2)}} \quad (12)$$

การสร้างสมการ Calibration โดยใช้ Simple linear regression หรือ Single term linear regression ในเทคนิค NIR เป็นการเลือกใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับค่าที่ต้องการวิเคราะห์ เพียงความยาวคลื่นเดียว ทำให้ค่า R ที่ได้ มีค่าต่ำจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสมการ Calibration

1.2.2 Multiple linear regression (MLR) เป็นวิธีการใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) ทำให้สมการที่ได้ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าลงได้ หากพิจารณาในเรื่องการใช้เทคนิค NIRS ในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่าง จึงหมายถึงการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่หลายความยาวคลื่น สมการ Regression คือ

$$\text{สมการ Regression } y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k$$

$$\text{โมเดล Regression } Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + e$$

ซึ่ง $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ คือ Partial regression coefficient และ e คือ error

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนำมาใช้ในการพิจารณาในการสร้างสมการ โดยค่า SSE คำนวณได้จาก

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (13)$$

$$SEC = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2}}{n-2} = \sqrt{\frac{SSE}{n-k-1}} \quad (14)$$

เมื่อ n = จำนวนตัวอย่าง
 $i = 1, 2, 3, \dots, n$
 $j = 1, 2, 3, \dots, k$
 k = จำนวนตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการ Calibration

ซึ่งการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เมื่อมีตัวแปรอิสระเป็นจำนวนมากจะทำได้ยากและค่อนข้างซับซ้อนจึงใช้ระบบเมตริกมาช่วย มีการคิดโปรแกรมสำเร็จรูปมาช่วยในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น โปรแกรม NSAS สามารถลดความยุ่งยากและความผิดพลาดได้มาก

2. Full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัม และนำมาสร้างสมการ Calibration ดังวิธีข้างต้น ซึ่งสมการทำนายที่สร้างขึ้นอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ (Interference) และทำให้ค่าที่ทำนายอาจต่ำหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Underestimation) นอกจากนี้หากจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายมีจำนวนน้อยเกินไป จะทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ และทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (Over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Full spectrum) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่จำนวนตัวแปรอิสระที่มีมากขึ้นทำให้เกิดปัญหาในการคำนวณอีกเช่นกัน การใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่ม แยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกันและทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิมจะช่วยทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ ได้แก่

2.1 Principal Components Regression (PCR) การทำ PCR จะเริ่มต้นจากการทำ Principal Component analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัม

เพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า New factors ก่อนแล้วจึงนำค่าของตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ได้จากวิธี Reference methods เพื่อสร้างสมการ Calibration โดยใช้หลักการของ MLR

2.2 Principal Component Analysis (PCA) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่น จำนวนสเปกตรัมดังกล่าว คือจำนวนของตัวแปรอิสระนั่นเอง การลดจำนวนของตัวแปรมีวิธีการคือแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า แฟกเตอร์ หรือองค์ประกอบ แฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่น้ำหนักแตกต่างกัน แฟกเตอร์จะมีได้หลายแฟกเตอร์ โดยแต่ละแฟกเตอร์จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของแต่ละค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆซึ่งประกอบกันเป็นแฟกเตอร์นั้นๆ แฟกเตอร์แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด แฟกเตอร์ที่สองอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งจะทำให้แฟกเตอร์แต่ละแฟกเตอร์ แทบจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Non-Collinearity) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการหาแฟกเตอร์เรียบร้อยแล้วนำแฟกเตอร์ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient

2.3 Partial Least Square (PLS) Regression เป็นวิธีการที่คล้ายกับ PCR แต่ต่างกันตรงที่วิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกันโดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาแฟกเตอร์ด้วย ซึ่ง Kasemsamran (2005) ได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร โดยการสร้างแฟกเตอร์แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำแฟกเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดยแฟกเตอร์ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกันวัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัมให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

2.4 Discriminant analysis (DA) หรือการวิเคราะห์จำแนกประเภท มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกประชากรออกเป็นกลุ่มๆ โดยทดสอบว่า ตัวแปร

อิสระต่างๆ 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

- เพื่อคัดแยกกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่มหรือมากกว่า
- เพื่อกำหนดเป็นกลุ่มโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายๆ ตัวแปร
- เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการคัดแยก

การวิเคราะห์สำหรับการคัดแยกจะกระทำได้ต้องหลังจากได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในกลุ่มเสียก่อนดังนี้

- หากคุณสมบัติหลักเพื่อสร้างเป็นสมการที่เป็นตัวแทนของกลุ่ม
- ใช้สมการที่เป็นตัวแทนของกลุ่มดังกล่าวในการจำแนกหรือคัดแยก

Discriminant Analysis ได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกโดย Pearson ในปี ค.ศ.1920 แต่ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์โดย Fisher ในปี ค.ศ. 1930 และมีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์จริงในปี ค.ศ.1950 ขั้นตอนของการจำแนกกลุ่มจะต้องทราบจำนวนกลุ่มหลังจากนั้นให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

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

$$D = w_1Z_1 + w_2Z_2 + w_3Z_3 + \dots + w_rZ_r \quad (15)$$

เมื่อ D = ตัวแปรตามหรือเรียกว่า Discriminant score

w_i = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการจำแนกกลุ่ม

Z_i = ตัวแปรอิสระหรือเรียกว่า ตัวแปรจำแนกกลุ่ม

- 5) นำเกณฑ์หรือฟังก์ชันจำแนกกลุ่มที่ได้ในขั้นตอนที่ 4 มาทำนายกลุ่มของตัวอย่างที่เข้ามาใหม่

2.9 การทำ Validation

หลังจากที่ได้สร้างสมการแล้ว ต้องมีการทดสอบความประสิทธิของสมการนั้นก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบสมการที่นิยม มีดังนี้ คือ

1. Leave-one-out Classification เป็นวิธีวิเคราะห์เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจัดกลุ่ม มีวิธีการ คือ จากตัวอย่าง 1 ชุดขนาด n ตัวอย่าง ให้ใช้ข้อมูล $n-1$ ตัวอย่าง ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่ม ส่วนตัวอย่างที่เหลือ 1 ตัวอย่างไว้ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดกลุ่ม มีขั้นตอนดังนี้

- การคำนวณครั้งที่ 1 จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 2- n ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่มและใช้ตัวอย่างที่ 1 ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่ม

- การคำนวณครั้งที่ 2 จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 1 และ 3- n ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่มและใช้ตัวอย่างที่ 2 ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่ม

- การคำนวณครั้งที่ n จะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่ 1 และ $n-1$ ในการสร้างฟังก์ชันจำแนกกลุ่ม และใช้ตัวอย่างที่ n ในการตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์กลุ่ม

จึงต้องมีการคำนวณทั้งหมด n ครั้ง แล้วจึงจะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจัดกลุ่มในการพิจารณาว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการแบ่งกลุ่มมากหรือน้อยอย่างไร เราจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ในสมการที่อยู่ในรูปที่ปรับแล้ว (Standardized canonical discriminant function coefficient)

2. 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

ดังนั้นตัวอย่างแต่ละตัว จะถูกตัดออกจากชุด ตัวอย่างละหนึ่งครั้งเท่านั้น ทำการหาค่า Root Mean Square Error of Cross Validation (RMSECV)

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_{cv,i} - Y_i\right)}{n-1}} \quad (16)$$

3. การทดสอบผลการประเมิน (Prediction testing) วิธีนี้จะทดสอบสมการแบบภายนอก โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการนี้ว่า ชุดทดสอบ (Testing set) สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมี ที่เราจะใช้ทดสอบ ต้องอยู่ในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบ ก็นำค่าที่ได้ ไปคำนวณหา ปริมาณจากสมการค่าทางเคมี จากนั้นดูผลการคำนวณที่

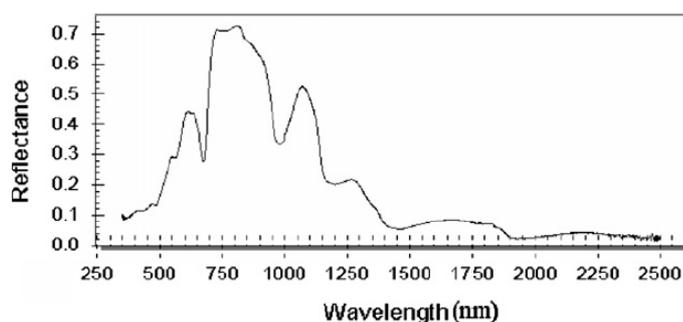
ได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณา คือ ค่า Bias คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าที่ได้จากวิธี Reference และค่า Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP)

$$\text{Bias}(d) = \frac{\sum(X - Y)}{n} \quad (17)$$

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{\sum(X - Y)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}} \quad (18)$$

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้แสงย่าน Visible/near infrared ในการตรวจวัดคุณภาพภายในของผลผลิตเกษตร ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง Shao (2007) ได้ใช้เทคนิค Visible/near infrared spectrometric เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะด้านคุณภาพของมะเขือเทศ Heatwave ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (Firmness) ทั้งแบบที่ทดสอบด้วยแรงกด F_c และทดสอบด้วยหัว Puncture F_p , ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Soluble solids content, SSC) และความเป็นกรด (pH)

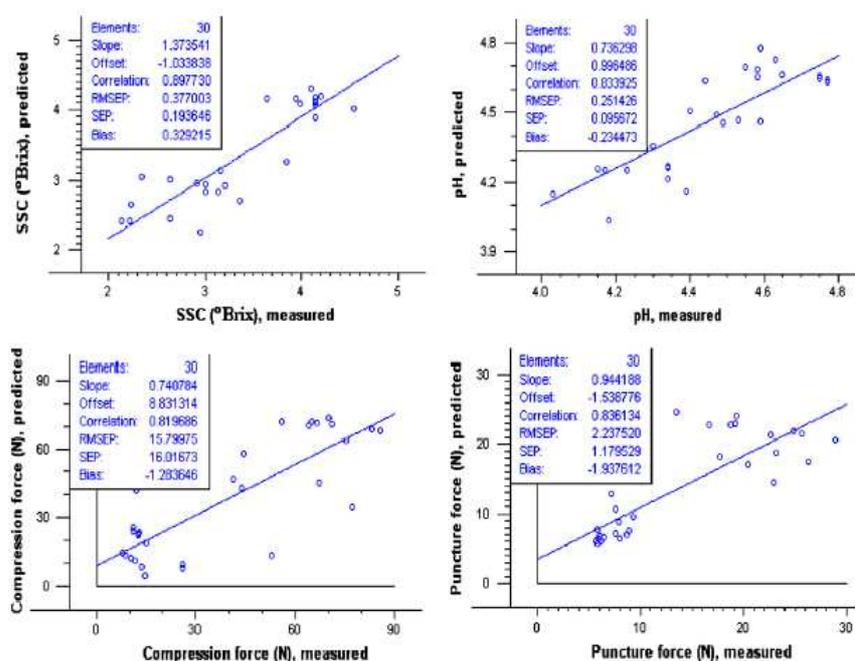


ภาพที่ 20 สัญญาณ Reflectance spectra ของมะเขือเทศ ในช่วงความยาวคลื่น 350-2,500 nm

ที่มา: Shao (2007)

ใช้การวัดแสงแบบสะท้อน (Reflectance mode) ในช่วงความยาวคลื่น 350-2,350 nm (ภาพที่ 20) พบว่าสมการทำนายที่ดีที่สุดได้จากการวิเคราะห์ผลด้วย Principal component regression

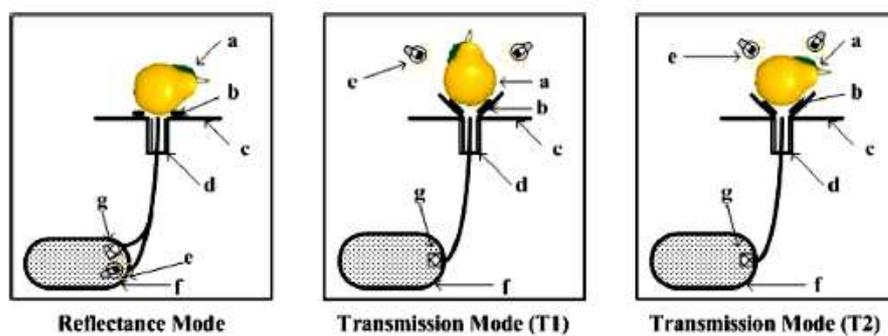
(PCR) และ Partial least square regression (PLS) ซึ่งสามารถทำนายผลได้อย่างดียิ่ง ค่า Correlation coefficient และ SEP ของ SSC, pH, Fc และ Fp เป็น 0.90 และ 0.19⁰Brix, 0.83 และ 0.09, 0.81 และ 16.017 N, 0.83 และ 1.18N ตามลำดับ (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 ผลจากสมการทำนายแบบ PLS ของมะเขือเทศของค่า SSC, ความเป็นกรด, การวัดความแน่นเนื้อแบบทดสอบด้วยแรงกด (Fc) และทดสอบด้วยหัว Puncture (Fp)

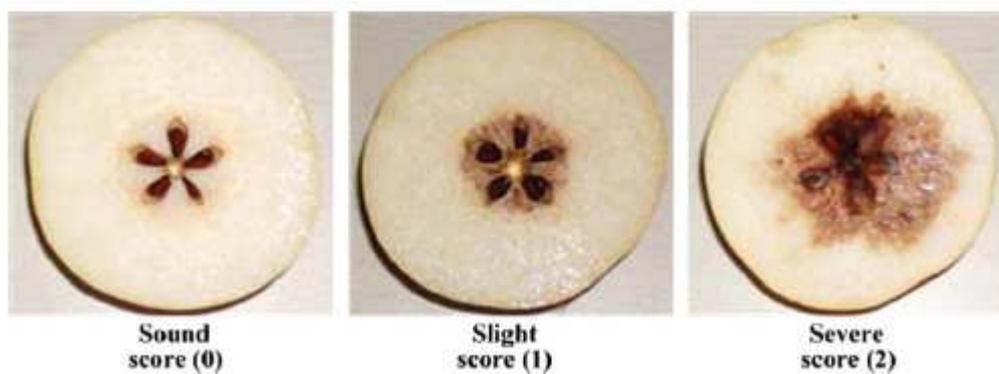
ที่มา: Shao (2007)

การเปรียบเทียบระหว่างการวัดแสงแบบ Diffuse reflectance กับ การวัดแสงแบบส่องผ่าน (Transmission mode) Fu et. al. (2007) ได้ทำการศึกษาการเกิด Brown heart ในผลแพร์ ด้วยแสงย่าน Vis/NIR ช่วงความยาวคลื่น 400-1,028 nm โดยใน Diffuse reflectance ได้ใช้ตัว Detector 2 แบบ คือ Si Detector (670-1,110 nm) และ InGaAs Detector (800-2,630 nm) ทำการจัดวางผลแพร์ในแนวตั้งและแนวนอน (ภาพที่ 22) วิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ Discriminant Analysis (DA) เพื่อใช้จำแนกผลแพร์ที่เกิด Brown heart กับผลแพร์ปกติ ออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ (ภาพที่ 23) พบว่าการวัดแสงแบบส่องผ่านให้ผลการจำแนกถูกต้องมากที่สุดที่ 91.2% ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมสำหรับการตรวจหาสิ่งผิดปกติภายในผลผลิตโดยไม่ต้องผ่าทำลาย ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 Schematic diagram ของการทดสอบรูปแบบการวัดแสงและการจัดวางผลแพร์

ที่มา: Fu et. al. (2007)



ภาพที่ 23 ภาพตัดแสดงชั้นคุณภาพของผลแพร์ที่ทำการทดสอบ

ที่มา: Fu et. al. (2007)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การพัฒนาเครื่องกลัดขนาดผลชมพู่

ประกอบด้วยการศึกษาหาปัจจัยที่จำเป็นในการออกแบบ การสร้าง การทดสอบ การวิเคราะห์ และประเมินผลเครื่องต้นแบบ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 การออกแบบเครื่องกลัดขนาดผลชมพู่

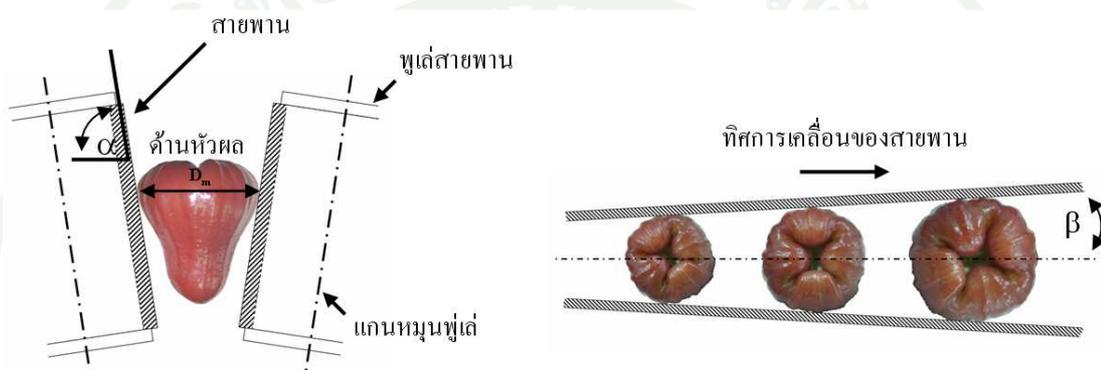
สรุปจากการศึกษาเครื่องกลัดขนาดผลไม้แบบต่าง ๆ ผู้วิจัยพบว่าหลักการของเครื่องกลัดขนาดแบบสายพานบานออก (Diverging Belts Sizer, DBS) มีความเหมาะสมในการใช้กลัดผลชมพู่ ทั้งนี้เนื่องจากผลชมพู่มีรูปทรงกรวย คล้ายผลแพร์ เมื่อนำเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (Maximum Diameter), D_m (ภาพที่ 24) มาหาความสัมพันธ์กับปริมาตรของผลชมพู่ พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีมาก (Chanida et al., 2007) ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการกลัดขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของผลชมพู่ หรือฐานของผล ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการที่สายพานบานออกใช้ในการกลัดขนาดอีกทั้งเครื่องกลัดขนาดสามารถสร้างง่าย มีระบบกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถใช้งานและบำรุงรักษาได้ง่าย

1.1.1 แนวความคิดในการออกแบบ

- 1) ออกแบบชุดสายพานแยกเป็นสองชุด ได้แก่ ชุดสายพานแนวนอนเพื่อใช้ป้อนผลชมพู่ และชุดสายพานบานออกในแนวตั้งเพื่อใช้เป็นสายพานกลัดขนาด
- 2) ออกแบบให้สายพานเครื่องกลัดขนาดสามารถปรับมุมเอียงได้ เพื่อให้เหมาะสมกับทรงผลชมพู่ทั้ง 3 พันธุ์ (ทูลเกล้า, ทับทิมจันทร์ และ ทองสามสี)
- 3) ออกแบบอุปกรณ์ปรับระยะห่างระหว่างสายพานบานออกเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ฐานผล) ตามเกรดของชมพู่แต่ละพันธุ์ได้

4) ใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็กส่งแรงผ่านชุดเกียร์ทด และส่งกำลังผ่าน Universal joint ไปยังทั้งสายพานป้อนและสายพานคัดขนาด โดยติดตั้งมอเตอร์สายพานละตัวเพื่อความสะดวกในการใช้งานและบำรุงรักษา

5) บริเวณถาดรับผลชมพูที่ตกจากสายพานคัดขนาดต้องบุด้วยฟองน้ำหนาและมีการกำหนดระยะห่างจากสายพานถึงถาดรับผลชมพูให้เหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายจากการคัดขนาด



ภาพที่ 24 การใช้หลักการสายพานบานออกเป็นอุปกรณ์คัดขนาดผลชมพู

มุมของสายพานคัดขนาด (α) ในภาพด้านหน้าของสายพาน (ภาพที่ 24) ต้องปรับตั้งให้เหมาะสมกับมุมเอียงของทรงผลรูปกรวย เพื่อให้การคัดขนาดเป็นไปอย่างถูกต้อง เมื่อสายพานเคลื่อนที่พาผลชมพูไปด้วยสายพานจะถ่างออกเป็นมุม β จนความกว้างของสายพานกว้างกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด ผลชมพูจึงตกสู่ถาดรองรับตามขนาด

ในการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาระยะตกอิสระในแนวดิ่งสูงสุด, h บนถาดบุด้วยโฟมฉาบผ้าหนา 20 mm ของผลชมพูที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายพบว่าระยะดังกล่าวมีค่า ประมาณเป็น 20 cm เมื่อคำนวณเวลา, t การตกจากภาวะหยุดนิ่งในแนวดิ่ง ด้วยสมการการเคลื่อนที่ (สมการ (19))

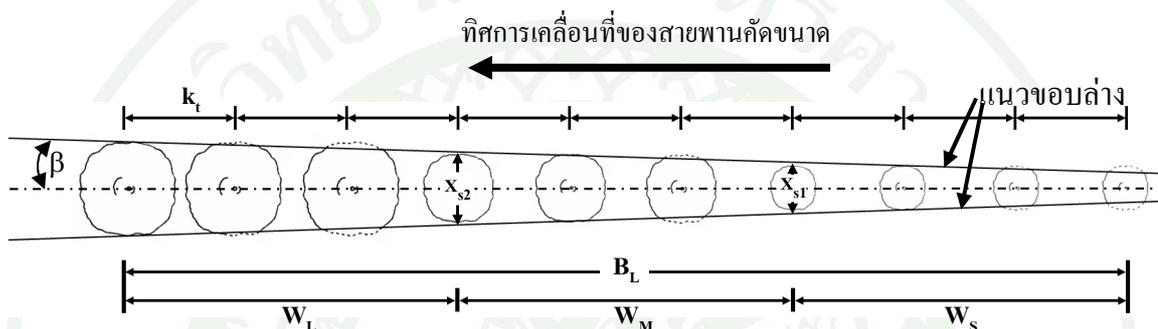
$$s - s_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (19)$$

เมื่อ $s-s_0$ คือ ความสูง h

v_0 คือ ความเร็วเริ่มต้น ($v_0=0$)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วง ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)

พบว่าได้เวลา $t = 0.2 \text{ sec}$ และระบบคัดขนาดด้วย DBS นี้กำหนดความเร็วสายพานสูงสุดเป็น 0.5 m/sec



ภาพที่ 25 การเคลื่อนที่และระยะต่างๆของระบบคัดขนาด

เพื่อป้องกันผลชมพูตกทับซ้อนในเวลาเดียวกันระยะเวลาการป้อนแต่ละผลที่เหมาะสม, k_t จึงควรเท่ากับหรือมากกว่าเวลา t เมื่อคำนวณเป็นระยะห่างระหว่างผลได้เท่ากับ 10 cm สำหรับช่องรับผลชมพู 3 ขนาด คือ เล็ก กลางและใหญ่ (S, M และ L) ที่แต่ละถาดรับผลชมพูได้พร้อมกันไม่น้อยกว่า 3 ผล โดยประมาณ ความยาวของสายพาน DBS ทั้งหมด, B_L ที่คำนวณได้จึงเท่ากับ 90 cm (ภาพที่ 25) และเพื่อให้ถาดสามารถรับผลชมพูได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ใช้ถาดที่มีความกว้าง 110 cm โดยมีความกว้างกว้างกว่าปลายของสายพานคัดขนาด ข้างละ 10 cm

ทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างช่องคัดขนาดตามขนาดเล็ก กลางและใหญ่ (S, M และ L) ด้วยสมการ (20) (Peleg, 1985) และเมื่อนำเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของแต่ละขนาดในชมพูแต่ละพันธุ์มาคำนวณทางตรีโกณมิติ พบว่ามุม β สำหรับชมพูแต่ละพันธุ์มีค่าดังตารางที่ 3

$$x_{12} = \frac{(\mu_2 \sigma_1^2 - \mu_1 \sigma_2^2)}{(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \pm \left[\left(\frac{\mu_2 \sigma_1^2 - \mu_1 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right)^2 - \frac{(\mu_2^2 \sigma_1^2 - \mu_1^2 \sigma_2^2 - 2\sigma_1^2 \sigma_2^2 \ln(\sigma_1/\sigma_2))}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right]^{1/2} \quad (20)$$

เมื่อ

X_{S1} = ขนาดของระยะห่างระหว่างช่องคัต แบ่งขนาด W_M และ W_S

X_{S2} = ขนาดของระยะห่างระหว่างช่องคัต แบ่งขนาด W_L และ W_M

W_L = ช่วงการคัตขนาดชมพูผลใหญ่

W_M = ช่วงการคัตขนาดชมพูผลกลาง

W_S = ช่วงการคัตขนาดชมพูผลเล็ก

μ_1 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของชมพูขนาดที่ 1

μ_2 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของชมพูขนาดที่ 2

σ_1 = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางชมพูขนาดที่ 1

σ_2 = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางชมพูขนาดที่ 2

ตารางที่ 3 ระยะห่างระหว่างช่องคัตขนาดและมุม β ของสายพานคัตขนาด

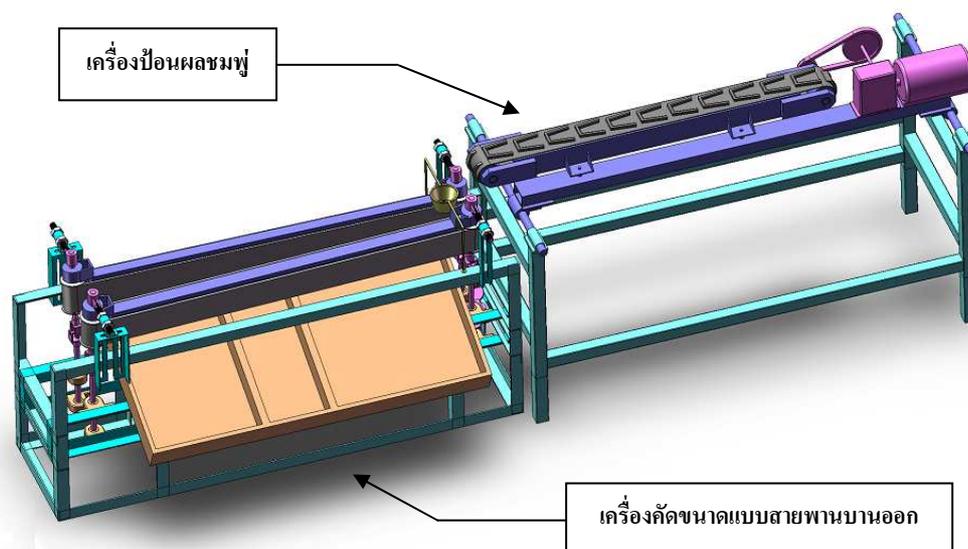
พันธุ์	Maximum Diameter (mm)			X_{s1} (mm)	X_{s2} (mm)	β (°)
	เล็ก, S	กลาง, M	ใหญ่, L			
ทูลเกล้า	52.92±1.57	57.70±0.89	64.12±1.37	59.96±4.16	53.01±7.30	0.29
ทับทิมจันทร์	45.30±2.93	58.08±1.53	65.80±1.36	62.87±9.40	94.86±32.73	0.55
ทองสามสี	51.15±2.20	58.47±1.53	63.07±1.82	65.33±10.02	47.39±13.29	0.34

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย± หมายถึงค่า SD

ทำการปรับตั้งเครื่องคัตขนาดด้วยมุม β และตั้งระยะแผ่นกั้นถาดรองรับ W_L , W_M และ W_S ตามค่า X_{s1} และ X_{s2} เพื่อให้เหมาะกับชมพูแต่ละพันธุ์ก่อนทำการคัตขนาด

1.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบ

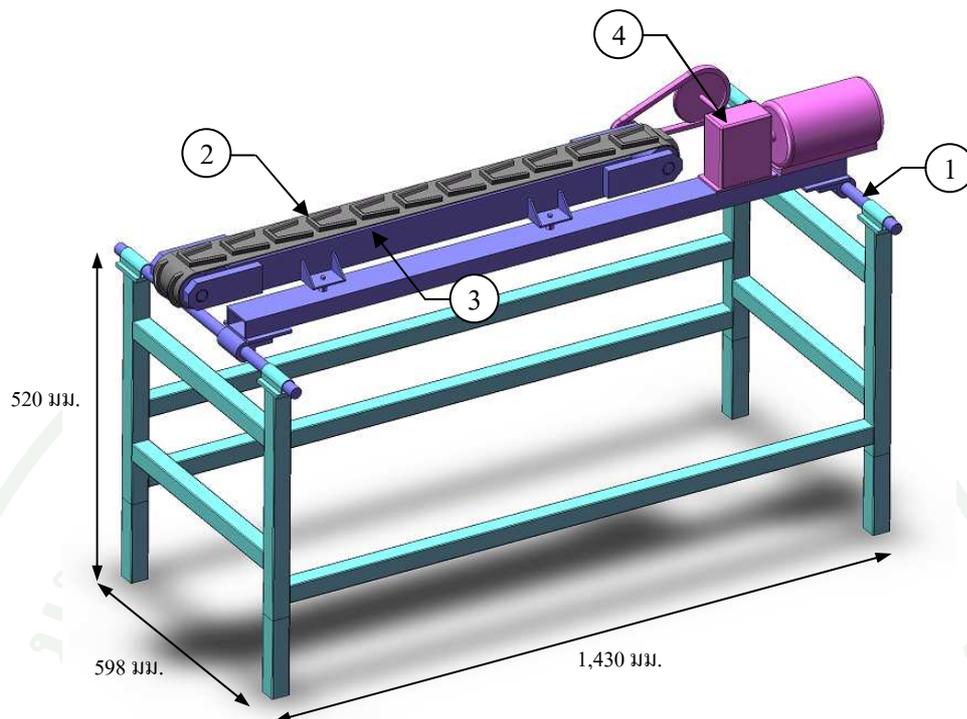
เครื่องคัตขนาดชมพูนี้ ประกอบขึ้นจากเครื่องจักรย่อย 2 เครื่องด้วยกัน ได้แก่ เครื่องป้อนผลชมพูแบบสายพานแนวนอนและเครื่องคัตขนาดแบบสายพานบานออก (Diverging belt) ที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ระบบเครื่องคัดขนาดชมพู

1) เครื่องป้อนผลชมพู

เครื่องป้อนผลชมพู (ภาพที่ 27) โครงสร้างประกอบด้วยเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม (เหล็กกล่อง) ขนาดหน้าตัด 40 x 40 มม.หนา 4 มม. ขนาดกว้าง 598 มม. ยาว 1,430 มม. สูง 520 มม. โดยที่ด้านบนของโครงสร้างได้ติดตั้งเพลานาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. ไว้ทั้งสองข้างเพื่อใช้ในการเลื่อนปรับตำแหน่งของสายพานป้อนตามต้องการ สายพานของเครื่องป้อนผลชมพูที่วางตัวอยู่ในแนวนอนเป็นสายพานแบนยี่ห้อ Ammeraal รุ่น Belt Flexam EM 10/2 Green FG ขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 2,400 มม. ขนานกับพื้น สายพานนี้ถูกขับให้เคลื่อนที่ด้วยกำลังจากมอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า ที่ส่งผ่านชุดถ่ายทดกำลัง ได้แก่ เฟืองทด อัตราส่วน 1:40 โซ่และจานโซ่ขับเคลื่อนขนาด 5 นิ้ว และจานโซ่ตามขนาด 2.5 นิ้ว โดยที่บนผิวของสายพานได้ติดตั้งแผ่นยางสำหรับวางผลชมพูเป็นช่อง ระยะห่างกัน 80 มม. ต่อช่อง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการป้อนผลชมพู โดยกำหนดให้วางผลชมพูหันด้านขั้วผลไปตามทิศการเคลื่อนที่ของสายพาน



- หมายเลข 1 = เพลารางเลื่อนปรับตำแหน่งสายพาน
 หมายเลข 2 = แผ่นยางสำหรับวางผลชมพู่
 หมายเลข 3 = สายพานป้อนผล
 หมายเลข 4 = มอเตอร์และชุดถ่ายทอดกำลัง

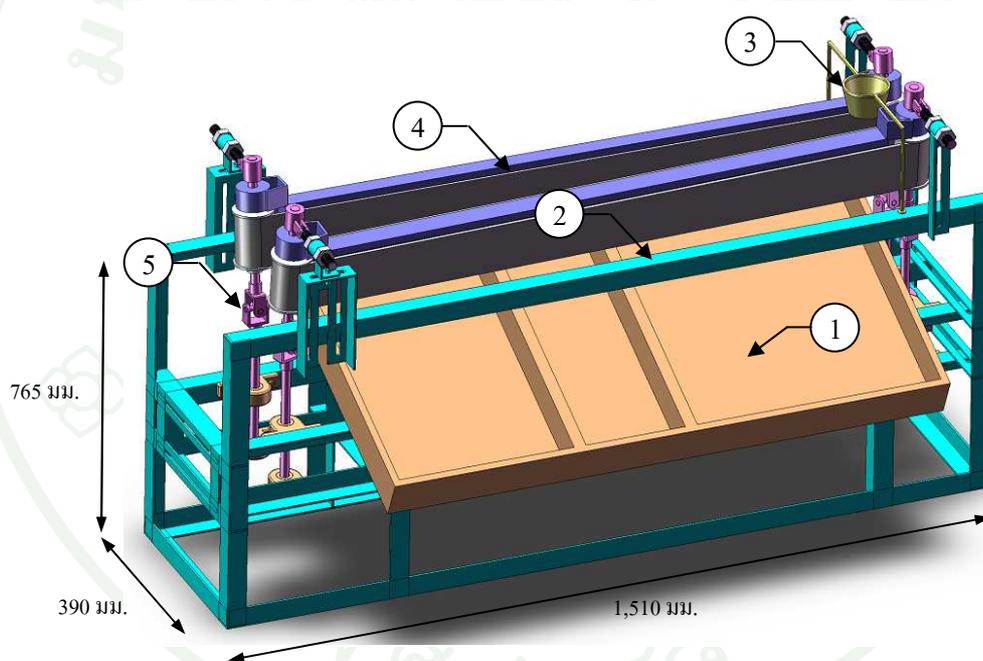
ภาพที่ 27 เครื่องป้อนผลชมพู่

เมื่อชมพู่เคลื่อนตัวไปบนสายพานป้อนจนสุดความยาวสายพานแล้ว ผลชมพู่จะตกลงสู่เครื่องคัดขนาดผลชมพู่ต่อไป

2) เครื่องคัดขนาดชมพู่

ตัวเครื่องประกอบด้วยโครงสร้างทำจากเหล็กหน้าตัด L (เหล็กฉาก) ขนาด 38.1 มม. x 38.1 มม.หนา 3 มม. ประกอบเป็นโครงเหล็กขนาดกว้าง 390 มม. ยาว 1,510 มม. สูง 765 มม. ตามลำดับและติดตั้งถาดรับผลชมพู่ขนาดกว้าง 600 มม. ยาว 1,100 มม. ลึก 80 มม. พร้อมด้วยตัวแบ่งช่องออกเป็นช่องของขนาดต่างๆ ทำจากสังกะสีพับเป็นกระบะสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยฟองน้ำหนา 20 มม

ฉาบผ้า เป็นวัสดุกันกระแทก (ภาพที่ 28) สายพานคัดขนาดของเครื่องเป็นแบบสายพานบานออก (Diverging belt) ซึ่งติดตั้งอยู่ในแนวตั้ง ใช้สายพานยี่ห้อ Ammeraal รุ่น Nonex EM 8/2 Blue FG ขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 2500 มม. 2 เส้น ผิวด้านนอกของสายพานบุด้วยโฟมยาง (Latex foam) ความหนา 4 มม. ซึ่งสายพานนี้ถูกขับให้หมุนด้วยความเร็วเท่ากันทั้งสองข้างด้วยกำลังจากมอเตอร์ 220 V 60 Hz ความเร็ว 1,450 รอบ/นาที ผ่านชุดเฟืองทดและข้อต่ออ่อน (Universal joint) เพื่อให้สามารถปรับมุมของสายพานได้ ในจุดที่ผลชมพู่เริ่มเข้าสู่เครื่องคัดขนาด ได้มีการติดตั้งถุงผ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าและทางออกเป็น 100 มม. และ 60 มม. ตามลำดับ ถุงมีความยาว 120 มม. เพื่อช่วยควบคุมการวางตัวของผลชมพู่ไว้เพื่อควบคุมให้ผลชมพู่ที่หล่นจากเครื่องป้อน วางตัวอยู่ในแนวตั้งเสมอและช่วยชลดความเร็วและลักษณะการตกให้ช้าลงและเป็นไปอย่างนุ่มนวล



หมายเลข 1 = ถาดรองรับผลชมพู่

หมายเลข 2 = โครงสร้างหลักของเครื่อง

หมายเลข 3 = ถุงผ้าควบคุมการวางตัว

หมายเลข 4 = แถบสายพานคัดขนาดที่บุด้วยโฟมยาง

หมายเลข 5 = ข้อต่ออ่อน

ภาพที่ 28 เครื่องคัดขนาดผลชมพู่

3) การทำงาน

การติดตั้งเครื่องป้อนผลชมพูร่วมกับเครื่องคัดขนาดจะติดตั้งให้ปลายสายพานป้อนอยู่เหนือสายพานของเครื่องคัดขนาด และติดตั้งให้ชิดกับถุงผ้าฯ ที่ทำหน้าที่รับผลชมพูที่ตกลงมาจากสายพานป้อนมากที่สุด การทำงานจะเริ่มจากการป้อนชมพู ด้วยการวางผลลงบนสายพานคัดขนาดตามแนวนานกับสายพาน โดยหันด้านขั้วผลชี้ไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสายพานที่ละผล ผลชมพูจะเคลื่อนที่ไปตามสายพานและตกลงสู่ ถุงผ้าควบคุมการวางตัว (ภาพที่ 29) ที่จะบังคับให้ผลเคลื่อนที่ลงสู่สายพานคัดขนาดในแนวตั้งเท่านั้น ซึ่งช่วยลดความเสียหายจากการที่ผิวชมพูกระทบกับขอบสายพานคัดขนาดด้านบน นอกจากนี้การที่ถุงผ้าฯ ได้บังคับให้ผลชมพูตกในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอจะช่วยให้การวางตัวของไหลผลชมพูบนสายพานคัดขนาด เป็นไปอย่างสมมาตรตามแกนแนวตั้ง ซึ่งจะช่วยให้ผลชมพูเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสายพานคัดขนาดได้อย่างนุ่มนวลขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 29 ลักษณะการเคลื่อนที่ของผลชมพูผ่านถุงผ้าก่อนตกสู่สายพานคัดขนาด

ผลชมพูที่ผ่านถุงผ้าและวางตัวอยู่บนสายพานคัดขนาดแล้ว จะถูกสายพานคัดขนาดพาให้เคลื่อนที่ออกไป เมื่อผลชมพูเคลื่อนที่ไประยะห่างระหว่างสายพานซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการคัดขนาด ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ผลที่มีขนาดเล็กจะตกลงบนถาดรับก่อน จากนั้นจะเป็นขนาดกลางและใหญ่ตามลำดับ โดยที่ถาดรับจะแบ่งออกเป็น 3 ช่องด้วยแผ่นกั้น ซึ่งแต่ละช่องหมายถึงแต่ละขนาดสามารถคัดขนาดได้ 3 ขนาด คือ Size S, M และ L ถาดรับผลชมพูจะถูกบุด้วยฟองน้ำหนา

20 mm เพื่อป้องกันผลชมพูที่ตกลงมาจากสายพานไม่ให้ซ้ำ และวางเอียงเพื่อให้ผลชมพูไหลลงมาด้านล่าง ซึ่งจะวางห่างจากสายพาน 20 cm ผลชมพูจึงตกลงสู่ถาดรับผลตามขนาดที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การทำงานของเครื่องคัดขนาดชมพู

1.2 การทดสอบเบื้องต้น

ใช้ชมพูพันธุ์ทูลเกล้า, ทับทิมจันทร์, ทองสามสี จากเกษตรกรในอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม, และอำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี เพื่อการทดสอบเบื้องต้นถึงความเสียหายจากเครื่องคัดขนาดที่ออกแบบขึ้น

1.2.1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาการเกิดความเสียหายจากเครื่องคัดขนาด

เนื่องจากชมพูเป็นผลไม้ที่มีไวต่อความเสียหายสูง เกิดความเสียหายได้ง่าย (Bundit. et. al., 2007) โดยเฉพาะความเสียหายเชิงกลระหว่างการปฏิบัติต่างๆ สำหรับการคัดขนาดผลชมพูด้วยเครื่องคัดขนาด (ชนิดา, 2550) พบว่าเกิดความเสียหายกับชมพู โดยเป็นการเกิดรอยบาดและรอยถลอกมากที่สุด เนื่องจากผลชมพูตกกระทบกับสายพานคัดขนาดโดยตรง (เมื่อวางสายพานป้อนท่ามุม 90 องศา กับสายพานคัดขนาด) และชมพูพันธุ์ที่เกิดความเสียหายได้ง่ายคือพันธุ์ทูลเกล้า เนื่องจากมีความแน่นเนื้อต่ำ

ได้ดำเนินการทดสอบการทำงานเบื้องต้นโดยปรับปรุงวิธีการติดตั้งเครื่องใหม่เป็นวงต่อในแนวเดียวกัน (ในหัวข้อ โครงสร้างและส่วนประกอบของรายงานฉบับ) เพื่อลดความเสียหายจากรอยขาดของผล จากนั้นศึกษาการเกิดความเสียหายเนื่องจากรอยถลอกกับชมพูที่ผ่านเครื่องด้วยขั้นตอนดังนี้ คือ

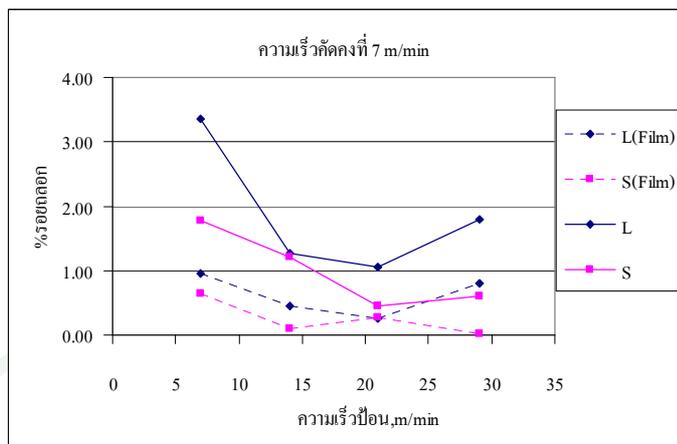
- 1) การคัดชมพูพันธุ์ทุลเกล้าการทดลองละ 20 ผล โดยเป็นขนาดใหญ่ (L) 10 ผล ขนาดเล็ก (S) 10 ผล ด้วยความเร็วสายพานป้อน 7, 14, 21 29 m/min ความเร็วสายพานคัดขนาดเป็น 7, 14, 21 29 m/min
- 2) การทดสอบคัดชมพูเหมือนข้อ 1) แต่หุ้มผลชมพูด้วย ฟิล์มถนอมอาหาร (Stretch film) 2-3 ชั้น (ดังภาพที่ 31)



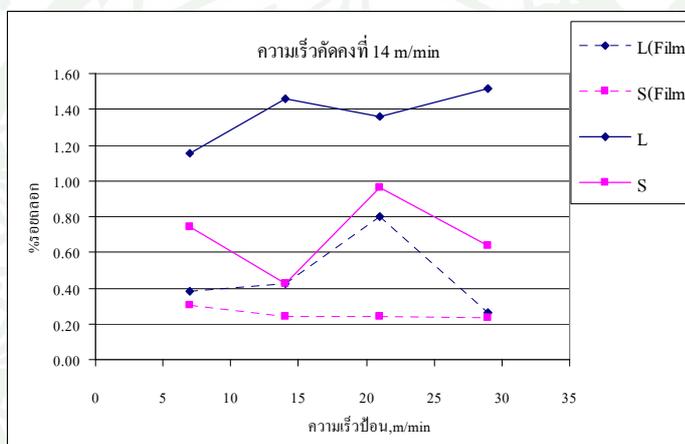
ภาพที่ 31 ผลชมพูที่หุ้มด้วยฟิล์มถนอมอาหารแล้ว

ทำการคำนวณความเสียหายของผลชมพูที่ผ่านการคัดแล้ว (ชนิดา, 2550) โดยปริมาณความเสียหายประเภทรอยชำ หรือ รอยถลอก คำนวณด้วยสมการ (21) ดังนี้

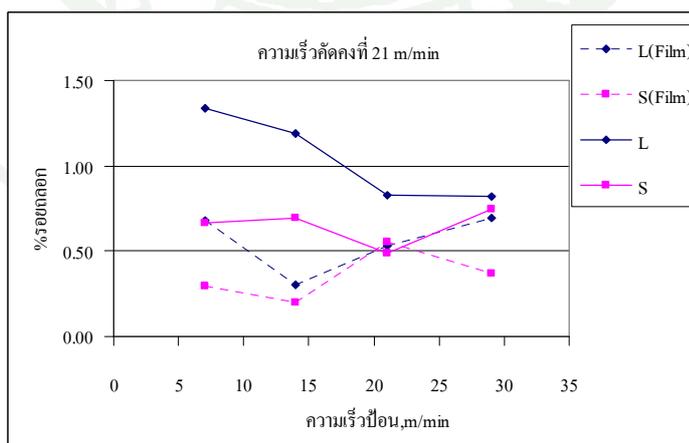
$$\text{เปอร์เซ็นต์รอยชำ หรือ รอยถลอก} = \frac{\text{ขนาดพื้นที่รอยชำหรือรอยถลอกทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ผิวชมพูเฉลี่ย}} \times 100 \quad (21)$$



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 32 ผลการกัดคมฟุ้งกันฐ์ทุลเกล้าเมื่อ L (Film), S (Film) คือหุ้มฟิล์มและ L, S คือไม่หุ้มฟิล์ม
 ผนอมอาหารและ (ก), (ข), (ค) คือความเร็วการกัด 7, 14 และ 21 m/min ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าการหุ้มผลชมพูด้วยฟิล์มถนอมอาหารสามารถลดการเกิดรอยถลอกได้ดีกว่าการไม่หุ้มฟิล์มทุกความเร็วที่มีการทดสอบ (ภาพที่ 32) หรืออาจกล่าวได้ว่าการป้องกันไม่ให้เกิดผลชมพูสัมผัสกับสายพานคัดขนาดโดยตรง มีความสำคัญต่อการเกิดความเสียหายกับผลชมพู

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การป้องกันด้วยการหุ้มผลชมพูอาจไม่สามารถทำได้สะดวก เนื่องจากไม่สอดคล้องกับวิธีการปฏิบัติของผู้ผลิตในปัจจุบัน และเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาและก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายจากต้นทุนฟิล์มถนอมอาหารที่ใช้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้การหุ้มสายพานคัดขนาดด้วยวัสดุบางประเภทเพื่อป้องกันการสัมผัสกัน โดยตรงของผลชมพู แทนการหุ้มผลชมพูโดยตรงแทน และได้ดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาการเกิดความเสียหายกับชมพูที่ผ่านเครื่องด้วยขั้นตอนดังนี้ คือ ก) การบุผิวหน้าของสายพานคัดขนาด ด้วยแผ่นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ผลไม้ ความหนา 2 มม. ร่วมกับการใช้ถุงผ้าควบคุมการวางตัวของผลชมพูขณะตกสู่สายพานคัดขนาด และ ข) การบุผิวหน้าของสายพานคัดขนาดด้วยแผ่น โฟมยาง (Form rubber) กันกระแทกหนา 4 มม. ร่วมกับการใช้ถุงผ้าควบคุมการวางตัวของผลชมพูขณะตกสู่สายพานคัดขนาด

1.2.2 การบุผิวหน้าของสายพานคัดขนาด ด้วยแผ่นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ผลไม้ ความหนา 2 มม. ร่วมกับการใช้ถุงผ้าควบคุมการวางตัวของผลชมพูขณะตกสู่สายพานคัดขนาด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 33 (ก) สายพานคัดขนาดก่อนหุ้ม (ข) การบุสายพานคัดขนาดด้วยแผ่นโฟมกันกระแทก ความหนา 2 มม.

ทดลองใช้แผ่นโฟมกันกระแทกที่ใช้กับบรรจุภัณฑ์ผลไม้ทั่วไป เช่น แอปเปิ้ล สาลี่ ฯลฯ นำมาบุที่ผิวสายพานคัดขนาดด้านที่สัมผัสกับผลชมพู่ดังภาพที่ 33

ทำการติดตั้งชุดถุงผ้าเพื่อให้ผลชมพู่ที่ตกจากสายพานป้อน (ติดตั้งอยู่สูงกว่าสายพานคัดขนาด) คู่สายพานคัดขนาด มีการเคลื่อนที่อย่างนุ่มนวล ความเร็วการตกของผลชมพู่ถูกชลดด้วยความเสียดทานระหว่างถุงผ้ากับผลชมพู่เอง นอกจากนี้ชุดถุงผ้าดังกล่าวจะช่วยควบคุมให้การวางตัวของผลชมพู่อยู่ในแนวคิ่งมากที่สุดก่อนที่ผลชมพู่จะสัมผัสและถูกรองรับด้วยสายพานคัดขนาดที่วางทำมุมเอียงอยู่ทั้งสองข้าง ดังภาพที่ 34



(ก)



(ข)

ภาพที่ 34 (ก) ลักษณะของถุงผ้าที่ใช้ประกอบกับสายพานคัดขนาด (ข) ภาพด้านบนแสดงช่องที่ผลชมพู่จะตกผ่านลงสู่สายพานคัดขนาด

ทำการทดสอบเบื้องต้นกับผลชมพู่พันธุ์ทูลเกล้าที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล แบ่งขนาดออกเป็น ขนาดใหญ่ (L) ขนาดกลาง (M) และขนาดเล็ก (S) ขนาดละ 38 ผล ดังรายละเอียดในตารางที่ 4 ที่ความเร็วของสายพานป้อนเท่ากับ 29 m/min และสายพานคัดขนาดเท่ากับ 21 m/min

ตารางที่ 4 ขนาดและจำนวนชมพู่พันธุ์ทุลเกล้าที่ใช้ทดสอบเบื้องต้น

ขนาด	จำนวน, ผล	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	ความสูงเฉลี่ย, mm	น้ำหนักเฉลี่ย, g
L	38	60.07 (1.81)	73.44 (4.82)	96.86 (6.31)
M	38	57.78 (1.02)	72.30 (5.47)	88.38 (6.77)
S	38	54.85 (2.63)	70.64 (6.18)	80.70 (7.72)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซนต์ C.V. (Coefficient of variation)

ทำการคำนวณความเสียหายของผลชมพู่ที่ผ่านการคัดแล้ว (ชนิดา, 2550) โดยปริมาณความเสียหายประเภทรอยชำ หรือ รอยดลอก วัดขนาดความเสียหายเป็นพื้นที่ ส่วนปริมาณความเสียหายประเภทรอยแตก และ รอยบาด วัดขนาดเป็นความยาว ดังสมการ (22) และ (23)

$$\text{เปอร์เซ็นต์รอยแตก หรือ รอยบาด} = \frac{\text{ขนาดความยาวรอยแตกหรือรอยบาดทั้งหมด}}{\text{ความสูงชมพู่เฉลี่ย}} \times 100 \quad (22)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย} = \frac{\text{จำนวนผลที่เกิดความเสียหายทั้งหมด}}{\text{จำนวนผลชมพู่ทั้งหมด}} \times 100 \quad (23)$$

ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์การเกิดความเสียหายกับผลชมพู่พันธุ์ทุลเกล้า

ขนาด	รอยดลอก, %	รอยแตกหรือบาด, %	ความเสียหาย, %
L	0.04 (322.45)	0.00 (0)	15.79
M	0.02 (387.42)	0.00 (0)	7.89
S	0.03 (599.54)	0.00 (0)	5.26

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซนต์ C.V. (Coefficient of variation)

พบว่าการบุผิวหน้าของสายพานคัดขนาด ด้วยแผ่นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ ผลไม้ ความหนา 2 มม. ร่วมกับการใช้ถุงผ้าคลุมการวางตัวของผลชมพูขณะตกสู่สายพานคัดขนาด ไม่ทำให้เกิดความเสียหายจากการบาดหรือแตกและความเสียหายจากการซ้ำ ความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นการถลอกทั้งหมดและเนื่องจาก ความเสียหายดังกล่าวไม่เกิดขึ้นกับผลชมพูทุกผล แต่เกิดเป็นบางผลเท่านั้น (ดังจะเห็นได้จากกรณีเกิดเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย) ดังนั้นจึงทำให้ค่า C.V. ในการทดลองสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ความเสียหายดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับขนาดของผล โดย ผลชมพูขนาดใหญ่จะเกิดความเสียหายได้ง่าย และมากกว่า ชมพูผลเล็ก

ในการทดลองนี้พบว่าแนวทางการใช้วัสดุกันกระแทกบุสายพานมีความเป็นไปได้สูงที่จะช่วยลดความเสียหายทางกลจากกระบวนการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดกับผลชมพู ดังนั้นแนวทางการดำเนินงานต่อไปจึงได้เพิ่มความหนาของวัสดุกันกระแทกให้มากขึ้น

1.2.3 การบุผิวหน้าของสายพานคัดขนาดด้วยแผ่นโฟมยาง (Latex foam) กันกระแทกหนา 4 มม. ร่วมกับการใช้ถุงผ้าคลุมการวางตัวของผลชมพูขณะตกสู่สายพานคัดขนาด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 35 (ก) และ (ข) ลักษณะแผ่นโฟมยางเมื่อบุกับสายพานคัดขนาดแล้ว

เปลี่ยนวัสดุกันกระแทกที่ใช้บุผิวหน้าสายพานคัดขนาดเป็นแผ่นโฟมยาง หนา 4 มม. (สีดำ) แทน ดังภาพที่ 35 ทำการทดสอบเบื้องต้นกับผลชมพู 3 พันธุ์ ได้แก่พันธุ์ทองสามสี พันธุ์ทับทิมจันทร์ และพันธุ์ทุลเกล้าที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล แบ่งขนาดออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ขนาดใหญ่ (L) ขนาดกลาง (M) และขนาดเล็ก (S) ขนาดละ 30 ผล ดังรายละเอียดใน

ตารางที่ 6 7 และ 8 ตามลำดับ ที่ความเร็วของสายพานป้อนเท่ากับ 29 m/min และสายพานคัดขนาดเท่ากับ 21 m/min

ตารางที่ 6 ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทองสามสี ที่ใช้ทดสอบ

ขนาด	จำนวน, ผล	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	ความสูงเฉลี่ย, mm	น้ำหนักเฉลี่ย, g
L	30	65.80 (7.79)	77.13 (6.80)	121.45 (13.91)
M	30	60.66 (1.58)	77.44 (6.82)	112.03 (9.32)
S	30	55.69 (5.27)	78.39 (7.51)	99.83 (12.23)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซนต์ C.V. (Coefficient of variation)

ตารางที่ 7 ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ ที่ใช้ทดสอบ

ขนาด	จำนวน, ผล	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	ความสูงเฉลี่ย, mm	น้ำหนักเฉลี่ย, g
L	30	61.29 (2.79)	76.48 (6.36)	111.04 (10.31)
M	30	57.10 (1.54)	72.48 (8.75)	95.73 (9.66)
S	30	52.99 (2.90)	71.96 (5.44)	84.55 (7.62)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซนต์ C.V. (Coefficient of variation)

ตารางที่ 8 ขนาดและจำนวนชมพูพันธุ์ทูลเกล้า ที่ใช้ทดสอบ

ขนาด	จำนวน, ผล	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	ความสูงเฉลี่ย, mm	น้ำหนักเฉลี่ย, g
L	30	60.27 (8.30)	78.21 (7.47)	105.02 (8.51)
M	30	56.70 (4.01)	76.06 (7.08)	89.95 (3.57)
S	30	54.36 (3.58)	71.43 (6.62)	75.79 (8.03)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซนต์ C.V. (Coefficient of variation)

เมื่อคำนวณความเสียหายตามสมการ (1) (2) และ (3) แล้วไม่พบว่าเกิดความเสียหายกับ
ชมพูที่ใช้ทดสอบทั้งสามพันธุ์ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 เปอร์เซ็นต์การเกิดความเสียหายกับผลชมพูทั้ง 3 พันธุ์

พันธุ์	ขนาด	รอยถลอก, %	รอยแตกหรือบาด, %	ความเสียหาย, %
ทองสามสี	L	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	M	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	S	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
ทับทิมจันทร์	L	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	M	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	S	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
ทูลเกล้า	L	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	M	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)
	S	0.00 (0)	0.00 (0)	0.00 (0)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ C.V. (Coefficient of variation)

จากผลการทดสอบเบื้องต้นทั้งหมด จะเห็นได้ว่า การใช้โฟมยางความหนา 4 มม.บุสายพาน
คัดขนาดร่วมกับถุงผ้าช่วยควบคุมการวางตัว สามารถป้องกันการเกิดความเสียหาย ได้แก่รอยถลอก
รอยบาดหรือแตก ได้ทั้งหมด โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลชมพูทุกผล

1.3 การทดสอบเครื่องคัดขนาดผลชมพู

แบ่งการทดสอบออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

1.3.1 การทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์

ทำการทดสอบเครื่องคัดขนาดผลชมพู ใช้ชมพู 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทูลเกล้า,
ทับทิมจันทร์ และทองสามสี ที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและ ชั่งน้ำหนักของผลชมพู ทำเครื่องหมายกำกับแต่ละผลตามขนาดที่กำหนด เป็นขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ขนาดละ 30 ผล รวมเป็น 90 ผล

2) ตั้งระดับของแผ่นแบ่งเกรดที่เครื่องคัดขนาดให้สมนัยกันกับระยะห่างในตารางที่ 2

3) ตั้งมุมเอียงของสายพานที่ 75 องศา และปรับความเร็วรอบของสายพานเครื่องคัดขนาดเท่ากับ 10 m/min

4) นำผลชมพูที่จะทดลองมาละขนาดกัน

5) เดินเครื่องป้อนผลชมพูด้วยความเร็วคงที่ ที่ 15 m/min ตลอดการทดลอง

6) ป้อนผลชมพูเข้าสู่เครื่องคัดขนาดอย่างต่อเนื่อง เริ่มจับเวลาตั้งแต่ผลชมพูผลแรกเข้าสู่ระบบการคัดขนาดจนถึงผลสุดท้าย เป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการป้อน และจับเวลาแต่ละเกรดเมื่อผลชมพูจะตกลงในถาดรองรับของแต่ละขนาดให้เริ่มจับเวลาเมื่อผลชมพูผลแรกตกออกจากสายพานลงสู่ช่องรับขนาดแต่ละขนาด จนถึงผลสุดท้ายของขนาดนั้นตกออกจากสายพาน

7) คัดแยกผลชมพูที่ตกถูกและตกผิดของแต่ละเกรด แล้วทดสอบซ้ำจาก ข้อ 1 - 6 อีก 4 ซ้ำ

8) เปลี่ยนความเร็วสายพานเครื่องคัดขนาดเป็น 10 และ 30 m/min ซึ่งเป็นความเร็วต่ำที่สุดและสูงที่สุด เมื่อทดสอบครบทุกความเร็วรอบแล้วเปลี่ยนมุมเอียงสายพานเป็น 80 และ 85 องศา

9) บันทึกและคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลชมพูตามสมการ (2), (3) และ (4) และข้อบกพร่องของเครื่องที่สังเกตได้ระหว่างการทดลอง

10) ประเมินผลเชิงวิศวกรรม (Buppata et. al., 2007) ได้แก่ประสิทธิภาพการคัดขนาด, เปอร์เซ็นต์ E_w ความสามารถในการคัดขนาด, Q (กิโลกรัม/ชั่วโมง) และอัตราส่วนการเจือปน

(เปอร์เซ็นต์ $\overline{C_R}$) โดยการวัดหาประสิทธิภาพการคัดขนาด ความสามารถในการคัดขนาด และ อัตราการเจือปนเฉลี่ย หาได้จากสมการการวิเคราะห์ (Peleg, 1985) ดังนี้

$$E_w = \sum \left(\frac{p_{gi} W_i G_i}{Q P_i} \right) \quad (24)$$

$$P_{gi} = \frac{N_{gi}}{N_{ti}} \quad (25)$$

$$N_{ti} = N_{gi} + N_{ij} \quad (26)$$

$$W_i = \frac{K_i P_i}{\sum K_i P_i} \quad (27)$$

$$P_i = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (28)$$

$$G_i = \frac{W_i}{t} \quad (29)$$

$$Q = \frac{W_t}{t} \quad (30)$$

$$\overline{C_R} = \frac{\sum N_{ij}}{\sum N_i} \quad (31)$$

เมื่อ	E_w	คือ	ประสิทธิภาพการคัดขนาด (Sizing efficiency)
	G_i	คือ	อัตราการไหลออก (Outflow rate) ของเกรด i (น้ำหนัก / เวลา)
	K_i	คือ	เศษส่วนมูลค่าหรือราคาที่สัมพันธ์กับเกรด i ต่างๆ
	N_i	คือ	จำนวนผลไม้เกรด i เมื่อป้อนเข้าสู่การคัดขนาด
	$\sum N_i$	คือ	จำนวนผลไม้ทั้งหมด n เกรด
	N_{ij}	คือ	จำนวนผลไม้เกรด j ที่ตกในช่องเกรด i

N_{gi}	คือ	จำนวนผลไม้เกรด i ที่ตกในช่องเกรด j (ถูกคัดออกมาถูกต้อง)
N_{ti}	คือ	จำนวนผลไม้ทั้งหมดที่ตกในช่องเกรด i
P_i	คือ	เศษส่วนของผลไม้เกรด i ในผลไม้ทั้งหมดเริ่มคัดขนาด
P_{gi}	คือ	เศษส่วนของผลไม้เกรด i ที่ถูกต้องที่คัดได้ในช่องเกรด i
Q	คือ	อัตราการไหลเข้า (Inflow rate) (น้ำหนัก/เวลา)
T	คือ	เวลาที่ใช้ในการคัดขนาด
W_i	คือ	Weighting function
w_i	คือ	น้ำหนักรวมของผลไม้ที่ตกในตกในช่องเกรด i (สมนัยกับ N_{ti})
w_t	คือ	น้ำหนักรวมของผลไม้ทั้งหมด (สมนัยกับ $\sum N_i$)
C_R	คือ	อัตราส่วนการเจือปนเฉลี่ย (Contamination ratio)

11) ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-10 โดยเปลี่ยนพันธุ์ชมพูให้ครบทั้ง 3 พันธุ์

1.3.2 การทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อน

ทำการทดสอบเครื่องคัดขนาดผลชมพู โดยใช้ชมพู 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทูลเกล้า, ทับทิมจันทร์ และทองสามสี ที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวและ ชั่งน้ำหนักของผลชมพู ทำเครื่องหมายกำกับแต่ละผลตามขนาดที่กำหนด เป็นขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ขนาดละ 30 ผล รวมเป็น 90 ผล

2) ตั้งระดับของแผ่นแบ่งเกรดที่เครื่องคัดขนาดให้สมนัยกันกับระยะในตารางที่ 2

3) ตั้งมุมเอียงและความเร็วของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1.3.1 (การทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์)

4) นำผลชมพูที่จะทดลองมาละก้านขนาด

5) เดินเครื่องป้อนผลชมพูด้วยความเร็ว 5 m/min

6) ป้อนผลชมพูเข้าสู่เครื่องคัดขนาดอย่างต่อเนื่อง เริ่มจับเวลาตั้งแต่ผลชมพูผลแรกเข้าสู่ระบบการคัดขนาดจนถึงผลสุดท้าย เป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการป้อน และจับเวลาแต่ละเกรดเมื่อผลชมพูจะตกลงในถาดรองรับของแต่ละขนาด ให้เริ่มจับเวลาเมื่อผลชมพูผลแรกตกออกจากสายพานลงสู่ช่องรับขนาดแต่ละขนาด จนถึงผลสุดท้ายของขนาดนั้นตกออกจากสายพาน

7) คัดแยกผลชมพูที่ตกถูกและตกผิดของแต่ละเกรด แล้วทดสอบซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1-6 อีก 4 ซ้ำ

8) เปลี่ยนความเร็วสายพานเครื่องป้อน เป็น 15 20 และ 25m/min แล้วทดสอบตามข้อ 1-7 อีกครั้ง

9) บันทึกและคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลชมพูตามสมการ (21) (22) และ (23) และข้อบกพร่องของเครื่องที่สังเกตได้ระหว่างการทดลอง

10) ประเมินผลเชิงวิศวกรรม (Chanida. et. al., 2007) ได้แก่ประสิทธิภาพการคัดขนาด, เปอร์เซ็นต์ E_w อัตราการคัดขนาด, Q (กิโลกรัม/ชั่วโมง) และอัตราส่วนการเจือปน (เปอร์เซ็นต์ C_R) ตามสมการ (24) (30) และ (31)

11) ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-10 โดยเปลี่ยนพันธุ์ชมพูให้ครบทั้ง 3 พันธุ์

1.3.3 การทดสอบลักษณะการจัดวางทรงผลชมพู

ทำการทดสอบเครื่องคัดขนาดผลชมพู โดยใช้ชมพู 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทุลเกล้า, ทับทิมจันทร์ และทองสามสี ที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวและ ชั่งน้ำหนักของผลชมพู ทำเครื่องหมายกำกับแต่ละผลตามขนาดที่กำหนด เป็นขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ขนาดละ 30 ผล รวมเป็น 90 ผล
- 2) ตั้งระดับของแผ่นแบ่งเกรดที่เครื่องคัดขนาดให้สมนัยกันระยะในกับตารางที่ 2
- 3) ตั้งมุมเอียงและความเร็วของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1.3.1 (การทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์)
- 4) นำผลชมพูที่จะทดลองมาละกันขนาด
- 5) เดินเครื่องป้อนผลชมพูด้วยความเร็วที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1.3.2 (การทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อน)
- 6) ป้อนผลชมพูเข้าสู่เครื่องคัดขนาดอย่างต่อเนื่อง เริ่มจับเวลาตั้งแต่ผลชมพูผลแรกเข้าสู่ระบบการคัดขนาดจนถึงผลสุดท้าย เป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการป้อน และจับเวลาแต่ละเกรดเมื่อผลชมพูจะตกลงในถาดรองรับของแต่ละขนาดให้เริ่มจับเวลาเมื่อผลชมพูผลแรกตกออกจากสายพานลงสู่ช่องรับขนาดแต่ละขนาด จนถึงผลสุดท้ายของขนาดนั้นตกออกจากสายพาน
- 7) คัดแยกผลชมพูที่ตกถูกและตกผิดของแต่ละเกรด แล้วทดสอบซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1-6 อีก 4 ซ้ำ
- 8) บันทึกและคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลชมพูตามสมการ (21) (22) และ (23) และข้อบกพร่องของเครื่องที่สังเกตได้ระหว่างการทดลอง
- 9) ประเมินผลเชิงวิศวกรรม (Chanida. et. al., 2007) ได้แก่ประสิทธิภาพการคัดขนาด, เปอร์เซ็นต์ E_w อัตราการคัดขนาด, Q (กิโลกรัม/ชั่วโมง) และอัตราส่วนการเจือปน (เปอร์เซ็นต์ C_R) ตามสมการ (24) (30) และ (31)

10) ดำเนินการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนการป้อนผลชมพูจากแบบปกติเป็นแบบเล็กลงให้ ด้านเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (Maximum diameter) บริเวณฐานผล อยู่ในท่าที่พร้อมจะสัมผัสกับ สายพานคัดขนาดได้

11) ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-10 โดยเปลี่ยนพันธุ์ชมพูให้ครบทั้ง 3 พันธุ์

1.3.4 การทดสอบหาความเสียหายของผลชมพูที่ผ่านการคัดขนาด

ประเมินความเสียหายเชิงกลของผลชมพูที่คัดจากเครื่องคัด ด้วยการเลือก ตัวอย่างจำนวน 5 กลุ่ม ใน 1 กลุ่ม มีผลขนาดเล็ก, ขนาดกลางและขนาดใหญ่อย่างละ 6 ผล ที่ได้จากการวางผลแบบ Maximum diameter นำมาเก็บรักษาพร้อมกับผลชมพูชุดควบคุม ซึ่งคัดคุณภาพแล้ว ปรายจากตำหนิ จำนวนกลุ่มและผลเท่ากัน คำนวณความเสียหายด้วยสมการ (23) เป็นเวลา 5 วัน (เทียบเท่าระยะเวลาการจัดจำหน่ายของชมพู) และวิเคราะห์ผลด้วยวิธี DMRT

1.3.5 ทดสอบการทำงานของเครื่องคัดขนาดแบบต่อเนื่องในเชิงการค้า (ระดับ วิสาหกิจ)

ทำการทดสอบเครื่องคัดขนาดผลชมพู โดยใช้ชมพู 2 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทับทิม จันท์ และทองสามสี ที่คัดคุณภาพแล้วและไม่มีตำหนิความเสียหายบนผล ดั้งชั้นตอนต่อไปนี

1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวและ ชั่งน้ำหนักของผลชมพู ทำเครื่อง หมายถึงกับ แต่ละผลตามขนาดที่กำหนด เป็นขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) โดยใช้ชมพู น้ำหนักรวมประมาณ 46 kg

2) ตั้งระดับของแผ่นแบ่งเกรดที่เครื่องคัดขนาดให้สมนัยกันกับระยะในตารางที่ 2

3) ตั้งมุมเอียงและความเร็วของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ซึ่งได้ จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1.3.1 (การทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสม สำหรับชมพูแต่ละพันธุ์)

4) เดินเครื่องป้อนผลชมพูด้วยความเร็วที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1.3.2 (การทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อน)

5) ป้อนผลชมพูเข้าสู่เครื่องคัดขนาดอย่างต่อเนื่อง เริ่มจับเวลาตั้งแต่ผลชมพูผลแรกเข้าสู่ระบบการคัดขนาดจนถึงผลสุดท้าย เป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการป้อน และจับเวลาแต่ละเกรดเมื่อผลชมพูจะตกลงในถาดรองรับของแต่ละขนาดให้เริ่มจับเวลาเมื่อผลชมพูผลแรกตกออกจากสายพานลงสู่ช่องรับขนาดแต่ละขนาด จนถึงผลสุดท้ายของขนาดนั้นตกออกจากสายพาน

6) คัดแยกผลชมพูที่ตกถูก และตกผิดของแต่ละเกรด

7) บันทึกและคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลชมพูตามสมการ (21) (22) และ (23) และข้อบกพร่องของเครื่องที่สังเกตได้ระหว่างการทดลอง

8) ประเมินผลเชิงวิศวกรรม (Bupata et. al., 2007) ได้แก่ อัตราการคัดขนาด, Q (กิโลกรัม/ชั่วโมง) และอัตราส่วนการเจือปน (เปอร์เซ็นต์ C_R) ตามสมการ (30) และ (31)

9) ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 - 8 โดยเปลี่ยนพันธุ์ชมพูให้ครบทั้ง 2 พันธุ์

1.3.6 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การประเมินค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องต้นแบบมีดังนี้ (ไพบูลย์, 2546)

1) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมด (AC) ในการคัดขนาดผลชมพู/กิโลกรัมสามารถหาได้จาก

$$AC = FC + VC \quad (32)$$

เมื่อ FC = ค่าเสื่อมราคาของเครื่องคัดขนาดผลไม้ (D) + เสียโอกาสในการลงทุน (R)

VC = ค่าจ้างแรงงาน (W) + ค่าไฟฟ้า (E) + ค่าบำรุงรักษา (M)

ค่าเสื่อมราคา (คิดโดยวิธีตรง)

$$D = \frac{(P - S)}{L} \quad (33)$$

ค่าเสียโอกาสในการลงทุน

$$R = \frac{(P + S)}{2} \times i \quad (34)$$

โดยที่ P = ราคาซื้อหรือสร้างเครื่องคัดขนาดผลไม้ (บาท)
 L = อายุการใช้งานเครื่องคัดขนาด \approx 10 ปี
 S = ราคาเครื่องเมื่อครบ 10 ปี = $0.1 * P$ (บาท)
 D = ค่าเสื่อมราคา/ปี (บาท/ปี)
 R = ค่าเสียโอกาสในการลงทุน/ปี (บาท/ปี)
 I = อัตราดอกเบี้ย

3) จุดคุ้มทุน (Break-even analysis) คือจุดที่รายได้กับรายจ่ายเท่ากัน โดยพิจารณาจาก

$$N^* = \frac{F}{p - v} \quad (35)$$

โดยที่ N^* = ปริมาณผลิตที่จุดคุ้มทุนพอดี
 F = ต้นทุนคงที่
 p = ราคาขายต่อหน่วย
 v = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

4) ระยะเวลาการลงทุน (Payback period) ระยะเวลาที่ทำให้รายจ่ายเท่ากับรายรับ หาก

$$PBP = \frac{MC}{P} \quad (36)$$

โดยที่ PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)
 MC = ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง (บาท)
 P = กำไร (บาท/ปี)

ค่าใช้จ่ายและต้นทุนในการซื้อหรือสร้างเครื่องคัดขนาดผลชมพูในที่นี่คิดเฉพาะราคาการจัดซื้อหรือสร้าง ไม่คิดค่าที่ดิน โรงเรือน ค่าประกันโรงเรือน และอื่นๆ

2. เทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของมะพร้าวอ่อน

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลของมะพร้าวอ่อนพบว่า การเจริญเติบโตของมะพร้าว เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่สำคัญ คือ

- ขนาดของผล ตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความกว้างของผล, ความสูง และน้ำหนักผล เนื่องจาก เมื่อมะพร้าวเจริญเติบโตมากขึ้น ขนาดของผลจะใหญ่ขึ้นและน้ำหนักมากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่เมื่อถึงระยะการเจริญเติบโตหนึ่งพบว่า ขนาดของผลจะคงที่ แต่น้ำหนักจะลดลงเนื่องจากความชื้นของเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงไป ตัวแปรสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เลือกใช้คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (Dr), cm ความสูง (H), cm และความถ่วงจำเพาะ (SG)

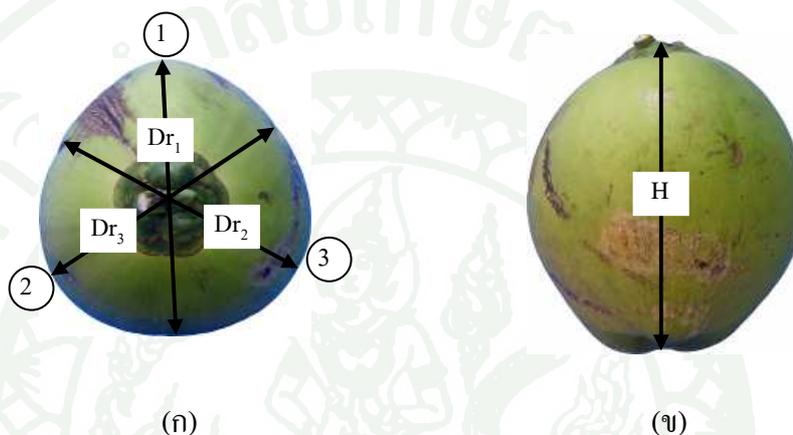
- สีผิวเปลือก ตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือค่าสี เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณใกล้ขั้วผลอย่างสัมพันธ์กับระยะการเจริญเติบโตตัวแปรสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เลือกใช้คือ Spectrum การดูดกลืนแสงในย่าน Visible range (VIS), nm

- เสียงสะท้อนของผลมะพร้าว ตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ เนื่องจาก เมื่อผลมะพร้าวมีการเจริญเติบโต จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและน้ำหนัก พร้อมกับมีการสะสมของน้ำและเนื้อมะพร้าวภายในกะลาเพิ่มขึ้น ปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการตอบสนองทางเสียงของผล ตัวแปรที่เลือกใช้คือ ความถี่สั่นพ้องยอดที่ 1 (1st peak of natural frequency), Hz

ทำการทดสอบกับผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอม กั้นจิบจากสวนส่งออก จังหวัดสมุทรสาคร โดยใช้มะพร้าวอ่อนคละวัย จำนวน 160 ผล ดำเนินการทดสอบดังต่อไปนี้

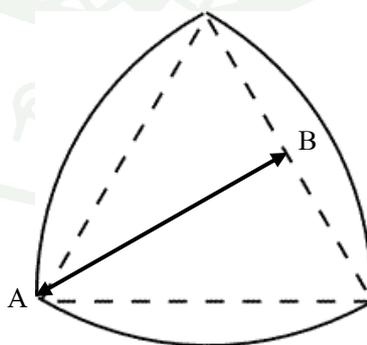
2.1 การหาลักษณะทางกายภาพของมะพร้าวอ่อน

- 1) ทำการวัดความสูง (H) ของผล (ภาพที่ 36 ข) ด้วยคาลิเปอร์และไม้บรรทัด
- 2) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย Dr_1 , Dr_2 และ Dr_3 ด้วยระยะตั้งฉากจากด้านของผลถึงปลายสัน (ภาพที่ 36 ก) ในระนาบตัดขวางผล



ภาพที่ 36 ตำแหน่งและระยะต่างๆของผลมะพร้าวอ่อน

ระยะดังกล่าวนี้ถูกใช้เป็นขนาดของผลมะพร้าวแทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและน้อยสุด (Maximum diameter และ Minimum diameter) โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง Dr นี้ คล้ายคลึงกับ ระยะ AB ในรูปทรงเรขาคณิตของสามเหลี่ยม Reuleaux tri-angle (Smith, 1993) ในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 สามเหลี่ยม Reuleaux tri-angle

ที่มา: Smith (1993)

3) หาค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) ของผลมะพร้าวอ่อนด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Mohsenin, 1996) โดยใช้ภาชนะใส่น้ำ แล้ววางบนเครื่องชั่งน้ำหนักชนิดตัวเลข นำผลมะพร้าววางลงในน้ำแล้วกดผลมะพร้าวให้จมพอดีกับผิวน้ำ (ภาพที่ 38) และคำนวณค่าตามสมการ (37)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักของผลมะพร้าวอ่อนในอากาศ}}{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกผลมะพร้าวอ่อนแทนที่}} \quad (37)$$



(ก)

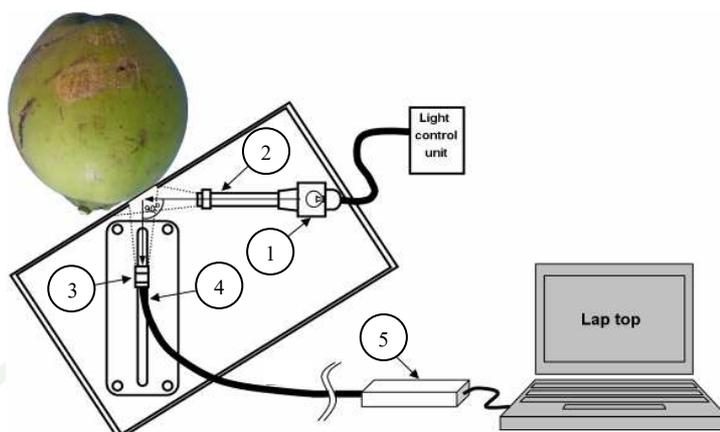


(ข)

ภาพที่ 38 การหาความถ่วงจำเพาะของผลมะพร้าวอ่อน (ก) ชั่งน้ำหนักผลมะพร้าวอ่อนในอากาศ (ข) ชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกผลมะพร้าวอ่อนแทนที่

2.2 การทดสอบหาการดูดกลืนแสงของมะพร้าวอ่อน

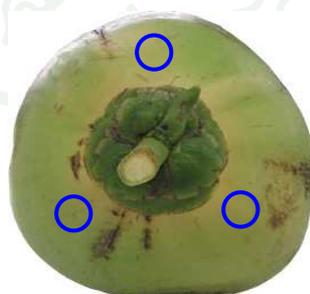
ใช้ชุดทดสอบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังภาพที่ 39 ซึ่งประกอบไปด้วยหลอดไฟฮาโลเจน 150 W Olympus 605020 (หมายเลข 1) สายไฟเบอร์ออปติก (หมายเลข 2) และเลนส์ (หมายเลข 3) Detector fiber QP1000-2-UV/VIS (หมายเลข 4) ตัวรับและแปลงสัญญาณ USB2000 OCEAN OPTIC (หมายเลข 5) และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล



ภาพที่ 39 ไลอะแกรมของการทดสอบวัดค่าทางแสง

การทำงานของชุดทดสอบเริ่มจากแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน 150 W จะถูกบังคับให้ฉายไปยังตัวอย่างด้วยสายไฟเบอร์ออปติก และเลนส์ ที่ตั้งค่านุมระหว่างแสงกับ Detector fiber เป็น 90° ที่ระยะ 3 cm สัญญาณการสะท้อนของแสง (Reflectance mode) จะถูกตรวจรับด้วย Detector fiber optic และสัญญาณจะถูกแปลงและประมวลผลด้วย USB2000 ก่อนจะส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์และคำนวณด้วยโปรแกรม Spectra suite OCEAN OPTIC ต่อไป ในการทดสอบนี้ใช้แท่งเทฟลอนสีขาวเป็นวัตถุในการสอบเทียบแสง

1) ทำการวัดแสงใน Reflectance mode กับส่วนสัน (หมายเลข 1, 2, 3 ในภาพที่ 36 ก) ทั้ง 3 ของผลมะพร้าวด้วยชุดการทดสอบในภาพที่ 39 กับมะพร้าวทั้ง 160 ผล บนผิวมะพร้าวที่ระยะห่างจากขอบของหัวผลประมาณ 2 cm (ภาพที่ 40)

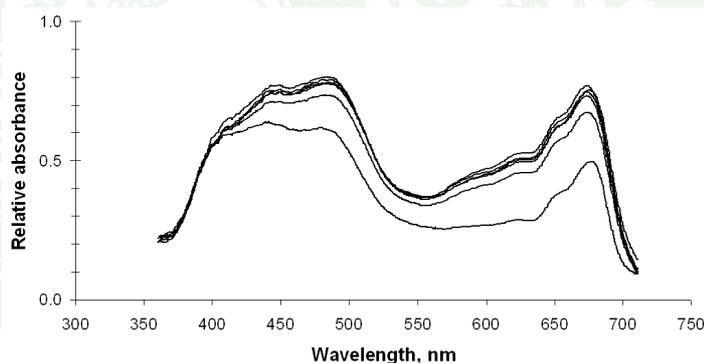


ภาพที่ 40 ตำแหน่งการวัดการดูดกลืนแสงบนสันทั้ง 3 ของมะพร้าวอ่อน

2) สัญญาณที่ได้จากตัวอย่างจะถูกคำนวณปรับปรุงสัญญาณด้วยการทำ Normalize โดยการหารด้วยค่าการสะท้อนแสงของแท่งเพลก่อนตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ทำการวัด จากนั้นเพื่อปรับให้สัญญาณอยู่ในช่วงการคำนวณที่ต้องการ จะทำการ Normalize ด้วยการหารสัญญาณอีกครั้งด้วยค่าการสะท้อนแสงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแถบ Spectrum

3) สัญญาณใน Reflectance mode (R_R) ที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณใน Absorbance mode (A_R) ด้วยสมการ (38) และนำค่าจากเส้นทั้ง 3 มาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของมะพร้าวหนึ่งผล ตัวอย่างของสัญญาณ Absorbance ที่ได้จากมะพร้าวอ่อนจำนวนหนึ่ง แสดงในภาพที่ 41

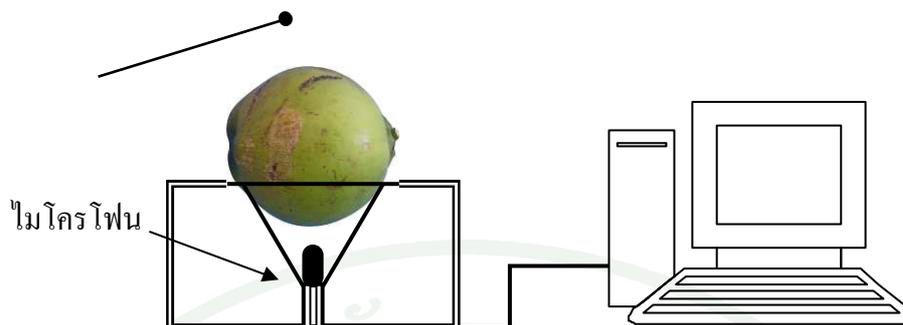
$$A_R = \text{LOG}_{10} \left[\frac{1}{R_R} \right] \quad (38)$$



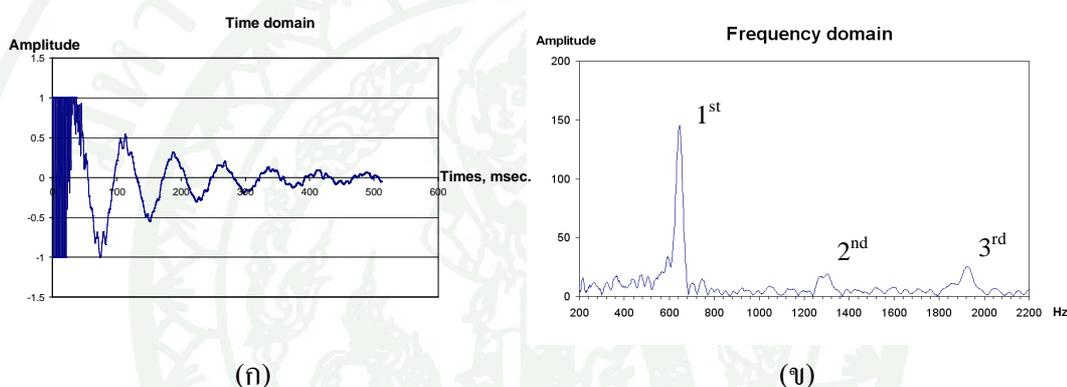
ภาพที่ 41 ตัวอย่างสัญญาณการดูดกลืนแสงของมะพร้าวอ่อน

2.3 การทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของมะพร้าวอ่อน

การหาความถี่ธรรมชาติหรือความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency, f_n (Hz)) ของผลมะพร้าวอ่อน ใช้อุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติเสียง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เครื่องคอมพิวเตอร์, ไมโครโฟน และ ชุดเคาะผลไม้ (ภาพที่ 42) ทดสอบสมบัติทางเสียง โดยเคาะบริเวณกึ่งกลางเส้นทั้ง 3 ด้วยไม้เคาะ เสียงที่เกิดขึ้นจะถูกไมโครโฟนรับและส่งสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ บันทึกสัญญาณนั้นและทำการแปลงสัญญาณจาก Time domain ไปเป็น Frequency domain ด้วยวิธี Fast-Fourier Transform (FFT) ที่ Sampling rate 0.125 msec. จำนวนข้อมูล 4,096 จุด Resolution ของสัญญาณภายหลังการแปลง FFT แล้ว เท่ากับ 1.95 Hz ตัวอย่างของสัญญาณที่ได้แสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 42 โครงสร้างของชุดอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติเสียง



ภาพที่ 43 (ก) ตัวอย่างสัญญาณใน Time domain (ข) ตัวอย่างสัญญาณใน Frequency domain

1) ทดสอบเกาะบริเวณกึ่งกลางสันทั้ง 3 ของมะพร้าวอ่อนเพื่อหาสัญญาณเสียงสะท้อนกับมะพร้าวทั้ง 160 ผล

2) นำค่าสูงสุดบนกราฟความถี่ ซึ่งปรากฏเป็น 1st peak ของสันทั้ง 3 มาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของผลมะพร้าวอ่อน จากนั้นทำการคำนวณเป็นค่า Sound stiffness, S_s เซิงมวล (Pathaveerat et. al., 2008) และเซิงปริมาตร ด้วยค่ามวล และค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D_r ตามสมการ (39) และ (40)

$$S_{s_{\text{mass}}} = f_n^2 m^{2/3} \quad (39)$$

$$S_{s_{D_r}} = f_n^2 D_r^{2/3} \quad (40)$$

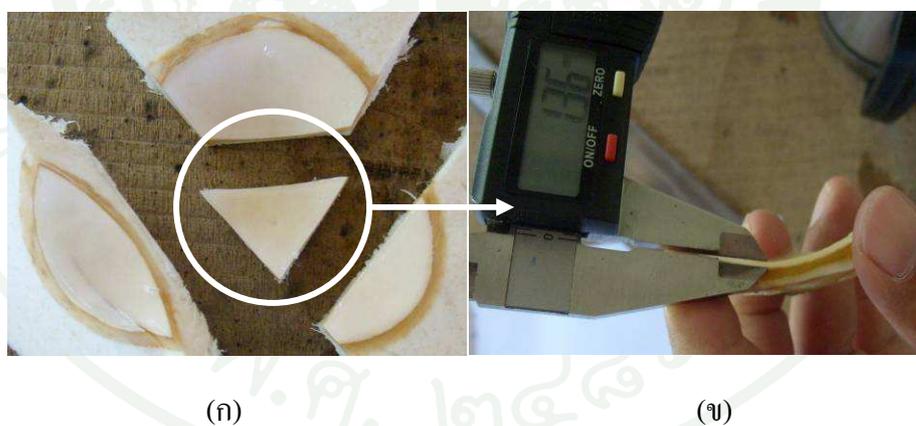
เมื่อ

Ss_{mass}	Sound stiffness of mass, $\text{Hz}^2 \text{kg}^{2/3}$
Ss_{Dr}	Sound stiffness of volume, $\text{Hz}^2 \text{cm}^{2/3}$
m	มวลของผลมะพร้าวอ่อน, kg
Dr	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของผลมะพร้าวอ่อน, cm
f_n	1 st peak ของความถี่สั่นพ้อง, Hz

2.4 การตรวจพิสูจน์วัยของมะพร้าวอ่อน

ภายหลังจากที่ทำการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเสร็จสิ้นแล้ว ทำการผ่าผลมะพร้าวทุกผล เพื่อตรวจสอบวัยที่แท้จริงของมะพร้าวโดย

- 1) หาค่าเฉลี่ยของ Flesh thickness (FT) รอบตาน้ำที่ระยะห่างประมาณ 1 cm จำนวน 3 จุด ดังภาพที่ 44 (Terdwongworakul et. al., 2009 and Meeklangsaen, 2007)



ภาพที่ 44 (ก) ตาน้ำ (ข) การวัดความหนาเนื้อด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์

- 2) ประเมินวัยมะพร้าวอ่อนออกเป็น 3 วัย คือ วัยอ่อน (Immature stage, IS) วัยพอดี (Mature stage, MS) และวัยแก่ (Over mature stage, OS) โดยใช้ค่า FT ในการแยก (Meeklangsaen, 2007) เมื่อ วัย IS คือ $FT < 1.75 \text{ mm}$ วัย MS คือ $1.76 \text{ mm} \leq FT \leq 3.80 \text{ mm}$ และ วัย OS คือ $FT > 3.81 \text{ mm}$

2.5 การวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อจำแนกวัย

ทำการวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อจำแนกวัยของมะพร้าวอ่อนออกเป็นวัยอ่อน (IS) วัยพอดี (MS) และวัยแก่ (OS) ด้วยการใช้ตัวแปรจากการทดสอบแบบไม่ทำลายทั้งหมด ได้แก่ ตัวแปรจากกลุ่มลักษณะทางกายภาพ คือ Dr, H และ SG ตัวแปรจากกลุ่มการตอบสนองเชิงเสียง คือ f_n , Ss_{mass} และ Ss_{Dr} และกลุ่มตัวแปรจากค่าการดูดกลืนแสง ทำการแบ่งวัยดังขั้นตอนต่อไปนี้

1) ทำการประมวลผลเพื่อจำแนกวัยด้วยการวิเคราะห์ Discriminant analysis โดยโปรแกรม SPSS version 11.5 (SPSS Inc., Chicago, USA) ใช้การคำนวณแบบ leave-one-out cross validation

2) การจำแนกวัยจะกระทำ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการแยกวัย OS ออกจากกลุ่มของวัย IS และ MS ก่อน จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการแยกวัย IS ออกจาก MS

3) กลุ่มของตัวแปรที่ใช้ประมวลผลแบ่งออกได้ดังนี้

3.1) เลือกใช้ตัวแปรเฉพาะกลุ่มลักษณะทางกายภาพ

3.2) เลือกใช้ตัวแปรเฉพาะกลุ่มการตอบสนองทางเสียง

3.3) ใช้ตัวแปรทั้งกลุ่มลักษณะทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง

3.4) ใช้ตัวแปรเฉพาะจากค่าการดูดกลืนแสง

3.5) ใช้ตัวแปรทั้งกลุ่มลักษณะทางกายภาพ การตอบสนองทางเสียงและตัวแปร

จากค่าการดูดกลืนแสงของผลมะพร้าวอ่อน

4) เมื่อได้ค่าการจำแนกกลุ่มที่ดีที่สุดแล้วทดลองแบ่งตัวอย่างมะพร้าวอ่อนออกเป็นสองกลุ่ม ด้วยการนำตัวอย่างมะพร้าวทั้ง 160 ผลมาเรียงลำดับตามค่า FT จากนั้นน้อยไปมากแล้วทำการเลือก กลุ่มที่ถูกเลือก (Selected group) เพื่อประมวลผลจำแนกวัยจำนวน 107 ผล และกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก (Unselected group) จำนวน 53 ผล แบบเลือก 2 ค่าต่อ 1 ค่า เพื่อใช้สมการการจำแนกที่ได้จากกลุ่มที่ถูกเลือกมาทดสอบจำแนกวัยกับ กลุ่มที่ไม่ถูกเลือกเพื่อประเมินประสิทธิภาพการจำแนกต่อไป

สถานที่ทำการทดสอบ

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

ระยะเวลาในการทดสอบ

เริ่มทำการทดสอบตั้งแต่ เดือนสิงหาคม 2550 สิ้นสุดเดือนมีนาคม 2553

ทุนสนับสนุนการวิจัย

โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการ
เก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัด
ปทุมธานี

ผลและวิจารณ์

1. การพัฒนาเครื่องกลัดขนาดผลชมพู

1.1 การทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์

ความเร็วสายพานที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกลัดขนาดผลชมพูแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30 m/min โดยใช้ชมพูในการทดสอบทั้งหมด 3 พันธุ์ แต่ละพันธุ์แบ่งเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ กลาง เล็ก ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาดแสดงดังตารางที่ 10 - 12 สำหรับชมพูพันธุ์ทูลเกล้า, ทับทิมจันทร์และทองสามสีตามลำดับ

ตารางที่ 10 ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพูพันธุ์ทูลเกล้า

ความเร็วสายพานคัด ขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	244.53 ±17.42	153.59 ±35.37	227.48 ±5.32
20	246.62 ±8.10	257.62 ±41.34	254.07 ±1.43
30	260.84 ±4.00	203.49 ±25.23	169.26 ±2.12

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 11 ผลการประเมินสมรรถนะในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	353.57±5.25	397.80±16.00	318.93±11.93
20	357.34±4.54	329.12±14.82	334.65±2.90
30	356.90±7.81	344.52±6.44	332.34±3.56

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 12 ผลการประเมินอัตราการทำงานในการคัดขนาด (kg/hr) ชมพู่พันธุ์ทองสามสี

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	213.64±8.05	269.35±23.66	246.86±7.77
20	206.82±13.10	247.64±11.86	217.28±13.13
30	245.02±6.05	250.49±8.92	139.46±28.35

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

จะเห็นได้ว่าโดยที่มุมของสายพานคัดขนาดเป็น 80 องศา ความเร็วสายพานคัดขนาดเป็น 10 m/min จะให้ อัตราการคัดขนาดในชมพู่ทุกพันธุ์สูงที่สุด และอัตราการคัดขนาดของชมพู่พันธุ์ทับทิมจันทร์จะสูงกว่าการคัดขนาดชมพู่พันธุ์อื่นทุกเงื่อนไขการทดสอบ โดยสมรรถนะการคัดขนาดของชมพู่พันธุ์ทุลเกล้าเท่ากับ 153.59 - 260.84 kg/hr พันธุ์ทับทิมจันทร์เท่ากับ 329.12-397.80 kg/hr และพันธุ์ทองสามสีเท่ากับ 139.46 - 269.35 kg/hr เนื่องจากการป้อนผลขึ้นอยู่กับความชำนาญและความระมัดระวังของผู้ป้อน และผลชมพู่พันธุ์ทุลเกล้าและทองสามสีมีผิวบอบบางกว่าพันธุ์ทับทิมจันทร์ จึงต้องใช้ความระมัดระวังในการปฏิบัติงานสูงกว่า จึงทำให้สมรรถนะการทำงานของเครื่องต่ำกว่าไปด้วย ทั้งนี้ในการทดสอบใช้คนป้อน 1 คน ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 13 ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทุลเกล้า

ความเร็วสายพานคัด ขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	26.35±4.00 ^{ab}	25.71±2.91 ^{ab}	30.19±4.58 ^{abc}
20	26.48±7.53 ^{ab}	33.14±6.28 ^{bc}	23.30±4.19 ^{bc}
30	27.44±3.48 ^{bc}	33.37±2.45 ^a	25.26±3.91 ^{ab}

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 14 ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทับทิมจันทร์

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	17.70±5.33 ^{abc}	20.74±9.17 ^{bcd}	25.25±5.09 ^d
20	12.13±3.39 ^a	24.25±5.86 ^{cd}	24.64±5.14 ^{cd}
30	16.89±1.89 ^{ab}	19.15±3.61 ^{abcd}	15.99±0.47 ^{ab}

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 15 ผลการประเมินความผิดพลาดในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทองสามสี

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	24.07±2.76 ^{ab}	22.50±3.66 ^{ab}	28.60±4.95 ^b
20	29.01±5.05 ^b	18.91±3.26 ^a	21.49±4.46 ^a
30	23.85±3.25 ^{ab}	19.91±7.94 ^a	20.49±5.58 ^a

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี DMRT (Duncan's Multiple's Range Test) พบว่า ในชมพูพันธุ์ทุลเกล้า ความเร็วของสายพานคัดขนาดมีผลต่อค่าความผิดพลาดในการคัดขนาด (เปอร์เซ็นต์ Cr) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนมุมของสายพานคัดขนาดไม่มีผลต่อค่า Cr และจากตารางที่ 13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุดคือ 23.30 % ที่มุมเอียงสายพาน 80 องศา และความเร็วสายพานคัดขนาด 20 m/min

สำหรับชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์และทองสามสี พบว่ามมูมเอียงของสายพานคัดมีผลต่อค่าความผิดพลาดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เช่นกัน แต่ความเร็วของสายพานคัดขนาดไม่มีผลต่อค่าความผิดพลาด และที่มมูมเอียงสายพาน 75 องศา และ 80 องศา พบว่าชมพูจะเกิดความเสียหายน้อยที่สุดที่ 12.13 % และ 18.91% สำหรับชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์และทองสามสีตามลำดับ ที่ความเร็วสายพานคัดขนาด 20 m/min เหมือนกันทั้งสองพันธุ์ (ตารางที่ 14 และ 15)

ตารางที่ 16 ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทูลเกล้า

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มมูมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	76.13±8.07 ^{ab}	80.11±10.95 ^{ab}	70.19±4.45 ^b
20	80.32±10.49 ^{ab}	75.24±7.23 ^{ab}	79.74±5.21 ^{ab}
30	81.97±7.82 ^a	74.91±4.92 ^{ab}	76.24±6.07 ^{ab}

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 17 ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทับทิมจันทร์

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มมูมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	91.97±5.47 ^{ab}	85.42±7.96 ^{ab}	76.18±8.26 ^a
20	92.77±2.63 ^b	88.85±11.07 ^{ab}	86.76±6.83 ^{ab}
30	88.22±1.96 ^{ab}	91.22±5.33 ^{ab}	92.49±5.79 ^{ab}

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 18 ผลการประเมินประสิทธิภาพในการคัดขนาด (%) พันธุ์ทองสามสี

ความเร็วสายพาน คัดขนาด (m/min)	มุมเอียงสายพาน		
	75 ^o	80 ^o	85 ^o
10	94.96±3.76 ^b	88.42±8.73 ^{ab}	87.09±8.92 ^{ab}
20	95.55±4.73 ^b	88.22±7.64 ^a	92.39±6.28 ^{ab}
30	95.10±3.16 ^b	93.54±5.15 ^b	84.16±4.94 ^a

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

สำหรับประสิทธิภาพการคัดขนาด, %Ew เมื่อวิเคราะห์ด้วย วิธีการ DMRT แล้ว พบว่า มุมเอียงสายพานและ ความเร็วสายพานคัดขนาด ไม่มีผลต่อค่า Ew ในการคัดขนาดชมพูทั้งสามพันธุ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

สรุปผลการทดสอบเพื่อหาสภาวะในการคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพูแต่ละพันธุ์ ที่ให้ค่าความผิดพลาดในการคัดขนาด, %Cr ต่ำที่สุด ดังนี้

- 1) สำหรับชมพูพันธุ์ทูลเกล้ามุมสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 85 องศา และความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 20 m/min
- 2) สำหรับชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์มุมสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 75 องศา และความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 20 m/min
- 3) สำหรับชมพูพันธุ์ทองสามสีมุมสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 80 องศา และความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 20 m/min

1.2 การทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อน

เมื่อปรับตั้งมุมเอียงและความเร็วของสายพานเครื่องคัดขนาดที่เหมาะสมสำหรับชมพู่แต่ละพันธุ์ ตามผลการทดสอบแรกแล้ว และทำการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนที่ความเร็วป้อน 5, 15, 20 และ 25 m/min ได้ผลดังตารางที่ 19 20 และ 21 ตามลำดับ

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพู่พันธุ์ทูลเกล้า

ความเร็วสายพานป้อน (m/min)	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
5	216.81±2.72 ^a	12.58±2.13 ^a	88.18±2.52 ^a
15	244.69±1.37 ^c	5.80±2.05 ^b	96.80±1.22 ^b
20	262.20±3.56 ^b	11.35±2.16 ^a	92.26±1.99 ^a
25	224.91±3.05 ^d	16.02±1.66 ^c	89.69±5.36 ^a

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพู่พันธุ์ทับทิมจันทร์

ความเร็วสายพานป้อน (m/min)	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
5	208.63±0.38 ^a	18.04±2.56 ^a	92.90±2.15 ^a
15	357.34±4.54 ^b	12.13±3.39 ^b	92.77±2.63 ^a
20	439.12±25.86 ^c	24.24±2.40 ^c	86.68±5.80 ^b
25	434.46±19.95 ^c	23.16±4.15 ^c	85.77±4.94 ^b

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนของชมพูพันธุ์ทองสามสี

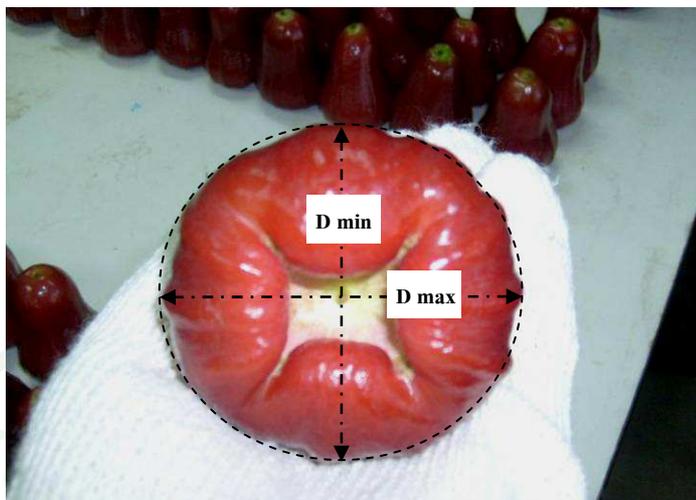
ความเร็วสายพานป้อน (m/min)	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
5	211.04±8.97 ^a	23.46±4.48 ^a	77.82±8.90 ^a
15	247.64±11.86 ^b	18.91±3.26 ^a	88.22±7.64 ^a
20	454.71±13.20 ^c	20.58±10.26 ^a	80.93±12.08 ^a
25	342.97±18.45 ^d	20.30±3.44 ^a	83.13±6.08 ^a

หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

พบว่า การเปลี่ยนความเร็วสายพานป้อนมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดที่นัยสำคัญ 0.05 (ตารางที่ 19 20 และ 21) โดยความเร็วสายพานป้อน 20 m/min จะให้ค่าอัตราการป้อน Q สูงสุด ทุกพันธุ์คือ 262.20 kg/hr 439.12 kg/hr และ 454.71 kg/hr สำหรับพันธุ์ ทูลเกล้า ทับทิมจันทร์ และ ทองสามสี ตามลำดับ ในกรณีของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการคัดขนาด (C_r) พบว่าความเร็วสายพานป้อน 15 m/min จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ C_r ต่ำสุดในชมพูทุกพันธุ์ แต่เนื่องจากลักษณะของชมพูตามธรรมชาติจะมีฐานเป็นรูปรี (วงรี) และทำให้เกิดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (Maximum diameter) และเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด (Minimum diameter) ดังภาพที่ 45 ซึ่งจำเป็นต้องทดสอบเฉพาะลักษณะการจัดวางทรงผลอีกครั้ง

สรุปผลสำหรับการทดสอบเครื่องคัดขนาดร่วมกับสายพานป้อนพบว่า

- 1) สำหรับชมพูพันธุ์ทูลเกล้าความเร็วสายพานป้อนที่เหมาะสมคือ 15 m/min
- 2) สำหรับชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ความเร็วสายพานป้อนที่เหมาะสมคือ 15 m/min
- 3) สำหรับชมพูพันธุ์ทองสามสีความเร็วสายพานป้อนที่เหมาะสมคือ 15 m/min



ภาพที่ 45 สัณฐานบริเวณฐานผลของชมพู่ เมื่อ D max คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด และ D min คือเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด

1.3 การทดสอบลักษณะการจัดวางทรงผลชมพู่

เมื่อปรับตั้งความเร็วของสายพานป้อนเป็น 15 m/min (ชมพู่ทั้งสามพันธุ์) ตามผลการทดสอบในหัวข้อ 1.2 และทำการทดสอบด้วยการปรับตั้งมุมและความเร็วสายพานคัดขนาดตามข้อสรุปของการทดสอบหัวข้อ 1.1 แล้ว พบว่าการวางผลชมพู่แบบสุ่มและวางให้ด้าน Maximum diameter เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสายพานคัดขนาด ทำให้สมรรถนะการคัดขนาดลดลงในชมพู่ทุกพันธุ์ ทั้งนี้เนื่องจากผู้ปฏิบัติต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการประเมินหาด้าน Diameter max ด้วยสายตาก่อนจะวางลงบนสายพานป้อน ดังตารางที่ 22 23 และ 24

ตารางที่ 22 ผลของการจัดวางทรงผลชมพู่พันธุ์ทุลเกล้า

รูปแบบการวางป้อน	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
แบบสุ่ม (ปกติ)	263.92±11.30	17.21±2.09	93.52±3.00
วาง Diameter max	179.87±4.90	9.84±1.93	93.62±1.83

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 23 ผลของการจัดวางทรงผลชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์

รูปแบบการวางป้อน	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
แบบส้อม (ปกติ)	333.09±28.51	6.47±2.46	91.23±10.41
วาง Diameter max	214.22±8.37	3.16±1.07	97.94±0.97

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 24 ผลของการจัดวางทรงผลชมพูพันธุ์ทองสามสี

รูปแบบการวางป้อน	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	E_w (%)
แบบส้อม (ปกติ)	326.70±33.49	14.26±3.69	88.63±5.30
วาง Diameter max	187.44±5.69	8.66±1.80	91.51±2.70

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

จากตารางผลการทดสอบลักษณะการจัดวางทรงผลชมพูยังพบรูปแบบการวางป้อนผลชมพูมีผลให้เปอร์เซ็นต์ C_R มีค่าลดต่ำลงอย่างชัดเจนด้วยเช่นกัน นอกจากนี้การวางแบบ Maximum diameter ทำให้ความแปรปรวนของการทดลอง (ค่า Standard deviation, SD) มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

สรุปผลจากการทดสอบลักษณะการจัดวางผลชมพูพบว่า การใช้งานเครื่องป้อนผลชมพูร่วมกับเครื่องคัดขนาด ผู้ปฏิบัติควรวางผลชมพูให้เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่กว้างที่สุดขนานไปกับพื้นผิวสายพานป้อน เนื่องจากจะให้ค่าความผิดพลาดในการคัดขนาดต่ำที่สุด และแม้การปฏิบัติแบบนี้จะทำให้เสียเวลาบ้าง ซึ่งทำให้ค่าอัตราการคัดขนาดลดลง แต่เมื่อผู้ปฏิบัติทำงานมีความชำนาญแล้วจะสามารถเพิ่มอัตราการป้อนให้มีค่าสูงขึ้นได้

1.4 การทดสอบหาความเสียหายของผลชมพูที่ผ่านการคัดขนาด

เมื่อตรวจสอบความเสียหายเชิงกลด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายแล้วพบว่าการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดชมพูเปรียบเทียบกับชมพูชุดควบคุม เก็บรักษาพร้อมกันที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 91% เป็นเวลา 5 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ DMRT (ตารางที่ 25 และ 26)

ตารางที่ 25 เปอร์เซนต์ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน

รูปแบบการวาง	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
Control	0.00 ^a	40.00±6.09 ^b	54.44±26.47 ^b	80.00±11.52 ^c	86.67±8.43 ^{cd}	93.33±4.65 ^d
ผ่านเครื่องคัด	0.00 ^a	43.33±16.39 ^b	48.89±22.70 ^b	74.44±11.52 ^{cd}	78.89±12.04 ^{cd}	85.56±6.33 ^{cd}

- หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

ตารางที่ 26 เปอร์เซนต์ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทองสามสีในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน

รูปแบบการวาง	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
Control	0.00 ^a	50.00±6.80 ^b	60.00±10.69 ^{bcd}	71.11±8.24 ^{ef}	75.56±8.43 ^{ef}	76.67±8.24 ^{ef}
ผ่านเครื่องคัด	0.00 ^a	54.44±12.67 ^{bc}	64.44±13.94 ^{cde}	72.22±13.61 ^{def}	75.56±13.94 ^{ef}	82.22±6.09 ^f

- หมายเหตุ 1. ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
2. ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

1.5 ทดสอบการทำงานของเครื่องคัดขนาดแบบต่อเนื่องในเชิงการค้า (ระดับวิสาหกิจ)

ในการทดสอบระดับวิสาหกิจ พบว่า สมรรถนะการคัดขนาดของเครื่องลดลงเล็กน้อย และค่า C_R มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน (ตารางที่ 27) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคัดขนาดจำนวน 1 คนในปัจจุบันซึ่งมีอัตราการคัดเป็น 107.16 ± 9.89 kg/hr และมี C_R เป็น 27.92 ± 11.66 % (ทดสอบ 3 ชั่วโมง)

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบระดับวิสาหกิจของเครื่องคัดขนาดชมพู

พันธุ์	Q (kg/hr)	\bar{C}_R (%)	Ratio (S:M:L)
ทับทิมจันทร์	195.12	12.17	0.20 : 1.00 : 0.24
ทองสามสี	181.67	16.54	1.00 : 0.99 : 0.57
คัดด้วยคน(พันธุ์ทองสามสี)	107.16 ± 9.89	27.92 ± 11.66	1.00 : 0.99 : 0.57

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกกลม หมายถึงค่า SD

ซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ C_R ของการทดสอบระดับวิสาหกิจเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่ผ่านมาทั้งหมดในชมพูทุกพันธุ์เนื่องจาก การทดสอบทุกครั้งที่ผ่านมา มีการกำหนด Ratio ของชมพูแต่ละขนาดให้เท่ากัน (ขนาดเล็ก, S : ขนาดกลาง, M : ขนาดใหญ่, L เป็น 1.00 : 1.00 : 1.00 โดยใช้จำนวนขนาดละ 30 ผล) ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบระดับวิสาหกิจที่ Ratio ของขนาดชมพูเป็นแบบสุ่ม ไม่สามารถกำหนดได้ (ตารางที่ 27) ผลของสัดส่วนที่ไม่เท่ากันนี้ย่อมส่งผลต่อการคำนวณตามสมการอัตราการเจือปน, % C_R (สมการ (37)) ไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความสามารถในการทำงานของคนกับเครื่องคัดขนาดแล้ว พบว่า อัตราการคัดขนาด, Q ของเครื่องมีค่าสูงกว่ามาก และยังให้อัตราการเจือปน, C_R น้อยกว่ามากเช่นกัน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแปรปรวนของการคัดด้วยคน (ตารางที่ 27) กับการคัดด้วยเครื่องคัดขนาด (ตารางที่ 24) ในชมพูพันธุ์ทองสามสีแล้ว พบว่าการคัดขนาดด้วยเครื่องมีความแปรปรวนน้อยกว่า การคัดขนาดด้วยคนอย่างชัดเจน

จากนั้นได้ทำการสุ่มเลือกตัวอย่างชมพูพันธุ์ทองสามสีจากการทดสอบระดับวิสาหกิจมาจำนวน 3 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ผล มาเก็บรักษาเปรียบเทียบกับตัวอย่างชมพูพันธุ์เดียวกันที่ได้จากการคัดด้วยแรงงานคน (คัดด้วยมือ) เป็นเวลา 5 วัน ได้ผลดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ความเสียหายของชมพูพันธุ์ทองสามสีในช่วงการเก็บรักษา 5 วัน

การทำงาน	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
คัดด้วยคน	13.33±11.55 ^{abc}	28.33±10.41 ^c	50.00±10.00 ^d	63.33±15.28 ^d	93.33±11.55 ^e	98.67±2.31 ^e
ผ่านเครื่องคัด	0.00±0.00 ^a	10.67±2.31 ^{ab}	22.67±2.31 ^{bc}	52.00±14.42 ^d	65.33±2.31 ^d	89.33±8.33 ^e

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ DMRT แล้วพบว่าชมพูที่คัดด้วยคนเปรียบเทียบกับชมพูที่ผ่านเครื่องคัดขนาดเกิดความเสียหายแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในระยะเวลา 5 วัน

1.6 การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เมื่อรวบรวมค่าใช้จ่ายเฉพาะหมวดเงินค่าวัสดุและค่าแรงในการจ้างสร้างและประกอบเครื่องแล้วพบว่าค่าใช้จ่ายรวมเป็นจำนวนเงิน 25,000 บาท ดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องคัดขนาดผลชมพู

รายการวัสดุ	จำนวนเงิน
1. มอเตอร์ไฟฟ้า 220 V ½ Hp	2,300
2. ชุดเกียร์ทด อัตราทด 18:1	1,500
3. เหล็กฉาก 1 ½"×1 ½"	1,700
4. ตู้อัด ¾"	1,900
5. ตู้ควบคุม (พร้อมอุปกรณ์)	2,600
6. ชุดเฟือง	1,700
7. สายพานแบน	2,000

ตารางที่ 29 (ต่อ)

รายการวัสดุ	จำนวนเงิน
8. โส่หุ้ย	2,500
9. ฟองน้ำ	800
10. ค่าแรงงานและประกอบเครื่อง	8,000
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างเครื่องคัดขนาด	25,000

ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่อง คำนวณได้จากต้นทุนคงที่ (Fixed cost : FC) และต้นทุนแปรผัน (Variable cost : VC)

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการคัดขนาดผลชมพู/กีโลกรัมสามารถหาได้จาก

$$AC = FC + VC$$

ค่าเสื่อมราคา (คิด โดยวิธีตรง) $D = \frac{(P - S)}{L}$

ค่าเสียโอกาสในการลงทุน $R = \frac{(P + S)}{2} \times i$

โดยที่ P = ราคาซื้อหรือสร้างเครื่องคัดขนาดผลไม้ (บาท)

L = อายุการใช้งานเครื่องคัดขนาด ≈ 10 ปี

S = ราคาเครื่องเมื่อครบ 10 ปี = $0.1 * P$ (บาท)

D = ค่าเสื่อมราคา/ปี (บาท/ปี)

R = ค่าเสียโอกาสในการลงทุน/ปี (บาท/ปี)

i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี

กำหนดให้ ราคาเครื่องตัดขนาดชมพู (P) มีราคา 25,000 บาท (ตารางที่ 29)
 มูลค่าซากเครื่องมือเมื่อสิ้นสุดปีที่ 10 คงเหลือ 10% ของราคาเครื่อง
 อัตราดอกเบี้ยต่อปี = 7.38% ต่อปี (ณ 17 มีนาคม 2554 จากธนาคารกรุงศรีอยุธยา
 จำกัด มหาชน)

$$\text{ดังนั้น ราคาซากเครื่อง} = \left(\frac{10}{100}\right) \times 25,000 = 2,500 \text{ บาท}$$

$$\text{ค่าเสื่อมราคา (D)} = \frac{(25,000 - 2,500)}{10} = 2,250 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{ค่าเสียโอกาสในการลงทุน (R)} = \left(\frac{25,000 + 2,250}{2}\right) \times \left(\frac{7.38}{100}\right) = 1,005.53 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{รวมต้นทุนคงที่ต่อปี (FC)} = 2,250 + 1,005.53 = 3,255.53 \text{ บาท/ปี}$$

ต้นทุนแปรผัน (Variable cost: VC)

ค่าบำรุงรักษา (Maintenance) คิดเฉลี่ยประมาณวันละ 5 บาท ทำงาน 200 วัน ค่าบำรุงรักษา
 เท่ากับ $5 \times 200 = 1,000$ บาทต่อปี

ค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.50 บาท สิ้นเปลืองไฟฟ้า 0.2 หน่วย/ชั่วโมง ใน 1 ปีทำงาน 200 วัน
 อัตราค่าจ้างแรงงานวันละ 200 บาท ทำงาน 1 คน

$$\text{ดังนั้น } VC = \text{ค่าจ้างแรงงาน (W)} + \text{ค่าไฟฟ้า (E)} + \text{ค่าบำรุงรักษา (M)}$$

$$\text{ค่าจ้างแรงงาน (W)} = 1 \times 200 \times 200 = 40,000 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า (E)} = 0.2 \times 3.5 \times 8 \times 200 = 1,120 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{ค่าบำรุงรักษา (M)} = 5 \times 200 = 1,000 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{รวมต้นทุนแปรผัน (VC)} = 40,000 + 1,120 + 1,000 = 42,120 \text{ บาท/ปี}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (AC)} &= \text{ต้นทุนคงที่ (FC)} + \text{ต้นทุนแปรผัน (VC)} \\ &= 3,255.53 + 42,120 \text{ บาท} \\ &= 45,375.53 \approx 45,376 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

จุดคุ้มทุนของเครื่องคัดขนาดชมพู

กำหนดให้ค่าจ้างเครื่องคัดขนาดชมพูเท่ากับ 0.3 บาทต่อกิโลกรัม ใน 1 ปีเครื่องทำงาน 200 วัน วันละ 8 ชั่วโมง ความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 190 kg/hr

$$\text{ดังนั้นเครื่องสามารถทำงานได้ } 200 \times 8 \times 190 = 304,000 \text{ กก./ปี}$$

$$\text{จาก } N^* = \frac{F}{p - v}$$

โดยที่ N^* = ปริมาณผลิตที่จุดคุ้มทุนพอดี

F = ต้นทุนคงที่

p = ราคาขายต่อหน่วย

v = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

$$\text{ดังนั้นแล้ว } N^* = \frac{3,255.53}{(0.1 - (45,376/304,000))} = 21,597.44 \text{ กิโลกรัม/ปี} \approx 21.60 \text{ ตัน/ปี}$$

ระยะเวลาคืนทุน

จากรายได้ค่ารับจ้างใช้เครื่องคัดขนาดชมพูเท่ากับ 0.3 บาทต่อกิโลกรัม ใน 1 ปีเครื่องทำงาน 200 วัน วันละ 8 ชั่วโมง ความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 190 kg/hr ดังนั้นเครื่องสามารถทำงานได้ 304,000 กก./ปี ดังนั้นจึงมีรายได้ $0.3 \times 304,000 = 91,200$ บาท/ปี

การคำนวณระยะคืนทุนหาได้จาก
$$PBP = \frac{MC}{P}$$

และ
$$P = R - AC$$

โดยที่ PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)
 MC = ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง (บาท)
 P = กำไร (บาท/ปี)
 R = รายได้ (บาท/ปี)
 AC = ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/ปี)

ดังนั้น กำไร (P) = 91,200 – 45,376 บาท/ปี
 = 45,824 บาท/ปี

ระยะเวลาคืนทุน = ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง (MC) / กำไร (P)
 = 25,000 / 45,824
 = 0.55 ปี \approx 7 เดือน

สรุปผลจากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม การสร้างเครื่องคัดขนาดชมพูราคา 25,000 บาท และรับจ้างคัดขนาดที่ราคา 0.3 บาท/กิโลกรัม พบว่า จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 21.60 ตัน/ปีและระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 7 เดือน

2. เทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินวัยของมะพร้าวอ่อน

2.1 ลักษณะทางกายภาพของมะพร้าวอ่อน

เมื่อแบ่งวัยออกตามความหนาเนื้อ ออกเป็น 3 วัย คือ วัยอ่อน (Immature stage, IS) วัยพอดี (Mature stage, MS) และวัยแก่ (Over mature stage, OS) โดยใช้ความหนาเนื้อรอบตาน้ำ (FT) ตามวิธีการของ Meeklangsaen (2007) โดย วัย IS คือ $FT < 1.75$ mm วัย MS คือ $1.76 \text{ mm} \leq FT \leq 3.80$ mm และ วัย OS คือ $FT > 3.81$ mm พบว่ามะพร้าวมีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ลักษณะทางกายภาพของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อแยกตามวัย

วัย	จำนวน (ผล)	ตัวแปรลักษณะทางกายภาพ		
		SG	Dr (cm)	H (cm)
IS	40	0.911±0.023 ^a	14.10±1.137 ^a	15.75±0.952 ^a
MS	72	0.909±0.019 ^b	14.73±0.830 ^b	16.71±1.080 ^b
OS	48	0.900±0.019 ^b	14.57±0.735 ^b	16.81±0.870 ^b

หมายเหตุ 1. IS MS และ OS คือวัย Im mature stage, Mature stage และ Over mature stage

ตามลำดับ

- ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
- ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

ขนาดมิติได้แก่เส้นผ่านศูนย์กลาง (Dr) ความสูงผล (H) และความถ่วงจำเพาะ (SG) ของมะพร้าวอ่อนมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อผลมะพร้าวอ่อนพัฒนาไปตามวัย ในตารางที่ 30 มะพร้าวอ่อนทั้ง 160 ผล ที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ DMRT แล้วพบว่า ทั้งขนาดของ Dr H และ SG มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างแตกต่างระหว่างวัยมะพร้าว IS กับ MS ที่ระดับนัยสำคัญ 5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาของผลมะพร้าวในช่วงแรกเป็นการเจริญเติบโตและขยายขนาดของผลจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นการพัฒนาจากวัย MS ไปเป็นวัย OS พบว่ามีขนาดและความถ่วงจำเพาะของผลมะพร้าวอ่อน ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 5% หรืออาจกล่าวได้ว่า การพัฒนาของผลมะพร้าวอ่อนเป็นการเปลี่ยนแปลงภายในผล และเป็นกระบวนการที่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านมิติและน้ำหนักของผลมากนัก

จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วย Discriminant analysis เพื่อจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน ด้วยตัวแปรกลุ่มลักษณะทางกายภาพ ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Stepwise method ด้วยค่า Entry criteria ที่ $F = 3.84$ และ Removal ที่ $F = 2.71$ และใช้การประมวลผลแบบ Leave-one-out cross validation ประมวลผล 2 ขั้นตอน ด้วยการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย OS ออกจาก IS กับ MS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS อีกครั้งหนึ่ง พบว่าได้ผลดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพ

	Dr	H	SG	ความถูกต้องของการจำแนก (%)			
				IS	MS	OS	Total
การแบ่งครั้งที่ 1 ^c	-	-	1.00 ^a	99.1 ^b		4.2	70.6
การแบ่งครั้งที่ 2	0.266	0.834	-	47.5	90.3	-	75.0

หมายเหตุ ^a ค่า Standardized canonical discriminant function coefficients

^b ค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

^c การแบ่งครั้งที่ 1 คือการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

การแบ่งครั้งที่ 2 คือการจำแนกวัย IS ออกจากวัย MS

จากตารางที่ 31 พบว่าในการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย IS และ MS ออกจากกลุ่มมะพร้าวทั้ง 160 ผล ตัวแปร SG เป็นตัวแปรเพียงตัวเดียวที่ได้รับการคัดเลือกและสามารถจำแนกได้ถูกต้องถึง 99.1% แต่เมื่อใช้ SG ในการแยกวัย OS ออกจากมะพร้าวทั้งหมดกลับพบว่าได้ความถูกต้องของการจำแนกต่ำมากเพียง 4.2% เท่านั้น ทำให้ภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกทำได้เพียง 70.6% ส่วนการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS พบว่า ตัวแปร Dr และ H เป็นตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกและมีบทบาทแทน SG ซึ่งสอดคล้องกับค่าจากตารางที่ 30 ที่วิเคราะห์พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของตัวแปรทั้งสองต่อวัย IS และ MS เช่นกัน โดยสามารถแยกวัย MS ได้ถูกต้อง 90.3% จากกลุ่มของ IS และ MS ขณะที่แยกวัย IS ได้ไม่คืนักเพียง 47.5% และมีภาพรวมความถูกต้องการจำแนกเป็น 75.0%

2.2 ความถี่ธรรมชาติของมะพร้าวอ่อน

ค่าของตัวแปรความถี่ธรรมชาติ (f_n) ค่า Sound stiffness, Ss เซ็งมวล (S_{mass}) และเซ็งปริมาตร (S_{Dr}) ที่คำนวณได้จากสมการ (39) และ (40) ซึ่งเป็นการตอบสนองทางเสียงของมะพร้าวอ่อน ยังมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความแตกต่างในทุกวัยที่ผลมะพร้าวอ่อนมีการพัฒนาตามวัย ที่ $p < 0.05$ เมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ DMRT ดังแสดงในตารางที่ 32 โดยที่การเปลี่ยนแปลงจากวัย MS ไปสู่วัย OS นี้จะไม่มีเพิ่มขึ้นของมิถิลผลและน้ำหนักก็ตาม (ตารางที่ 30) ดังนั้นแล้วการ

สังเกตค่าจากตัวแปรการตอบสนองเชิงเสียงจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาเมื่อมะพร้าวอ่อนพัฒนาจากวัย MS ไปเป็นวัย OS ได้

ตารางที่ 32 การตอบสนองทางเสียงของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อแยกตามวัย

วัย	จำนวน (ผล)	ตัวแปรการตอบสนองทางเสียง		
		fn (Hz)	Ss _{mass} (Hz ² kg ^{2/3})	Ss _{Dr} (Hz ² cm ^{2/3})
IS	40	548.63±48.84 ^a	285,144±51,227 ^a	1,763,791±296,532 ^a
MS	72	635.68±68.73 ^b	383,681±81,043 ^b	2,446,927±475,397 ^b
OS	48	688.27±54.93 ^c	444,700±73,575 ^c	2,841,757±451,710 ^c

หมายเหตุ 1. IS MS และ OS คือวัย Im mature stage, Mature stage และ Over mature stage

ตามลำดับ

- ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 5%
- ตัวเลขหลังเครื่องหมายบวกลบ หมายถึงค่า SD

จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วย Discriminant analysis เพื่อจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน ด้วยกลุ่มตัวแปรการตอบสนองทางเสียง ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Stepwise method ด้วยค่า Entry criteria ที่ F = 3.84 และ Removal ที่ F = 2.71 ทำการประมวลผลแบบ Leave-one-out cross validation ประมวลผล 2 ขั้นตอน ด้วยการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย OS ออกจาก IS กับ MS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS อีกครั้งหนึ่ง พบว่าได้ผลดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรการตอบสนองทางเสียง

	Fn	Ss _{mass}	Ss _{Dr}	ความถูกต้องของการจำแนก (%)			
				IS	MS	OS	Total
การแบ่งครั้งที่ 1 ^c	1.303 ^a	-2.061	1.705	86.6 ^b		52.1	76.3
การแบ่งครั้งที่ 2	-	-0.226	3.034	77.5	88.9		84.8

หมายเหตุ ^a ค่า Standardized canonical discriminant function coefficients

^b ค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

^c การแบ่งครั้งที่ 1 คือการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

การแบ่งครั้งที่ 2 คือการจำแนกวัย IS ออกจากวัย MS

จากตารางที่ 33 พบว่าทั้ง fn, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ต่างล้วนได้รับการคัดเลือกให้เป็นตัวแปรในการจำแนกวัยทั้งสิ้น สอดคล้องกับ ผลการวิเคราะห์ DMRT ในตารางที่ 32 ที่ทุกตัวแปรล้วนมีค่าแตกต่างกันในทุกวัยของมะพร้าวอ่อนอย่างมีนัยสำคัญ ในการแบ่งครั้งที่ 1 สามารถแยกวัย IS กับ MS และ OS ออกจากกลุ่มได้ถูกต้อง 86.6% และ 52.1% ตามลำดับ และมีภาพรวมความถูกต้องในการจำแนกเป็น 76.3% ในการแบ่งครั้งที่ 2 ตัวแปรที่ถูกคัดเลือกมีเพียงสองตัว คือ Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ในการประมวลผล ซึ่งให้ความถูกต้องของการจำแนกวัย IS และ MS สูงถึง 77.5% และ 88.9% ตามลำดับ และมีภาพรวมความถูกต้องในการจำแนกสูงถึง 84.8%

จากการวิเคราะห์ด้วยตัวแปร Dr, H, SG ในหัวข้อที่ 2.1 และตัวแปร fn, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} จะเห็นได้ว่า การจำแนกวัย IS และ MS ตัวแปร Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ทำได้ดีที่สุด (ภาพรวมความถูกต้องในการจำแนก 84.8%) แต่สำหรับการจำแนกวัย OS ออกจากกลุ่มมะพร้าวอ่อนทั้งหมด ในการแบ่งครั้งที่ 1 ตัวแปร fn, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ยังทำได้ดีที่สุดในเพียง 52.1% เท่านั้น ซึ่งจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ผลด้วยการใช้ตัวแปร Dr, H, SG, fn, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ทุกตัวร่วมกันต่อไป

2.3 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพและตัวแปรการตอบสนองทางเสียง

เมื่อพิจารณาตัวแปรลักษณะทางกายภาพร่วมกับตัวแปรการตอบสนองทางเสียงของผลมะพร้าวอ่อนทุกตัวแปรพร้อมกัน โดยอาศัยค่า Correlation ระหว่างตัวแปร ดังตารางที่ 34 พบว่า ตัวแปรความหนาเนื้อรอบตาน้ำ (FT) ที่ใช้แบ่งวัยของมะพร้าวอ่อนมีความสัมพันธ์ที่ดีกับ ตัวแปร SG, H เมื่อผลมะพร้าวอ่อนมีการพัฒนาไปตามวัย และค่า FT ยังมีความสัมพันธ์ที่ดียิ่งยกับกลุ่มตัวแปรการตอบสนองทางเสียงทุกตัว (f_n , $S_{s_{mass}}$ และ $S_{s_{Dr}}$) อีกเช่นกัน ค่า $S_{s_{Dr}}$ ที่เป็น Sound stiffness เชิงปริมาตร มีความสัมพันธ์ที่ดียิ่งยกับค่า $S_{s_{mass}}$ ที่เป็น Sound stiffness เชิงมวลของมะพร้าว การใช้ตัวแปรทั้ง 2 ร่วมกันในการประเมินวัยของมะพร้าวจึงน่าจะมีศักยภาพและแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ดีและไปในทิศทางเดียวกันกับตัวแปร f_n ซึ่งมีศักยภาพในการจำแนกวัยสูง (Terdwongworakul et al., 2009) ทั้งนี้ $S_{s_{Dr}}$ และ $S_{s_{mass}}$ เป็นตัวแปรที่คำนวณขึ้นจากทั้งค่า ปริมาตร และ มวล ซึ่ง ทั้งค่า H และ SG ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับปริมาตรและมวลตามลำดับ และมี correlation สูงกับ FT อีกด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 34 ค่า Correlation ระหว่างตัวแปร จากตัวแปรกลุ่มลักษณะทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง

	FT	Dr	H	SG	f_n	$S_{s_{mass}}$	$S_{s_{Dr}}$
FT	1.000	0.135	0.319**	-0.201*	0.658**	0.642**	0.681**
Dr	0.135	1.000	0.508**	-0.374**	-0.107	-0.123	0.049
H	0.319**	0.508**	1.000	-0.273**	0.019	-0.012	0.076
SG	-0.201*	-0.374**	-0.273**	1.000	0.067	0.124	0.007
f_n	0.658**	-0.107	0.019	0.067	1.000	0.995**	0.985**
$S_{s_{mass}}$	0.642**	-0.123	-0.012	0.124	0.995**	1.000	0.983**
$S_{s_{Dr}}$	0.677**	0.338**	0.208**	-0.100	0.893**	0.884**	1.000

หมายเหตุ ** คือ Correlation ที่มีนัยสำคัญที่ $p < 0.01$ (two-tailed)

* คือ Correlation ที่มีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ (two-tailed)

จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วย Discriminant analysis เพื่อจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน ด้วยตัวแปรกลุ่มลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ Dr, H และ SG และตัวแปรกลุ่มการตอบสนองเชิงเสียง ได้แก่ fm, S_{mass} และ S_{Dr} ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Stepwise method ด้วยค่า Entry criteria ที่ F = 3.84 และ Removal ที่ F = 2.71 ทำการประมวลผลแบบ Leave-one-out cross validation ประมวลผล 2 ขั้นตอน ด้วยการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย OS ออกจาก IS กับ MS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS พบว่าได้ผลดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยตัวแปรลักษณะทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง

	Dr	H	SG	Fn	S _{mass}	S _{Dr}	ความถูกต้องของการจำแนก (%)			
							IS	MS	OS	Total
การแบ่งครั้งที่ 1 ^c	-	-	-0.441	-	-	0.955	87.5 ^b	58.3	78.8	
การแบ่งครั้งที่ 2	-	0.555 ^a	-	-	-0.854	1.723	75.0	91.7	-	85.7

หมายเหตุ ^a ค่า Standardized canonical discriminant function coefficients

^b ค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

^c การแบ่งครั้งที่ 1 คือการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

การแบ่งครั้งที่ 2 คือการจำแนกวัย IS ออกจากวัย MS

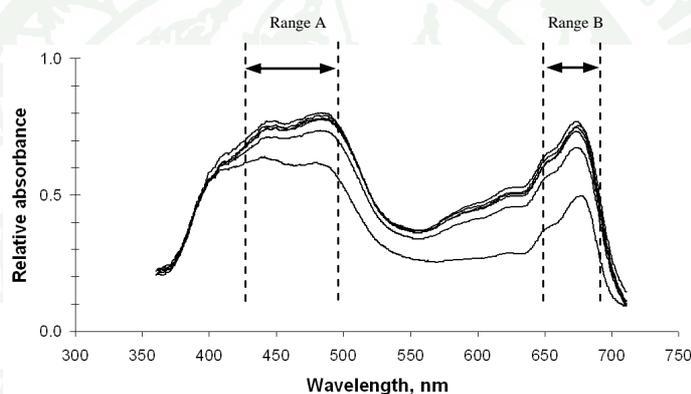
จากตารางที่ 35 ผลการคัดเลือกตัวแปรจากตัวแปรในกลุ่มลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ Dr, H และ SG และตัวแปรในกลุ่มการตอบสนองเชิงเสียง ได้แก่ fm, S_{mass} และ S_{Dr} พบว่าในการแบ่งกลุ่มครั้งที่ 1 ค่า SG และ S_{Dr} เป็นตัวแทนของสมบัติทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียงที่ได้รับการคัดเลือก และการใช้ SG ร่วมกับ S_{Dr} ช่วยเพิ่มภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกให้สูงขึ้นได้ถึง 78.8% โดยเป็นการปรับปรุงการแยกวัย OS ออกจากกลุ่มให้ถูกต้องสูงมากขึ้นเป็น 58.3% ส่วนการแยก IS กับ MS ออกจากกลุ่มมีค่าดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจาก กลุ่มตัวแปรการตอบสนองทางเสียงมีประสิทธิภาพในการจำแนกสูงมากอยู่แล้ว

การแบ่งกลุ่มครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS พบว่า การคัดแยกที่ดีที่สุดได้จากการใช้ H ร่วมกับ S_{mass} and S_{Dr} โดยให้ภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกมากที่สุดที่ 85.7%

อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การจำแนกที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยนี้ อาจไม่คุ้มค่ากับการตรวจวัดทั้งสมบัติทางกายภาพและการตอบสนองทางเสียง ดังนั้นการเลือกใช้เพียง $S_{s_{mass}}$ และ $S_{s_{Dr}}$ ในการคัดแยกด้วย IS และ MS จึงมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากที่สุด

2.4 การดูคลื่นแสงของผลมะพร้าวอ่อน

สัญญาณการดูคลื่นแสงในช่วงที่ถูกเลือกจะผ่านการ Pre-treatment สัญญาณด้วยการใช้ Moving average ทำ Smoothing เพื่อปรับให้สัญญาณมีความเหมาะสมก่อนทำการวิเคราะห์ผลตัวอย่างรูปแบบสัญญาณที่ได้แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 สัญญาณการดูคลื่นแสงของผลมะพร้าวอ่อน: Range A คือ ความยาวคลื่นช่วง 427.99-498.14 nm และ Range B คือความยาวคลื่นช่วง 650.34-686.26 nm.

ในภาพที่ 46 การดูคลื่นแสงของผลมะพร้าวอ่อนบริเวณใกล้ขั้วผลมีค่าสูงที่สุดใน Range A และ Range B ซึ่งสอดคล้องกับช่วงแสงสี เขียวและเหลือง ที่เป็นสีของมะพร้าวอ่อนที่สังเกตเห็นได้บริเวณที่ทำการทดสอบการดูคลื่นแสงนี้ (ภาพที่ 11) ดังนั้นจึงเลือกช่วงความยาวคลื่นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลใน Range A และ Range B ดังกล่าว ซึ่งอยู่ในช่วง 427.99nm - 498.14 nm และ 650.34nm - 686.26 nm จำนวน 370 ค่า (ที่ความละเอียดในการวัดของเครื่องมือเท่ากับ 0.37nm) ดังนั้นแล้ว ตัวแปรในกลุ่มการดูคลื่นแสงจึงมีจำนวน 370 ตัวแปร

จากนั้นวิเคราะห์ผลด้วย Discriminant analysis เพื่อจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน ด้วยตัวแปรในกลุ่มการดูคลื่นแสงจึงมีจำนวน 370 ตัวแปร ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Stepwise method ด้วยค่า Entry criteria ที่ $F = 3.84$ และ Removal ที่ $F = 2.71$ ทำการประมวลผลแบบ Leave-

one-out cross validation ประมวลผล 2 ขั้นตอน ด้วยการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย OS ออกจาก IS กับ MS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS อีกครั้งหนึ่ง พบว่าได้ผลดังตารางที่ 36

ตารางที่ 36 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยกลุ่มตัวแปรการดูคกลิ่นแสง

	ความถูกต้องของการจำแนก (%)			
	IS	MS	OS	Total
การแบ่งครั้งที่ 1 ^b	91.1 ^a		56.3	80.6
การแบ่งครั้งที่ 2	62.5	87.5	-	78.6

หมายเหตุ^a ค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

^b การแบ่งครั้งที่ 1 คือการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

การแบ่งครั้งที่ 2 คือการจำแนกวัย IS ออกจากวัย MS

จากตารางที่ 36 จะเห็นได้ว่า ค่าการดูคกลิ่นแสงของผลมะพร้าวอ่อนเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีศักยภาพที่ดีในการจำแนกวัยของมะพร้าวอ่อนได้ โดยให้ความถูกต้องในการจำแนกวัย IS และ MS ออกจากมะพร้าวทั้งหมด และการจำแนกวัย MS ออกจาก กลุ่ม IS และ MS ได้ดีที่สุดที่ความถูกต้องของการจำแนกเป็น 91.1% และ 87.5% สำหรับภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS กับ MS และวัย OS ออกจากกลุ่ม และการจำแนกวัย IS และ MS เป็น 80.6% และ 78.6% ตามลำดับ

สำหรับการพิจารณาตัวแปรการดูคกลิ่นแสงที่ถูกคัดเลือกตามความยาวคลื่นพบว่าค่า Standardized canonical discriminant function coefficients ดังแสดงในตารางที่ 37

ตารางที่ 37 ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ถูกคัดเลือกเป็นตัวแปรจำแนกวัย

Range	ความยาวคลื่น (nm)	Standardized canonical discriminant function coefficients	
		การแบ่งครั้งที่ 1 ^a	การแบ่งครั้งที่ 2 ^b
A	428.34	-	-3.506
	433.30	-	6.892
	447.07	4.493	-
	459.38	-3.776	-
	469.55	-	-2.607
	670.33	-	0.920
	490.84	-1.782	-
	492.92	2.107	-
B	651.99	14.941	-
	654.94	-13.867	-

หมายเหตุ ^a การแยกวัยกลุ่ม IS กับ MS และวัย OS ออกจากกลุ่ม

^b การแยกวัย IS ออกจากวัย MS

จากตารางที่ 37 พบว่าในการแบ่งครั้งที่ 1 จำเป็นจะต้องใช้การดูดกลืนแสงทั้ง Range A และ B (ทั้งแสงสีเขียวและสีเหลือง) แต่จะสังเกตเห็นค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 651.99 nm และ 654.94 nm ในช่วงแสงสีเหลืองว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกวัย OS ออกจาก IS and MS สูงที่สุด (การแบ่งครั้งที่ 1) เนื่องจากมีค่า Standardized canonical discriminant function coefficients สูงที่สุดในทำนองเดียวกันการแบ่งวัย IS ออกจากวัย MS (การแบ่งครั้งที่ 2) มีเพียงอิทธิพลของช่วงแสงสีเขียวเท่านั้นที่สามารถใช้เป็นตัวแปรคัดแยกได้ โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 428.34 nm และ 433.30 nm จะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกสูงสุดเช่นกัน

2.5 การใช้ทุกตัวแปรของการทดสอบแบบไม่ทำลายในการจำแนกวัยมะพร้าวอ่อน

ทำการวิเคราะห์ผลด้วย Discriminant analysis เพื่อจำแนกวัยของผลมะพร้าวอ่อน ด้วยตัวแปรในกลุ่มลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ Dr, H และ SG ตัวแปรในกลุ่มการตอบสนองเชิงเสียง ได้แก่ fm, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} และตัวแปรการดูดกลืนแสงในช่วง 427.99 nm - 498.14 nm และ 650.34nm - 686.26 nm จำนวน 370 ตัวแปร ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Stepwise method ด้วยค่า Entry criteria ที่ F = 3.84 และ Removal ที่ F = 2.71 ทำการประมวลผลแบบ Leave-one-out cross validation ประมวลผล 2 ขั้นตอน ด้วยการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย OS ออกจาก IS กับ MS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS อีกครั้งหนึ่ง พบว่าได้ผลดังตารางที่ 38

ตารางที่ 38 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนด้วยทุกตัวแปรของการทดสอบแบบไม่ทำลาย

	ความถูกต้องของการจำแนก (%)			
	IS	MS	OS	Total
การแบ่งครั้งที่ 1 ^b	91.1 ^a		66.7	83.8
การแบ่งครั้งที่ 2	67.5	90.3	-	82.1

หมายเหตุ ^a ค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

^b การแบ่งครั้งที่ 1 คือการจำแนกกลุ่มวัย IS และ MS ออกจาก OS

การแบ่งครั้งที่ 2 คือการจำแนกวัย IS ออกจากวัย MS

จากตารางที่ 38 พบว่า การใช้ตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลายทุกตัวร่วมกันในการประมวลผลเพื่อจำแนกวัย สามารถเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกวัย OS ออกจากกลุ่มมะพร้าวทั้งหมดได้ในการแบ่งครั้งที่ 1 ได้มากที่สุด โดยมีค่าเป็น 66.7% และให้ภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกสูงที่สุดคือ 83.8% แต่สำหรับการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกมะพร้าวอ่อนวัย IS ออกจาก MS พบว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการจำแนกกลับลดต่ำลง โดยต่ำกว่าการใช้ Ss_{mass} และ Ss_{Dr} เพียง 2 ตัวแปร และการใช้ H, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} เพียง 3 ตัวแปรในการประมวลผล โดยมีภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกเพียง 82.1%

ตารางที่ 39 ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ถูกคัดเลือกเป็นตัวแปรจำแนกวัย

ตัวแปร	Standardized canonical discriminant function coefficients	
	การแบ่งครั้งที่ 1 ^a	การแบ่งครั้งที่ 2 ^b
GR1 (433.65nm) ^c	-	0.640
GR2 (470.60 nm)	2.763	-
GR3 (476.54 nm)	-5.054	-
GR4 (477.94 nm)	2.667	-
GR5 (485.62 nm)	-	2.799
GR6 (487.36 nm)	-	-4.715
GR7 (488.75 nm)	-	2.200
GR8 (491.88 nm)	-	-2.250
GR9 (497.44 nm)	-	1.476
YL1 (651.99 nm) ^d	9.904	-
YL2 (654.94 nm)	-9.257	-
Dr ^e	-	-
H	0.413	0.589
SG	-	-
fn ^f	-	-
Ss _{mass}	-	-
Ss _{Dr}	0.791	0.838

หมายเหตุ ^a การแยกวัยกลุ่ม IS กับ MS และวัย OS ออกจากกลุ่ม

^b การแยกวัย IS ออกจากวัย MS

^c กลุ่มตัวแปรในช่วงการดูดกลืนแสงสีเขียว

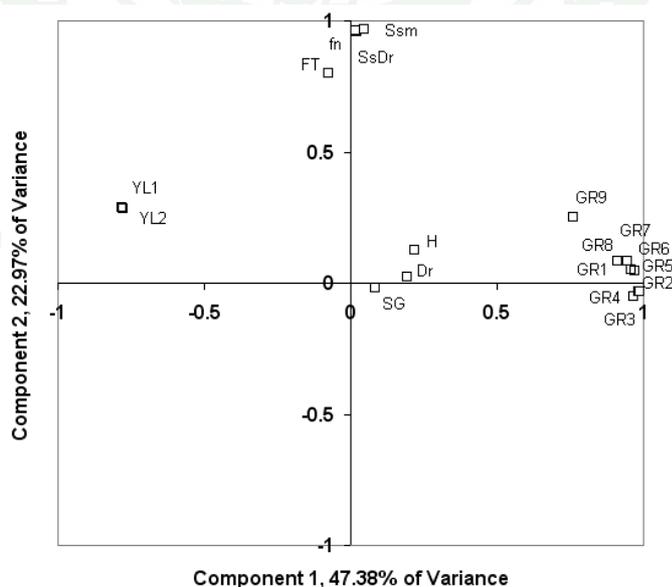
^d กลุ่มตัวแปรในช่วงการดูดกลืนแสงสีเหลือง

^e กลุ่มตัวแปรลักษณะทางกายภาพ

^f กลุ่มตัวแปรการตอบสนองทางเสียง

ตารางที่ 39 แสดงความยาวคลื่นแสงที่ได้รับการคัดเลือกเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise method ในการแบ่งครั้งที่ 1 ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 651.99 nm และ 654.94 nm มีค่า Standardized canonical discriminant function coefficients สูงที่สุด นั่นคือการดูดกลืนแสงในช่วงสี เหลืองยังคงมีความสำคัญในการแยกวัย OS ออกจากกลุ่มสูงเมื่อประมวลผลร่วมกับตัวแปร H และ Ss_{Dr} ที่ได้รับการคัดเลือก เช่นเดียวกับการแยกวัยด้วยการดูดกลืนแสงเพียงอย่างเดียวในหัวข้อ 2.4 ส่วนในการแบ่งครั้งที่ 2 ตัวแปร H และ Ss_{Dr} ที่ได้รับการคัดเลือกพร้อมกับการดูดกลืนแสงสีเขียว โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 485.62 nm และ 487.36 nm ยังคงมีอิทธิพลสูงและถูกใช้ในการแบ่งกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับค่า correlation ในตารางที่ 34 ที่ตัวแปรทั้งคู่ต่างก็มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ กับตัวแปร FT ที่ระดับ 0.01 โดยที่แนวโน้มการดูดกลืนแสงสีเหลืองยังคงใช้แบ่งกลุ่ม OS ได้ดีและ ช่วงแสงสีเขียวยังคงเหมาะกับการแบ่งวัย IS ออกจาก MS เช่นกัน (ตารางที่ 39) อย่างไรก็ตาม ภาพรวมความถูกต้องของการจำแนก เมื่อใช้ตัวแปรทดสอบแบบไม่ทำลายทุกตัวนี้มีค่าเป็น 82% ซึ่ง น้อยกว่าการใช้ตัวแปร H, Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ร่วมกันซึ่งแบ่งได้ถูกต้องถึง 85.7%

ผลการจำแนกวัยมะพร้าวที่ผ่านมาทั้งหมดจะพบว่า ตัวแปรทุกตัวล้วนมีอิทธิพลในการ จำแนกทั้งสิ้น อิทธิพลและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลายต่างๆ (ตารางที่ 39) ที่มีต่อ FT ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ตัดสินวัยที่แท้จริงของมะพร้าวอ่อน เมื่อนำตัวแปรเหล่านี้มา วิเคราะห์ผล ด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 Component plot ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัย

กำหนดให้ตัวแปรการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเขียว เป็นตัวแปร GR1 ถึง GR9 และการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเหลือง เป็นตัวแปร YL1 ถึง YL2 ตามลำดับดังตารางที่ 39 และตัวแปร Dr, H, SG กับตัวแปร f_n , Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ตัวแปรทั้ง 17 ตัวนี้ถูกคัดเลือกเพื่อการวิเคราะห์จำแนกวัยในลำดับถัดไป

เมื่อพิจารณากราฟ Loading plot จากการวิเคราะห์ปัจจัย ในภาพที่ 47 จะเห็นว่า ตัวแปรการดูดกลืนแสงสีเหลือง (YL1 และ YL2) แยกตัวอย่างชัดเจนจากกลุ่มตัวแปรการดูดกลืนแสงสีเขียว (GR1-9) และกลุ่มของตัวแปรทั้ง 2 กลุ่มนี้มีค่าโคตเด่นใน Component ที่ 1 (แกนนอน) อย่างชัดเจนสำหรับตัวแปร f_n , Ss_{mass} and Ss_{Dr} ที่มีค่าสูงใน Component ที่ 2 (แกนตั้ง) พบว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับวัย (FT) อย่างดี สอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 มีเพียงตัวแปร Dr และ SG ที่มีตำแหน่งใกล้เคียงจุดตัด (0, 0) ของกราฟมาก ซึ่งหมายถึงตัวแปรทั้งสองนี้อาจไม่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากตารางที่ 39 ที่ตัวแปรทั้งสองตัวแปรนี้ ก็ไม่ผ่านการคัดเลือกด้วยวิธีการ Stepwise method เพื่อทำการประมวลผลจัดกลุ่มเช่นกัน โดยที่ความแปรปรวนของ Component ที่ 1 และ 2 มีค่ารวมเป็น 70.35% จากความแปรปรวนของตัวแปรทั้งหมด

ตัวแปร GR1 ถึง GR9 และตัวแปร YL1 ถึง YL2 นี้ เมื่อรวมกับตัวแปรลักษณะทางกายภาพ และตัวแปรการตอบสนองทางเสียงแล้ว จึงเป็นตัวแปรที่ถูกคัดเลือก ที่มีแนวโน้มและความเป็นไปได้ที่จะใช้คำนวณการจำแนกวัยของมะพร้าวอ่อนในขั้นตอนต่อไป ได้ดีที่สุด

2.6 การวิเคราะห์ผลเพื่อทำนายการแบ่งกลุ่มด้วยตัวแปรที่ถูกคัดเลือก

ตัวแปร GR1 ถึง GR9 ที่เป็นการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเขียว และตัวแปร YL1 และ YL2 ที่เป็นการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเหลือง ตัวแปร Dr, H และ SG และตัวแปร f_n , Ss_{mass} และ Ss_{Dr} ตัวแปรทั้ง 17 ตัวนี้ ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกวัยอีกครั้งด้วย Discriminant analysis ใช้การคัดเลือกตัวแปรแบบ Enter method แล้วทำการแบ่งตัวอย่างมะพร้าวอ่อนทั้ง 160 ผล ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ถูกเลือก จำนวน 107 ผล เพื่อใช้เป็นตัวอย่างสำหรับสร้างสมการการจำแนกกลุ่ม และกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก จำนวน 53 ผล เพื่อใช้เป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบการจำแนกกลุ่ม พบว่าได้ผลดังตารางที่ 40 - 45

ตารางที่ 40 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS กับ MS	OS	
<u>กลุ่มที่แท้จริง</u>				
IS กับ MS	94.7	71	4	75
OS	68.8	10	22	32
Total	86.9	81	26	107

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล คำนวณผลแบบร่วมกันทั้งหมด

ตารางที่ 41 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS	MS	
<u>กลุ่มที่แท้จริง</u>				
IS	88.9	24	3	27
MS	97.9	1	47	48
Ungrouped cases	-	1	31	32
Total	94.7	26	81	107

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล คำนวณผลแบบร่วมกันทั้งหมด

ตารางที่ 40 และ 41 เป็นการวิเคราะห์จำแนกภายในกลุ่มมะพร้าวที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล ด้วยการใช้อัตราส่วนแบบทุกตัวอย่างร่วมกันหมดภายในกลุ่ม ทำให้ภาพรวมของการจำแนกกลุ่มมีค่าสูงมาก โดยในการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย IS กับ MS ออกจาก OS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS พบว่ามีภาพรวมความถูกต้องของการจำแนก สูงถึง 86.9% และ 94.7% ตามลำดับ โดยเป็นการแยกวัย IS กับ MS และการแยกวัย MS ที่ทำได้ถูกต้องมากที่สุดในการแบ่งครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ค่าของ Ungrouped cases ในการแบ่งครั้งที่ 2 คือ กลุ่มวัย OS ที่ถูกกันออกจากการประมวลผล เนื่องจากต้องการจำแนกเฉพาะวัย IS และ MS เท่านั้น แต่ทั้งนี้ สมการการจำแนกวัยที่คำนวณได้ ได้ชี้ให้เห็นว่ากลุ่มวัย OS นี้ หากมีปะปนร่วมกับ กลุ่ม IS และ MS แล้ว มันจะถูกจำแนกออกให้เป็นวัย MS เป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 42 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1 (Leave-one-out)

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS กับ MS	OS	
<u>กลุ่มที่แท้จริง</u>				
IS กับ MS	89.3	67	8	75
OS	59.4	13	19	32
Total	80.4	80	27	107

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล คำนวณผลแบบ Leave-one-out cross validation

ตารางที่ 43 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2 (Leave-one-out)

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS	MS	
<u>กลุ่มที่แท้จริง</u>				
IS	85.2	23	4	27
MS	93.8	3	45	48
Total	90.7	26	49	75

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล คำนวณผลแบบ Leave-one-out cross validation

สำหรับตารางที่ 42 และ 43 เป็นการวิเคราะห์จำแนกภายในกลุ่มมะพร้าวที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล ด้วยการใช้การคำนวณแบบ Leave-one-out cross validation ภายในกลุ่ม ภาพรวมของการจำแนกกลุ่มจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับผลจากตารางที่ 40 และ 41 เนื่องจากตัวอย่างไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณทุกค่า จะมี 1 ค่าของตัวอย่างที่ถูกเว้นไว้เพื่อใช้ทดสอบการจำแนก ในการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกวัย IS กับ MS ออกจาก OS และการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกวัย IS ออกจาก MS พบว่ามีภาพรวมความถูกต้องของการจำแนก เป็น 80.4% และ 90.7% ตามลำดับ โดยเป็นการแยกวัย IS กับ MS และการแยกวัย MS ที่ทำได้ถูกต้องมากที่สุดในการแบ่งครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการสร้างฟังก์ชันการจำแนกกลุ่ม โดยใช้ตัวอย่างมะพร้าวกลุ่มที่ถูกเลือกจำนวน 107 ผล พบว่า

สำหรับการแบ่งครั้งที่ 1 เพื่อแยกมะพร้าววัย IS กับ MS ออกจาก OS ได้ฟังก์ชัน ดังนี้

ฟังก์ชันการแบ่งกลุ่ม IS กับ MS คือ

$$\begin{aligned} & -9,823.5365 + 5,766.5865 * SG + 112.3566 * Dr + 13.8946 * H - 0.0045 * S_{s_{mass}} - 0.0009 * S_{s_{Dr}} \\ & + 11.4893 * fn - 459.8656 * GR1 - 2,184.5238 * GR2 - 334.0461 * GR3 - 1,863.6149 * GR4 \\ & + 5,517.8929 * GR5 - 11,556.4265 * GR6 - 1,291.2222 * GR7 + 7,015.3037 * GR8 + 15,321.6277 * GR9 \\ & - 1,260.5428 * YL1 \end{aligned}$$

ฟังก์ชันการแบ่งกลุ่ม OS คือ

$$\begin{aligned} & -9,773.4159 + 5,781.7884 * SG + 107.8485 * Dr + 15.3893 * H - 0.0047 * S_{s_{mass}} - 0.0008 * S_{s_{Dr}} \\ & + 11.4018 * fn - 463.7872 * GR1 - 2,022.6194 * GR2 - 764.5266 * GR3 - 1,615.0544 * GR4 \\ & + 5,477.1465 * GR5 - 11,411.4446 * GR6 - 1,254.7003 * GR7 + 7,025.9784 * GR8 + 15,180.2673 * GR9 \\ & - 1,241.5792 * YL1 \end{aligned}$$

สำหรับการแบ่งครั้งที่ 2 เพื่อแยกมะพร้าววัย IS และ MS ได้ฟังก์ชัน ดังนี้

ฟังก์ชันการแบ่งกลุ่ม IS คือ

$$-10,708.4052 + 6,202.1996*SG + 204.2316*Dr + 13.9667*H - 0.0040* Ss_{mass} - 0.0017*Ss_{Dr} \\ + 16.3223*fn - 755.2250*GR1 - 1,418.0694*GR2 + 6,635.9498*GR3 - 9,648.5322*GR4 \\ + 13,899.6496*GR5 - 25,504.0957*GR6 + 970.4171*GR7 + 2,247.8589*GR8 + 22,642.1181*GR9 \\ - 1,833.5683*YL1$$

ฟังก์ชันการแบ่งกลุ่ม MS คือ

$$- 10,755.7118 + 6,210.8275*SG + 206.6056*Dr + 15.9400*H - 0.0039* Ss_{mass} - 0.0017*Ss_{Dr} \\ + 16.2991*fn - 764.0240*GR1 - 1,298.3061*GR2 + 6,925.2252*GR3 - 10,211.0333*GR4 \\ + 14,775.3440*GR5 - 26,751.7253*GR6 + 1,404.0193*GR7 + 1,801.4906*GR8 \\ + 23,166.4190*GR9 - 1,855.0751*YL1$$

นำฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทำนายวัยของกลุ่มตัวอย่างมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก จำนวน 53 ผล ได้ผลดังตารางที่ 44 และ 45

ตารางที่ 44 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 1

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS กับ MS	OS	
กลุ่มที่แท้จริง				
IS กับ MS	97.3	36	1	37
OS	68.8	5	11	16
Total	88.7	41	12	53

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ไม่ถูกเลือกจำนวน 53 ผล คำนวณผลโดยใช้สมการจาก

ตารางที่ 45 การจำแนกวัยมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือก ในการแบ่งครั้งที่ 2

	ความถูกต้องของการจำแนก ^a (%)	กลุ่มที่ถูกทำนาย		Total
		IS	MS	
กลุ่มที่แท้จริง				
IS	92.3	12	1	13
MS	87.5	3	21	24
Ungrouped cases	-	0	16	16
Total	89.2	15	38	53

หมายเหตุ ^a กรณีกลุ่มของมะพร้าวอ่อนที่ไม่ถูกเลือกจำนวน 53 ผล คำนวณผลโดยใช้สมการจากกลุ่มที่ถูกเลือกมาทำนายการแบ่งกลุ่ม

พบว่าฟังก์ชันการแบ่งกลุ่มที่สร้างขึ้นให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกวัย IS กับ MS ออกจาก OS และการจำแนกวัย IS ออกจาก MS เป็น 88.7% และ 89.2% ตามลำดับ และความสามารถในการจำแนกที่ดีที่สุดคือการจำแนกวัย IS กับ MS ออกจากกลุ่มตัวอย่าง (97.3%) โดยที่ฟังก์ชันการจำแนกนี้ไม่สามารถจำแนกวัยของมะพร้าวกลุ่มที่ไม่ถูกเลือกได้ จำนวน 16 ผล

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ความเร็วรอบและมุมเอียงของสายพานคัดขนาด มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ต่อการคัดขนาดผลชมพู ซึ่งปัจจัยควบคุมที่เหมาะสมต่อการคัดขนาดชมพูคือความเร็วสายพานป้อนควรเป็น 15 m/min ความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมและให้ความถูกต้องของการคัดขนาดชมพูทุกพันธุ์สูงที่สุดควรเป็น 20 m/min ในชมพูพันธุ์ทูลเกล้า ทับทิมจันทร์และทองสามสี มุมของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมคือ 85 องศา, 75 องศา และ 80 องศาตามลำดับ การเลือกวางผลชมพู ให้เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของผลเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังของสายพานคัดขนาดจะช่วยลดความผิดพลาดในการคัดขนาดของเครื่องได้ และในชมพูพันธุ์ทูลเกล้า ทับทิมจันทร์และทองสามสีจะมีอัตราการคัดขนาดเป็น 179.87 ± 4.90 kg/hr, 214.22 ± 8.37 kg/hr และ 187.44 ± 5.69 kg/hr ตามลำดับ โดยที่ผลชมพูที่เครื่องคัดขนาดที่พัฒนาขึ้นนี้มีความเสียหายไม่แตกต่างจากชมพูชุดควบคุม

ความถ่วงจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูง ของมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอม มีความแตกต่างกันในมะพร้าวอ่อน วิทยอ่อน กับกลุ่มของวิทยพอดีและแก่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวแปรการตอบสนองทางเสียง มีความแตกต่างกันในแต่ละวัย ($p < 0.05$) การดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเขียวและสีเหลือง ที่บริเวณใกล้เปลือกข้าวผลมีศักยภาพที่จะใช้จำแนกวัยมะพร้าวอ่อนได้ และการใช้ตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลายทุกตัวแปร ในการวิเคราะห์จำแนกวัยด้วยวิธี Discriminant Analysis ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าฟังก์ชันการจำแนกวัยที่สร้างขึ้นจากกลุ่มตัวแปรที่ถูกเลือก สามารถจำแนกวัยในมะพร้าวอ่อนกลุ่มที่ไม่ถูกเลือกได้ดี โดยแยกวัยอ่อนและพอดี ออกจากวัยแก่ ได้ถูกต้อง 88.7% และแยกวัยอ่อนออกจากวัยพอดีได้ถูกต้อง 89.2%

ข้อเสนอแนะ

ความรู้ในเรื่องการคัดคุณภาพของผลิตผลเกษตร ได้แก่ การคัดขนาดชมพูและการคัดแยกวัยมะพร้าวอ่อน ที่เกิดจากการวิจัยนี้ ควรนำไปประยุกต์เพื่อใช้งานในระดับวิสาหกิจ อันเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเกษตรได้อีกทางหนึ่งต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2550. ข้อมูลการเพาะปลูกพืช. แหล่งที่มา:

<http://www.doae.go.th>, 3 กรกฎาคม 2550.

กลุ่มเกษตรกรสัญจร. 2531. มะพร้าวน้ำหอม. ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์สหมิตร, กรุงเทพฯ.

ชนิดา บุพดา. 2550. การพัฒนาเครื่องคัดขนาดชมพู. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

ณรงค์ โฉมเฉลา. 2530. เชื้อพันธุ์มะพร้าว. ครั้งที่ 1. หจก. ฟีนนี่พับบลิชชิง, กรุงเทพฯ.

ทีมงานเฉพาะกิจ. 2546. คู่มือการทำสวนชมพูอย่างมืออาชีพ. บริษัท นาคา อินเตอร์มีเดีย จำกัด, กรุงเทพฯ.

ธนรัตน์ ศรีรุ่งเรือง. 2550. การข้ามเชิงกลของผลมะพร้าวอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นลินี รัตนมหาวิชัย. 2539. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะประจำพันธุ์ทางดอกและผลของชมพูพันธุ์การค้า 6 พันธุ์. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, ภาควิชาพืชสวน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิก ชากังราว. 2542. ทongsสามสีชมพูยักษ์นอกฤดูเงินล้าน. มติชน, กรุงเทพฯ.

บัณฑิต จริโมภาส. 2546. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 126-153.

บัณฑิต จริโมภาส, รศ.ดร. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุผลไม้. ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ฟีนนี่พับบลิชชิง, กรุงเทพฯ.

บัณฑิต จริโมภาส และสาริกา สารการ. 2549. สมบัติเชิงกลของผลชมพูไทย (Mechanical Properties of Thai Rose Apples Fruit). การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ.2549, จังหวัดมหาสารคาม.

บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ. 2524. เครื่องกลขนถ่าย ระบบขนถ่ายต่อเนื่อง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

ปิยดา สิงห์ตระกูล และ อภิชาติ คณิตชัยเดชา. 2547. โครงการวิศวกรรมเรื่อง เครื่องคัดแยกขนาดชมพู. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

เปรมปรี ฌ.สงขลา. มปป. การลงทุนทำสวนชมพูอย่างมืออาชีพ. เจริญรัฐการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ไพบุลย์ เข้มเพื่อน. 2546. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

ศักดิ์สิทธิ์ ศรีวิชัย. 2533. การปลูกมะพร้าว. ครั้งที่ 1. เพรสโปรดักส์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. สถิติการส่งออกผลผลิตเกษตร. แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th>, 10 มกราคม 2551.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. น.67-98. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อาทิตย์ พวงสมบัติ. 2550. การตรวจสอบคุณภาพภายในผลแก้วมังกรด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

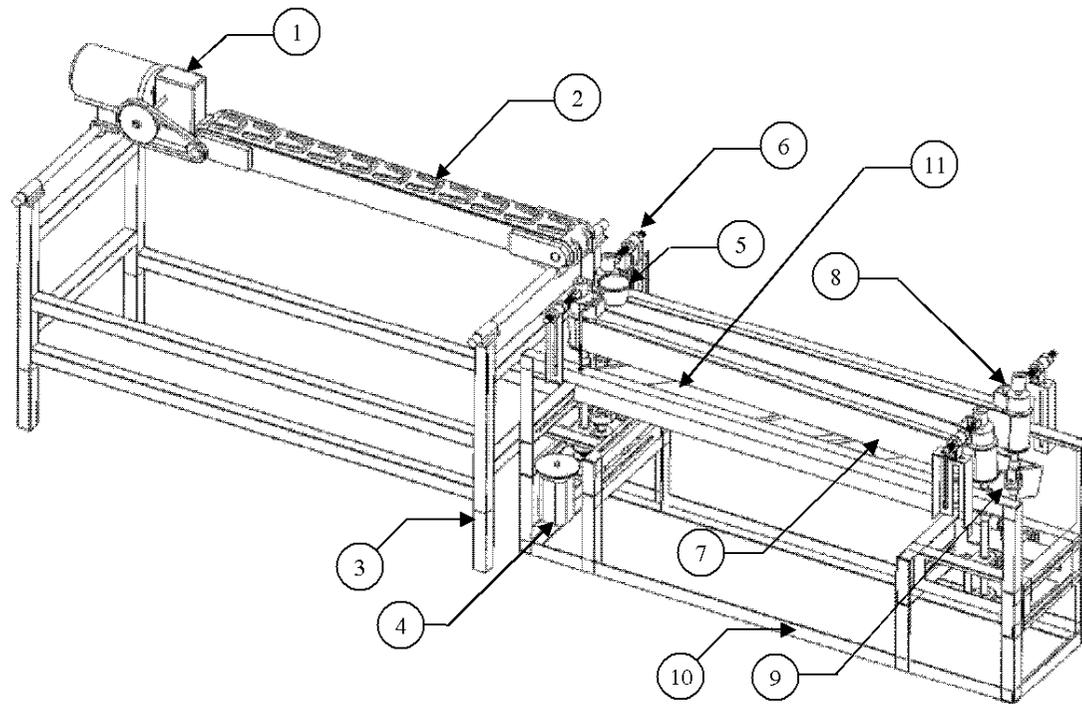
- Boysworth, M.K. and K.S. Booksh. 2001. Aspect of multivariate calibration applied to near-infrared spectroscopy. *In* D.A. Burns and E.W. Ciurczak, eds. **Handbook of Near-Infrared Analysis**. Marcel Dekker Inc., New York.
- B. Jarimopas, S. Toomsaengtong, S. P. Singh, J. Singh, and R. Sothornvit. 2007. Development of Wholesale Packaging to Prevent Post-Harvest Damage to Rose Apples. **Journal of Applied Packaging Research**, Vol.2, No.1-September 2007.
- C. Bupata, B. Jarimopas and S. Chantong. 2007. Conditions Influencing Design of A Java Apple Fruit Sizing Machine. **TSAE International conference**, Khonkaen, Thailand.
- Fu, X., Y. Ying, H. Lu and H. Xu. 2007. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear. **Journal of Food Engineering**. (83): 317-323.
- Hruschka, R. W. 1987. Data analysis: Wavelength selection methods. *In* P. Williams and K. Norris, eds. **Near-Infrared Technology in the agricultural and food industries**. American Association of Cereal Chemists, Inc, Minnesota.
- Kasemsamran, S. 2005. **Nondestructive Quantitative Analysis of biomedical Samples by Near-Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Development of novel Chemometric Methods for quantitative Analysis**. Ph.D. Thesis, Kwansei-Gakuin University, Japan.
- Peleg, K. 1985. **Produce Handling, Packaging and Distribution**. AVI Pub. Co. Inc, Westport.
- Shao, Y., Yong, H., Antihus H. Gomez, Annia G. Pereir, Z. Qiu and Y. Zhang. 2007. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heatware' (*Lycopersicum esculentum*) quality characteristics. **Journal of Food Engineering** (81): 672-678.

Smith S. 1993. Drilling Square Holes. *The Mathematics Teacher*, 86 (7): 579-583.



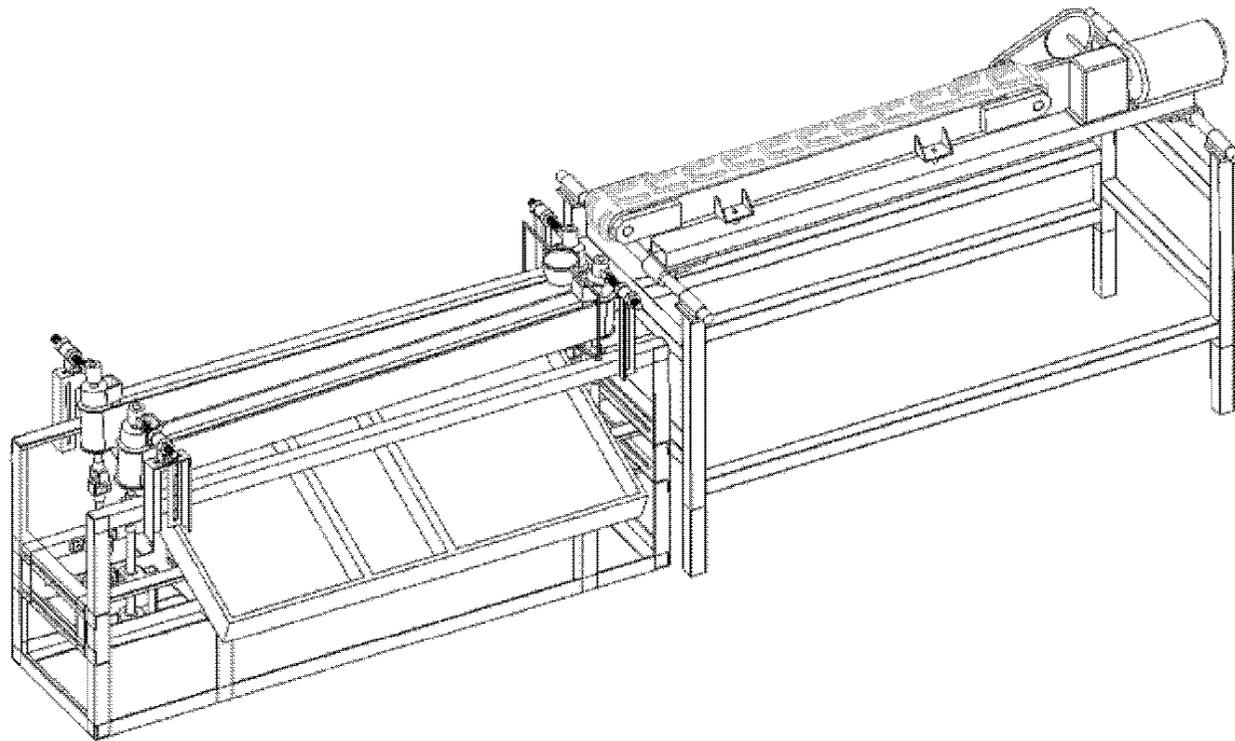




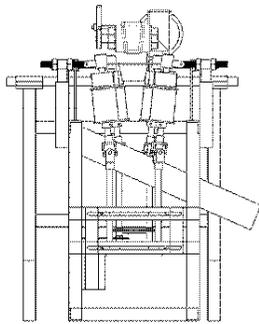
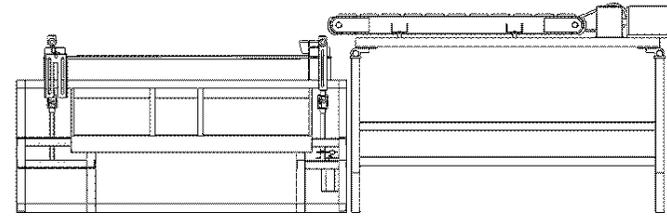
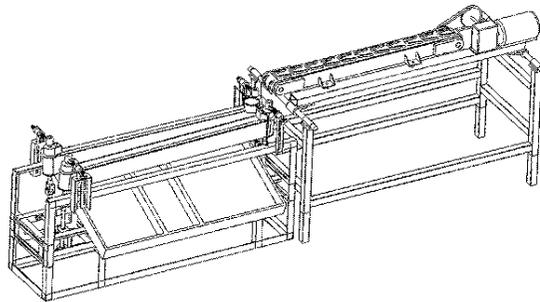
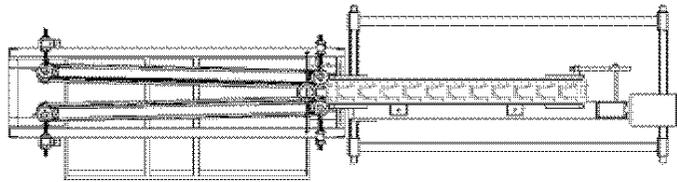


- 1 = มอเตอร์และชุดต้นกำลังเครื่องป้อนผลชมพู
- 2 = สายพานเครื่องป้อนผล
- 3 = โครงสร้างเครื่องป้อนผล
- 4 = มอเตอร์และชุดต้นกำลังเครื่องคัดขนาดผลชมพู
- 5 = ถังผ้า
- 6 = สลักเกลียวปรับมุมเอียงสายพานคัดขนาด
- 7 = สายพานคัดขนาด
- 8 = ฟู่เล่สายพานคัดขนาด
- 9 = Universal joint
- 10 = โครงสร้างเครื่องคัดขนาดผล
- 11 = ถาดรองรับผลชมพู

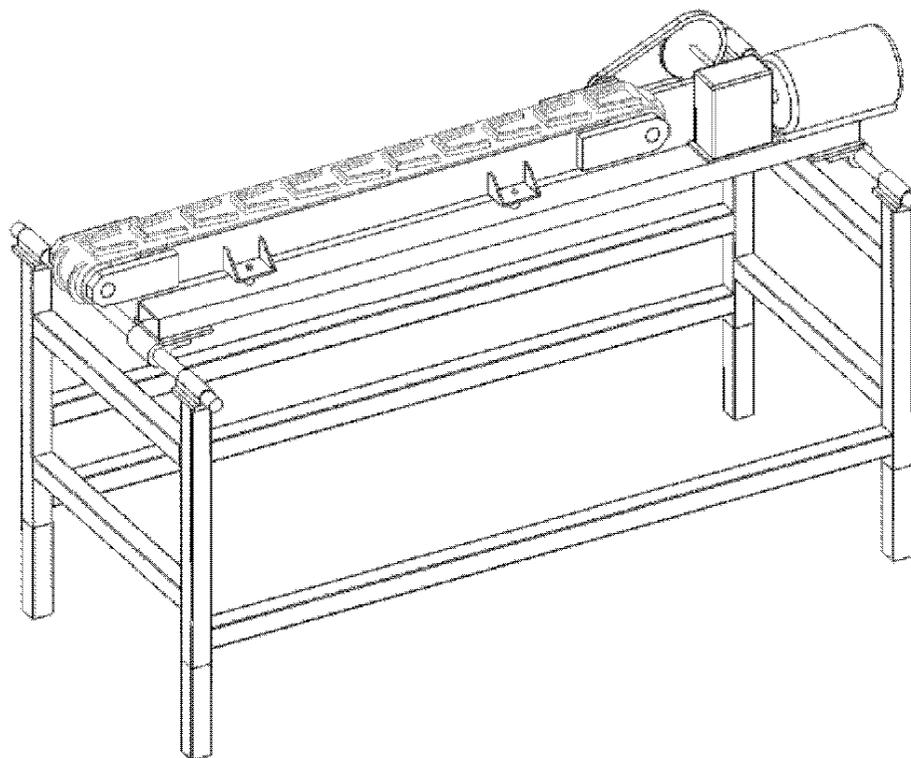
Title	เครื่องกลคัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.สิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			
DWG No.	1	UNIT	-	



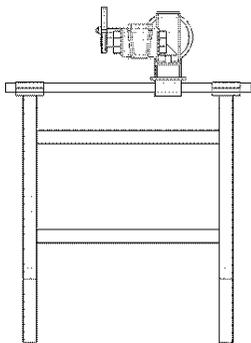
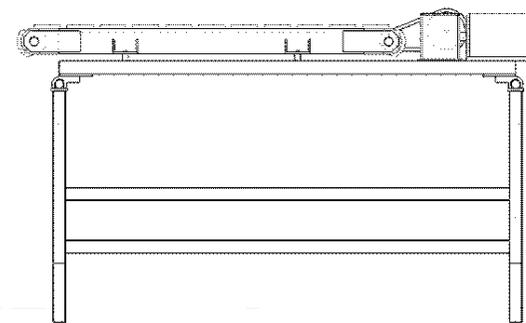
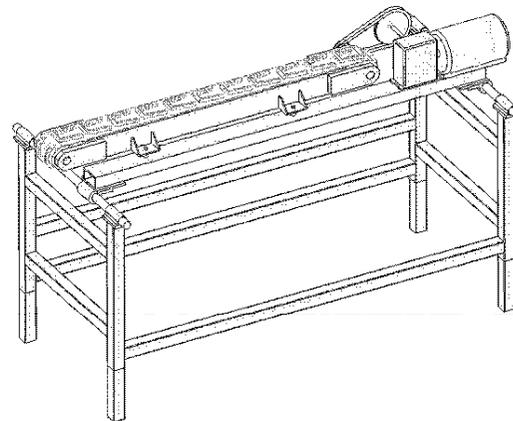
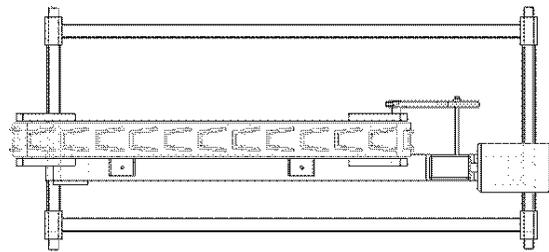
Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			
DWG No.	2	UNIT	-	



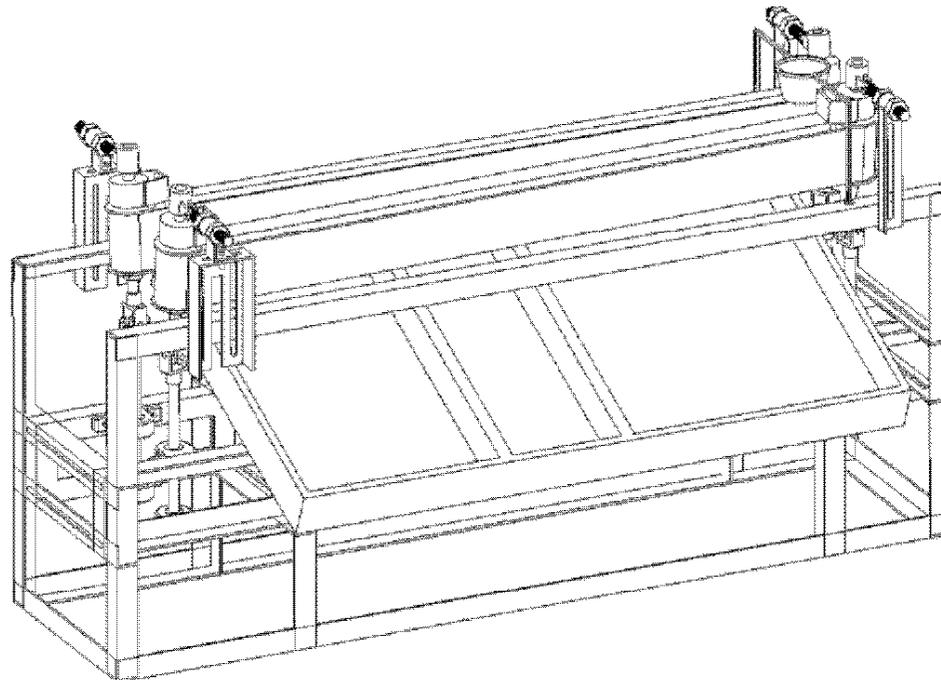
Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			
DWG No.	3	UNIT	-	



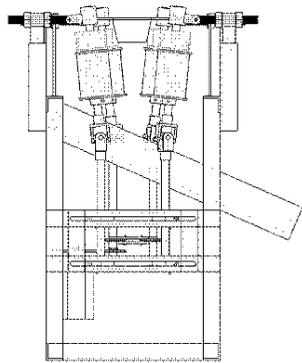
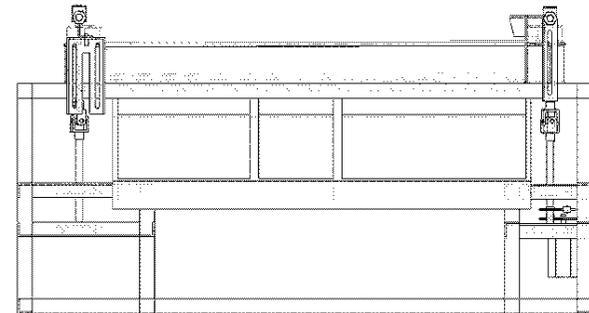
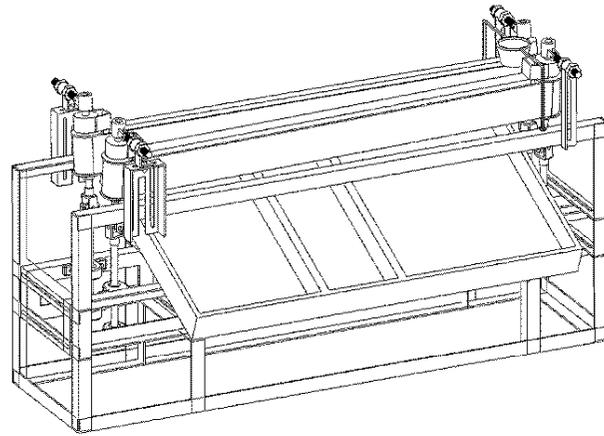
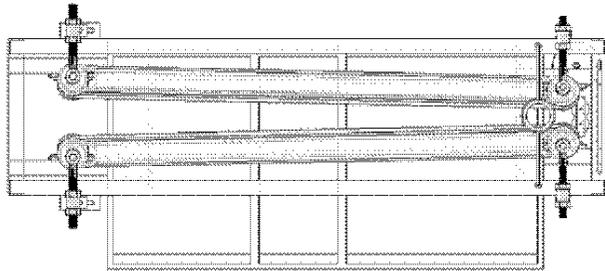
Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			วิทยาเขตกำแพงแสน
DWG No.	4	UNIT	-	



Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.สิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			
DWG No.	5	UNIT	-	

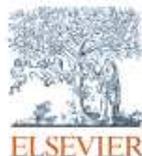


Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	กระวี ศรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์			
DWG No.	6	UNIT	-	



Title	เครื่องกลัดขนาดชมพู			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ผศ.ดร.สิวลักษณ์ ปฐุวีรัตน์			มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
DWG No.	7	UNIT	-	วิทยาเขตกำแพงแสน



Available at www.sciencedirect.comjournal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110

Research Paper

Design of machine to size java apple fruit with minimal damage

Krawee Treeamnuk^a, Siwalak Pathaveerat^{a,*}, Anupun Terdwongworakul^a,
Chanida Bupata^b

^a Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, and The Centre of Excellence for Agricultural and Food Machinery Kasetsart University, Nakornpathom 73140, Thailand

^b Department of Postharvest and Processing Engineering, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, PHTIC, Chonburi, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 March 2010

Received in revised form

28 July 2010

Accepted 3 August 2010

Published online 15 September 2010

Java apple fruit features attractive skin, sweet and crispy flesh, and a high susceptibility to mechanical damage. The java apple produced in Thailand has gained popularity in local and foreign markets, is available almost all year round and is sold at good prices. Fruit export drives postharvest mechanisation, of which fundamentally important machines such as a mechanical sizer for java apple are still not available. This research was aimed at designing, constructing, testing, and evaluating an efficient sizing machine for java apple. Design concepts featured a) a sizing parameters which were determined by the diameter of the fruit and b) a sizing mechanism which causes minimum damage. The sizing machine comprised a feeding unit and a diverging belt sizing unit that are powered by two 187 W 220 V 50 Hz electric motors, gear reducer and pulleys. Performance tests indicated that velocity and inclination angle of the sizing belt; feeding belt velocity and the fruit orientation significantly affects the sizing performance at $p < 0.05$. The optimum conditions for continuous mechanical sizing depended on the variety. The optimum sizing performance was characterised by a contamination or error ratio of 10.8–16.5%, and a throughput capacity of 149.7–195.1 kg h⁻¹ with no significantly noticeable damage to the sized fruits. Manual sizing of the exported java apple featured an error ratio of 27.9%, a damage percentage of 13.3%, and a capacity of 107.2 kg h⁻¹. Therefore, the java apple sizing machine can be operated without adding more mechanical damages to the sized fruit.

© 2010 IAgE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Java apple fruit is popular in Thailand and abroad due to its beautiful skin colour as well as sweet and crispy flesh. The fruit is also of high nutritional value. In the year 2005, exports of the flesh java apple from Thailand reached as much as 44.6

million US\$, which made it the third ranking export fruit after durian and longan.

Amongst postharvest operations of the fresh fruit, sizing is considerably labour intensive. Sizing is necessary, because the sized fruit a) has higher value than fruit that is sold unsorted b) it attracts buyers and c) it facilitates packaging

* Corresponding author. Fax: +66 34351896.

E-mail address: fengsip@ku.ac.th (S. Pathaveerat).

1537-5110/\$ – see front matter © 2010 IAgE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.08.001

Nomenclature			
D_m	Diameter of the java apple fruit head, mm	\bar{C}_k	Mean contamination ratio or error
β	Diverging angle of the sizing belt, °	G_i	Outflow rate of grade i , kg h^{-1}
α	Inclination angle of the belt, °	K_i	Fraction of cost as related to grade i
X_{12}	Diameter of separation of aperture between java apple grade 1 and 2, mm	N_i	Number of grade i fruit of the total assortment at the beginning of sizing
X_{23}	Diameter of separation of aperture between java apple grade 2 and 3, mm	N_{ij}	Number of grade j fruit in the grade i receiver
μ_1	average diameter of java apple fruit grade 1, mm	N_{ji}	Number of grade i fruit in grade j receiver
μ_2	average diameter of java apple fruit grade 2, mm	N_{ci}	Total fruit in grade i receiver, kg
σ_1	standard deviation of java apple fruit grade 1	P_i	Fraction of grade i fruit of the total mixture at the beginning of sizing
σ_2	standard deviation of java apple fruit grade 2	P_{ji}	Fraction of correct fruit in grade i receiver
E_u	Sizing efficiency	t	Feeding time, h
Q	Throughput capacity, kg h^{-1}	W_i	Weighting function
		w_i	Total weight of fruit in grade i receiver, kg
		w_t	Total fruit weight fed into sizing system, kg

designs (Jarimopas, Toomsaengtong, Singh, Singh, & Sothornvit, 2007; Peleg, 1985). Manual sizing is beset by slow sizing rates, considerable errors and mechanical damage. For example, the manual sizing of fresh mangosteen (Jarimopas, Toomsaengtong, & Inprasit, 2007) and durian (Jarimopas, Siriratchatapong, Sukharom, Sihavong, & Goto, 1992) was found to cause error ratios of 34 and 43% respectively. Sizing machines developed to work with tropical fruit are usually composed of a perforated conveyor sizer, a belt, a board sizer, and a diverging belt. Jarimopas, Kongwatananon, Rangdang, and Yamashita (1988) tested a commercial tangerine sizing machine with a mechanism based on the perforated conveyor sizer. Their machine consisted of five perforated cylinders of varying diameters and sized 6 grades of the fruit at a capacity of 1.5 tonne h^{-1} and a sizing efficiency of 87.5%. The high sizing efficiency was perhaps due to the non-deformable aperture. Although commercially applicable, single layer feeding has to be manually controlled and this constitutes an undesirable feature. The sizing of a small number of tangerines is persistently impeded by fruits caught on the inclined plane between the cylinders, so that the operator has to manually move the fruit to the next rotating cylinder to continue sizing. This is a cause of exasperation to the operators and it slows down the sizing process. The rotary sizing machine (GREEFA, Geldermalsen, Netherlands), which is the developed model of the belt and board sizer, was used to size mangosteen (Jarimopas, Toomsaengtong, & Inprasit, 2007; Jarimopas, Toomsaengtong, Singh, et al., 2007). The mangosteen sizer could sort 3 grades (small, medium, large) at a continuous capacity of 1026 kg h^{-1} and an error rate of 23%. The Rotary Greefa concept has also been applied to size other sphere-shaped fruit and vegetables, e.g. guava (Jarimopas, Rachanukroa, & Chen, 2002). The advantage of the apparatus is its ease of transportation, such as on a pick-up truck. However, its performance is limited to single layer feeding and it is characterised by errors due to the inconsistent aperture. Jarimopas et al. (1988) developed a diverging belt sizer to sort mangosteen. The diverging belt is comprised of two 75 mm wide belts which are inclined at an angle of 25° to the horizontal surface. The machine graded mangosteen at a capacity of 1100 kg h^{-1} at an efficiency rate of 80%. The low inclination of the sizing belt required mangosteen

to travel considerable distances before calibration of the fruit diameter and the descent from sizing belt posed a major disadvantage of the machine. This resulted in a long machine, which made transportation difficult. Furthermore, its aperture was inconsistent because of the non-uniformity of the sizing belt.

For the frustum-shaped fruit, such as pears and carrots, Peleg (1985) suggested using the diverging belt sizer for efficient sorting. A proper sizing machine ought to feature fast sizing rates, acceptable error ratios with insignificant mechanical damage. Mohsenin (1996) stated that mechanical damage was the by-product of the use of agricultural machinery. Possibly, the aforementioned machines caused mechanical damage but the related evaluations were not reported. Bupata, Jarimopas, & Changtong (2007) reported that the diameter of java apple fruit varies proportionally with the fruit weight. The variation of the java apple fruit diameter respective to size and cultivar was presented by Sarakan, Jarimopas, and Changtong (2007). Based on the compression rupture force of java apple skin, its

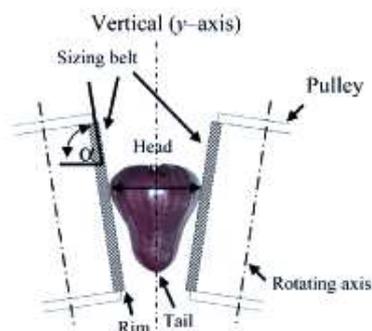


Fig. 1 – Design concept of the java apple fruit sizing machine showing the inclination angle α and front view of the sizing configuration (horizontal plane is perpendicular to the paper).

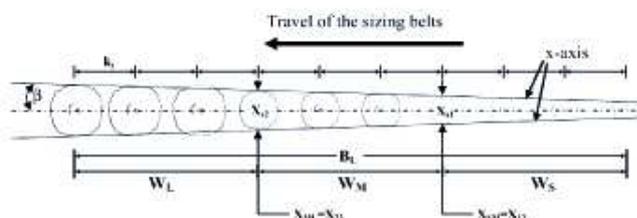


Fig. 2 – Aperture profile of the sizing belt (B_i = belt length, W_L = sizing length of grade L, W_M = sizing length of grade M, W_S = sizing length of grade S, k_i = interval of fruits (200 mm)).

skin was found more susceptible to damage than apple (Jarimopas, Toomsaengtong, & Inprasit, 2007; Jarimopas, Toomsaengtong, Singh, et al., 2007). Abrasion and bruising were potentially found on packaged java apples under simulated transport vibration whilst greater abrasion was observed. (Jarimopas, Toomsaengtong, & Inprasit, 2007; Jarimopas, Toomsaengtong, Singh, et al., 2007).

Commercially java apple yields high prices, and is gaining popularity in foreign markets where it is available almost all year round. Fruit production is rather uniform but shortages and costs of labour are becoming crucial. Therefore, the demands for sizing machines have increased. A specific sizing machine for java apple fruit is not available. The development of a simple, compact, rugged mechanical sizer to work with the highly susceptible fruit is a challenge. Thus, this research is aimed at designing, constructing, testing, and evaluating a sizing machine for fresh java apple fruit with acceptable error rates and minimal damage.

2. Materials and methods

2.1. Design and operation

2.1.1. Design

The design concept comprised four criteria: a) the sizing parameter was to be determined by the diameter of the java apple fruit head (D_n in Fig. 1), b) the sizing mechanism had to incur minimum damage, c) the sizing machine had to provide mechanisms to consistently meter the fruit diameter and to uniformly release the measured fruit into receiving container of the corresponding size, and d) the machine should be simple, compact, rugged and transportable.

A diverging belt design was selected because (i) the sizing belts provide two contact points that measure the java apple diameter whilst the fruit progresses along the belts. (ii) the sizing belts travel simultaneously diverging during movement, and as a result, the measured fruit descends on the belts and left the belts at their base (aperture) when the aperture loses contact with the measured fruit, the fruit descends to the receiving container of the corresponding size. (iii) the shape of java apple fruit fairly resembles that of pear. Fig. 2 showed the base view of the diverging belt sizing machine; the solid line shows the rim of the aperture.

Preliminary drop tests of 15 fresh intact java apple fruit (of uniform size) from 150, 200 and 250 mm height onto a hard surface cushioned by 20 mm foam rubber revealed that fruit damage occurs at a minimal plunge height of 200 mm. For an assumed uniformly accelerated motion, this corresponds to 0.2 s drop time (Meriam, 1975). The travel velocity of the sizing belt of 200 mm s^{-1} and the combined time of fruit descent and fruit removal from of the receiving tray of 0.5 s, dictates a feasible placement of the fruits at $200 \times 0.5 = 100$ mm intervals. The diverging belt sizing machine was designed as to allow 3 fruits of the same grade to travel in sequence along the belt (the small grade permits 4 fruits) (Fig. 2). Three grades (large, medium, and small) are required. The active length was to be 900 mm plus 100 mm of additional space for the fruit rebound (if any) on each side, giving a total length of 1100 mm is designated. The diverging angle of the belt is β in Fig. 1. As per Rupata et al. (2007), β was equal to 0.29, 0.55 and 0.34° for the varieties of java apple Toonklao, Tubtimjan and Tongsamri respectively. The inclination angle of the belt is shown as α in Fig. 1. The diverging belts need to be inclined to the horizontal plane, because the inclination causes 2 point contact for every fruit during movement regardless of size. Thus, every fruit is measured at its head diameter. Should a be

Table 1 – Statistics of aperture and β angles of the sizing belts.

Variety	Maximum Diameter for the fruit size (mm)			X_{12} (mm)	X_{23} (mm)	β (°)
	S	M	L			
Toonklao	52.92 ± 1.57	57.70 ± 0.89	64.12 ± 1.37	59.96 ± 4.16	53.01 ± 7.30	0.29
Tubtimjan	45.30 ± 2.93	58.08 ± 1.53	65.80 ± 1.36	62.87 ± 9.40	94.86 ± 32.73	0.55
Tongsamri	51.15 ± 2.20	58.47 ± 1.53	63.07 ± 1.82	65.33 ± 10.02	47.39 ± 13.29	0.34

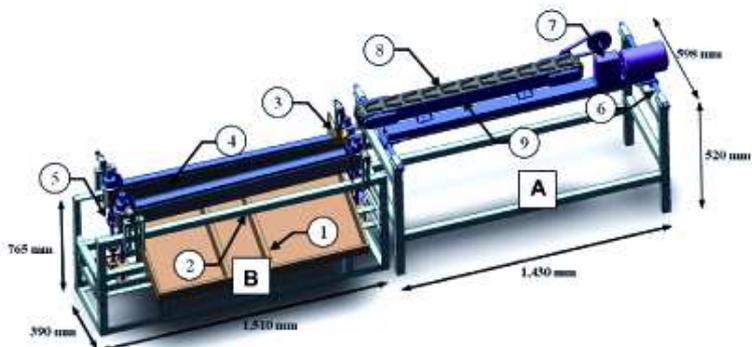


Fig. 3 – Schematic diagram of java apple fruit sizing machine (A = feeding unit; B = diverging belt sizing unit; 1 = receiving tray; 2 = steel frame; 3 = conical cloth tube; 4 = cushioned sizing belt; 5 = universal joint; 6 = cylindrical shaft; 7 = electric motor and reduction gear; 8 = U-shape rubber holding java apple; 9 = feeding belt).

too large the fruit falls and does not symmetrically lie on the belts with respect to the y-axis and the head diameter is therefore not measured. If the α is too small, the fruit shoulder might stay at the rim, and diameter measurement does not occur. The appropriate inclination angle (α) therefore needed to be determined. Eq. (1) (Peleg, 1985) suggests the estimate of diameter of separation (X_{12} and X_{23}) between java apple fruits of adjacent grades from the mean and the standard deviation of each adjacent grade. The values of X_{12} and X_{23} are given in Table 1.

$$X_{12} = \frac{(\mu_2\sigma_1^2 - \mu_1\sigma_2^2)}{(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} + \left[\left(\frac{\mu_2\sigma_1^2 - \mu_1\sigma_2^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right)^2 - \frac{(\mu_2^2\sigma_1^2 - \mu_1^2\sigma_2^2 - 2\sigma_1^2\sigma_2^2 \ln(\sigma_1/\sigma_2))}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

where

- X_{12} = diameters of separation of aperture between java apple grade 1 and 2
- μ_1 = average diameter of java apple fruit grade 1
- μ_2 = average diameter of java apple fruit grade 2
- σ_1 = standard deviation of java apple fruit grade 1
- σ_2 = standard deviation of java apple fruit grade 2

Fig. 3 shows the developed java apple fruit sizing machine with the feeding unit and the diverging belt sizing unit. The feeding unit, 598 mm wide by 1430 mm long by 520 mm high, was made of steel. Two 25.4 mm diameter cylindrical shafts were mounted at the top of the frame to facilitate belt adjustments. The feeding belt, Ammeraal type Belt Flexam EM 10/2 Green FG (Ammeraal Beltech, Heerhugowaard, Netherlands), was 100 mm wide by 2400 mm long and parallel

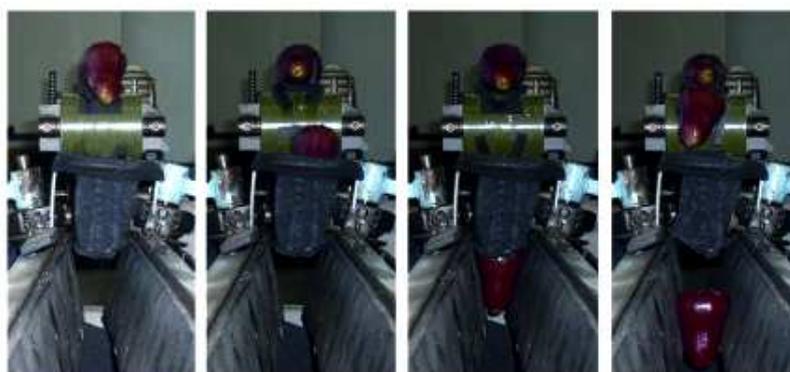


Fig. 4 – Typical motion of java apple fruit and the conical cloth tube of the sizing machine.

to the floor. The feeding unit was driven by a 0.19 kW 220 V 50 Hz electric motor, a 1:20 gear reducer, a chain and a pulley. A U-shape rubber cushion was attached to the surface of conveyor belt with 80 mm spacing of the partial containers of the fruit for uniform semi-automatic fruit feeding. The sizing machine, made of steel and 390 mm wide, 1510 mm long and 765 mm high, featured a galvanised steel receiving tray 600 mm wide 1100 mm long, and 80 mm deep. The receiving tray was cushioned with 20 mm rubber foam with two adjustable partitions for the desired fruit size separation. The sizing belts diverged and were inclined to the horizontal plane at α degree. Each of the two sizing belts, Ammeraal type Nonex EM B/2 Blue FG were 100 mm wide and 2500 mm long. The outer surface of the belts was lined with 4 mm latex foam. Each belt was driven at the same velocity by a 220 V 50 Hz electric motor operating at 1450 rpm with reducing gear and a universal joint to facilitate the adjustment of belt angle. A cloth conical tube was placed between the end of the feeding belt and the beginning of the sizing belt to control the vertical descent of the java apple fruits, to decelerate fruit drop onto the sizing belt thereby reducing damage to the fruit. The movement of the fruit on the sizing belt was below horizontal thereby minimising vertical sliding. The conical cloth tube was 120 mm long and made of yarn. It had a 100 mm aperture diameter at the top and 60 mm aperture diameter at the bottom. The feeding machine and the sizing machine were placed in proximity to the cloth conical tube and were well aligned.

2.1.2. Operation

Java apple fruits were manually continuously fed into the U-shaped rubber of the feeding belt by an operator in such a way that the stem end of the fruit was parallel to the belt movement. This provides a uniformly automatic feed of the fruits to the sizing belt. However, the feeding machine capacity was limited by the operator's competence. The conveyed fruit left the feeding belt and dropped vertically into the conical cloth tube (Fig. 4). The conical cloth tube not only carried the fruit vertically, but it also decelerated the fruit to minimise the impact on the sizing belt. The appropriate alignment and symmetry of the feeding belt, the cloth conical tube, and the sizing belt improved the vertical orientation of the java apple during its descent at the start of the sizing process.

The sizing belt carried the java apple fruits past 2 contact points. The forward motion, divergence of the sizing belts and the fruit weight caused the fruit to descend towards the lower end or the aperture of the belts. Therefore, the two contact points on the sizing belts and fruit surface were continuously. Such phenomenon could cause skin rubbing on the fruit and might give rise to abrasion. This was prevented by cushioning on the surfaces of the sizing belts. When the fruit reached the aperture that infinitesimally exceeded the fruit diameter, the fruit lost contact with the belts and fell into the correct receiving tray.

2.2. Performance test

Sample preparation for the determination of optimum working conditions included the random selection of newly-harvested, uniform and damage free java apple fruit. Thirty

sample fruits of each size (three sizes: small, medium, large) of each variety (three varieties: Toonklao, Tubtimjan and Tong-samsri) were collected. Maximum fruit head diameter, length and weight of each sample were measured with a vernier calliper and an electronic balance (Sartorius G 6000, Sartorius AG, Goettingen, Germany).

2.2.1. Determination of the optimum angle of inclination and the velocity of sizing belt

Samples of java apple fruit were prepared as mentioned above. Testing conditions included two control factors; the angle of inclination of the sizing belt (3 levels: 75°, 80° and 85°) and the sizing belt velocity (3 levels: 10, 20 and 30 m min⁻¹). Uniform feeding of java apple samples to the sizing belt was regulated at 15 m min⁻¹. Five replications were carried out for a combination of the control factors. Performance of the sizing machine was evaluated with Eqs. (2–4). Analysis of variance (ANOVA) and Duncan Multiple Range Test (DMRT) were applied to determine the influence of the control factors.

$$E_w = \sum \left(\frac{P_i W_i G_i}{Q F_i} \right) \quad (2)$$

$$Q = \frac{W_t}{t} \quad (3)$$

$$\bar{C}_s = \frac{\sum N_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

where

$$P_i = \frac{N_{ij}}{N_i}$$

$$N_s = N_{s1} + N_{s2}$$

$$W_i = \frac{K_i P_i}{\sum K_i P_i}$$

$$F_i = \frac{N_i}{\sum N_i}$$

$$G_i = \frac{W_i}{t}$$



Fig. 5 – Shape of the head of a java apple fruit.

Table 2 Effects of velocity and inclination angle of the sizing belt on the performance of the java apple fruit (Toonklao variety) sizing machine.

Inclination angle (°)	Sizing belt velocity (m min ⁻¹)	\bar{C}_k (%)	E_w (%)
75	10	26.35 ± 4.00 ^{ab}	76.13 ± 8.07 ^{ab}
	20	26.48 ± 7.53 ^{ab}	80.32 ± 10.49 ^{ab}
	30	27.44 ± 3.48 ^{bc}	81.97 ± 7.82 ^a
80	10	25.71 ± 2.91 ^{ab}	80.11 ± 10.95 ^{ab}
	20	33.14 ± 6.28 ^{bc}	75.24 ± 7.23 ^{ab}
	30	33.37 ± 2.45 ^a	74.91 ± 4.92 ^{ab}
85	10	30.19 ± 4.58 ^{abc}	70.19 ± 4.45 ^b
	20	23.30 ± 4.19 ^{bc}	79.74 ± 5.21 ^{ab}
	30	25.26 ± 3.91 ^{ab}	76.24 ± 6.07 ^{ab}

*Means with the same letter in the same column designate insignificant difference at $p < 0.05$.

Table 3 Effects of velocity and inclination angles of the sizing belt on the performance of the java apple sizing machine (Tubtimjan variety).

Inclination angle (°)	Sizing belt velocity (m min ⁻¹)	\bar{C}_k (%)	E_w (%)
75	10	17.70 ± 5.33 ^{abc}	91.97 ± 5.47 ^{ab}
	20	12.13 ± 3.39 ^a	92.77 ± 2.63 ^b
	30	16.89 ± 1.89 ^{ab}	88.22 ± 1.96 ^{ab}
80	10	20.74 ± 9.17 ^{bcd}	85.42 ± 7.96 ^{ab}
	20	24.25 ± 5.86 ^{cd}	88.85 ± 11.07 ^{ab}
	30	19.15 ± 3.61 ^{abcd}	91.22 ± 5.33 ^{ab}
85	10	25.25 ± 5.09 ^d	76.18 ± 8.26 ^b
	20	24.64 ± 5.14 ^{cd}	86.76 ± 6.83 ^{ab}
	30	15.99 ± 0.47 ^{ab}	92.49 ± 5.79 ^{ab}

*Means with the same letter in the same column designate insignificant difference at $p < 0.05$.

and where E_w is sizing efficiency, Q is throughput capacity, \bar{C}_k is mean contamination ratio or error, G_i is outflow rate of grade i , K_i is the fraction of cost as related to grade i , N_i is the number of grade i fruit of the total assortment at the beginning of sizing, N_{ij} number of grade j fruit in the grade i receiver, N_{ji} is the number of grade i fruit in grade j receiver, N_{0i} is the total fruit in grade i receiver, P_i Fraction of grade i fruit of the total mixture at the beginning of sizing, P_{ji} is the fraction of correct fruit in grade i receiver, t is feeding time, W_i is a weighting function, w_i is the total weight of fruit in grade i receiver and w_0 is the total fruit weight fed into sizing system.

2.2.2. Determination of the optimum feeding belt velocity

The sample preparation as described above was repeated for these tests. The determined condition of velocity and inclination angle of the sizing belt for a specific variety was not altered throughout the determination. The control factors were the feeding belt velocities (3 levels: 15, 20 and 25 m min⁻¹). Five replications were carried out. The sizing machine performance was analysed using ANOVA and DMRT.

2.2.3. Determination of the optimum fruit orientation and the associated mechanical damage

The shape of the java apple fruit (Fig. 5) determined the maximum and the minimum dimensions of the fruit head. Both parameters were significantly different (Bupata et al., 2007). The fruit shape influenced the test condition of fruit orientation in regard to the sample placement on the feeding belt (2 possibilities: random placement and horizontal maximum diameter placement). Each fruit sample was placed with its stem orientated towards the sizing unit. The determined conditions of velocity and inclination angle of the sizing belt, and feeding belt velocity for a specific variety were not altered throughout the experiment. Sample preparation was as reported earlier. The testing procedure and statistical analysis of results were as used in the earlier tests.

Following the tests 90 java apple samples of all sizes were randomly collected and stored at 15 °C for 6 h (Jarimopas, Toomsaengtong, & Inprasit, 2007; Jarimopas, Toomsaengtong, Singh, et al., 2007). The damage characteristics of java apples that were sized by the machine, both with and without conical cloth tube, and a control set of fruits (which was not processed

by the machine) were comparatively analysed using Eqs. 5, 6 and 7.

$$\text{Damage area (\%)} = \frac{\text{Damaged area of a fruit}}{\text{Fruit surface area}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Average fruit damage (\%)} = \frac{\text{Total of Damage area}}{\text{Total java apple fruit}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Damage percentage (\%)} = \frac{\text{Number of damage dfruit}}{\text{Total java apple fruit}} \times 100 \quad (7)$$

The damage of java apple was assessed into 3 levels: level 1; no apparent damages, level 2; damage area <0.5%, and level 3; damage area <0.5%.

2.2.4. Continuous operation test

The appropriate conditions of velocity and inclination angle of the sizing belt, the feeding belt velocity, the fruit orientation on the feeding belt previously obtained were fixed for this test. Five hundred, newly-harvested, uniform and damage free java apple fruits of each variety were randomly harvested from an export orchard in Nakornpathom, Thailand. Measurements of the physical characteristics of each fruit sample were carried

Table 4 Effects of velocity and inclination angles of the sizing belt on the performance of the java apple sizing machine (Tongsamsri variety).

Inclination angle (°)	Sizing belt velocity (m min ⁻¹)	\bar{C}_k (%)	E_w (%)
75	10	24.07 ± 2.76 ^{ab}	94.96 ± 3.76 ^b
	20	29.01 ± 5.05 ^b	95.55 ± 4.73 ^b
	30	23.85 ± 3.25 ^{ab}	95.10 ± 3.16 ^b
80	10	22.50 ± 3.66 ^{ab}	88.42 ± 8.73 ^{ab}
	20	18.91 ± 3.26 ^a	88.22 ± 7.64 ^a
	30	19.91 ± 7.94 ^a	93.54 ± 5.15 ^b
85	10	28.60 ± 4.95 ^b	87.09 ± 8.92 ^{ab}
	20	21.49 ± 4.46 ^a	92.39 ± 6.28 ^{ab}
	30	20.49 ± 5.58 ^a	84.16 ± 4.94 ^a

*Means with the same letter in the same column designate insignificant difference at $p < 0.05$.

Table 5 – Effects of feeding belt velocity on the performance of the java apple fruit sizing machine.

Variety	Feeding belt velocity (m min ⁻¹)	\bar{C}_k (%)	E_w (%)
Toonkiao	15	5.80 ± 2.05 ^b	96.80 ± 1.22 ^b
	20	11.35 ± 2.16 ^b	92.26 ± 1.99 ^a
	25	16.02 ± 1.66 ^c	89.69 ± 5.36 ^a
Tubtimjan	15	12.13 ± 3.39 ^b	92.77 ± 2.63 ^a
	20	24.24 ± 2.40 ^c	86.68 ± 5.80 ^b
	25	23.16 ± 4.15 ^c	85.77 ± 4.94 ^b
Tongsamsri	15	18.91 ± 3.26 ^c	88.22 ± 7.64 ^a
	20	20.58 ± 10.26 ^b	80.93 ± 12.08 ^b
	25	20.30 ± 3.44 ^a	83.13 ± 6.08 ^a

^aMeans with the same letter in the same column designate insignificant difference at $p < 0.05$.

out as reported earlier. All the fruit samples of each variety were continuously sorted by the prototype machine and the performance of the machine evaluated.

3. Results and discussion

3.1. Optimum velocity and inclination angle of the sizing belt

For specific varieties, the velocity and the inclination angle of the sizing belt significantly affected the mean contamination ratio (\bar{C}_k) and sizing efficiency at $p < 0.05$; based on the priority of contamination ratio. The optimum velocity and the inclination angle were 20 m min⁻¹ and 85° for Toonkiao variety, resulting in the lowest \bar{C}_k of 23.3% and an E_w of 79.7% (Table 2). For the Tubtimjan variety, the appropriate velocity and the inclination angle were 20 m min⁻¹ and 75°, resulting in the lowest \bar{C}_k of 12.1% and E_w of 92.8% (Table 3). Although the velocity of the feeding belt was kept constant at 15 m min⁻¹, the optimum velocity and the inclination angle of the sizing belt for the Tongsamsri were between 20 and 30 m min⁻¹ and 80°, resulting in the lowest \bar{C}_k of approximately 18.9% and E_w of 88.2% (Table 4).

3.2. Optimum feeding belt velocity

Operation of the java apple sizing machine under i) the controlled condition of optimum velocity and inclination angle of the sizing belt for each variety and ii) the variation of feeding belt velocity due to uniform feed the fruit on U-shape rubber by

the operator, revealed that the feeding belt velocity significantly affected \bar{C}_k , E_w and Q at $p < 0.05$ for specific varieties. As indicated by the highest E_w and the lowest \bar{C}_k the optimum feeding belt velocity for the Toonkiao, Tubtimjan and Tongsamsri varieties was identical at 15 m min⁻¹. The corresponding performance parameters were $\bar{C}_k = 5.8\%$ and $E_w = 96.8\%$ for the Toonkiao variety; $\bar{C}_k = 12.1\%$ and $E_w = 92.8\%$ for the Tubtimjan variety; $\bar{C}_k = 18.9\%$ and $E_w = 88.2\%$ for the Tongsamsri variety (Table 5). \bar{C}_k tended to be significantly higher for feeding belt velocities >15 m min⁻¹ for the Tubtimjan variety, because at high velocity, some fruits left the belt in an unsymmetrical manner when passing through the conical cloth tube. As a result, the fruits were not vertical when they contacted the sizing belt which caused sizing errors.

3.3. Optimum fruit orientation and damage analysis

With respect to the optimum velocity, inclination angle of the sizing belt and the feeding belt velocity for a specific variety, assessment of the sizing machine indicated that fruit orientation significantly affected the performance of the machine at $p < 0.05$. Table 6 exhibits the maximum diameter placement on the U-shape rubber produced smaller \bar{C}_k and smaller Q for all varieties when compared to the \bar{C}_k and Q for random placement. The smaller Q might be due to the care of the operator in keeping the position of the fruit in the U-shape rubber in conformity with to the B-orientation, however this practise caused some loss in time. This problem could be solved by more practise with fruit placement.

Table 7 shows the group of java apple fruit sized by the diverging belt sizing machine both with and without the conical cloth tube and the control group of Tubtimjan, Tongsamsri and Toonkiao varieties. All varieties of sized fruits sorted by the machine with installed conical cloth tube exhibited less damage than fruit sorted by the machine without the conical cloth tube installed. In case of the Tongsamsri variety, there was damage at level 3 when sorted by the machine without the conical cloth tube while no level 3 damage was observed for sorting by the machine with the cloth conical tube. The apparent damage on the fruits was either within normal parameters or absent. The most frequently observed levels of damage were in the minimal damage level (level 2: damage area < 0.5 percent).

3.4. Continuous performance

The diverging belt sizing machine was tested by continuously sizing 500 java apple fruits from each of the Tubtimjan,

Table 6 – Effects of fruit orientation on the performance of the java apple fruit sizing machine.

Variety	Fruit orientation	Q (kg h ⁻¹)	\bar{C}_k (%)	E_w (%)
Toonkiao	Random	263.92 ± 11.30 ^b	17.21 ± 2.09 ^b	93.52 ± 3.00 ^a
	Maximum diameter	179.87 ± 4.90 ^a	9.84 ± 1.93 ^a	93.62 ± 1.83 ^a
Tubtimjan	Random	333.09 ± 28.51 ^b	6.47 ± 2.46 ^b	91.23 ± 10.41 ^a
	Maximum diameter	214.22 ± 8.37 ^a	3.16 ± 1.07 ^a	97.94 ± 0.97 ^b
Tongsamsri	Random	326.70 ± 33.49 ^b	14.26 ± 3.69 ^b	88.63 ± 5.30 ^a
	Maximum diameter	187.44 ± 5.69 ^a	8.66 ± 1.80 ^a	91.51 ± 2.70 ^b

^aMeans with the same letter in the same column designate insignificant difference at $p < 0.05$.

Table 7 – Damage of the mechanically sized java apple fruit (both with and without conical cloth tube on the machine) in comparison with the control sample.

Variety	Level of damage	Control set		Sizing with cloth conical tube		Sizing without cloth conical tube	
		Damage percentage (%)	Average fruit damage (%)	Damage percentage (%)	Average fruit damage (%)	Damage percentage (%)	Average fruit damage (%)
Toonkiao	Level 1 ^a	74.44	–	65.56	–	32.22	–
	Level 2	25.56	0.12 ± 0.09	34.44	0.09 ± 0.04	67.78	0.11 ± 0.07
	Level 3	–	–	–	–	–	–
Tubtimjan	Level 1	36.67	–	65.56	–	26.67	–
	Level 2	61.11	0.13 ± 0.10	32.22	0.14 ± 0.11	71.11	0.15 ± 0.10
	Level 3	2.22	0.71 ± 0.12	2.22	0.94 ± 0.26	2.22	0.66 ± 0.06
Tongsamsri	Level 1	88.89	–	85.56	–	68.89	–
	Level 2	11.11	0.06 ± 0.04	14.44	0.23 ± 0.11	30.00	0.08 ± 0.08
	Level 3	–	–	–	–	1.11	0.85 ± 0.04

a. The damage of java apple was divided into 3 levels – level 1: no apparent damage, level 2: Damage area less than 0.5 percent and level 3: Damage area in excess of 0.5 percent and over.

Tongsamsri and Toonkiao varieties. \bar{C}_R and Q for the Tubtimjan variety were 12.2% and 195.1 kg h⁻¹ while those for the Tongsamsri variety were 16.5% and 181.7 kg/h and for Toonkiao 10.8% and 149.7 kg h⁻¹ respectively. For a given variety, \bar{C}_R and Q were relatively lower than those obtained in the previous determination in paragraph 2.3.3. This might occur because in Section 2.3.3, there were equal in numbers for each size; whereas the sample preparation of the continuous performance test was dependent on what the fruit growers provided. The weight ratios of the java apple fruits of small: medium: large size of the Tubtimjan variety were 0.2: 1: 0.24, those of the Tongsamsri variety were 1: 0.99: 0.57 and those of the Toonkiao variety were 0.48: 1.00: 0.33, respectively. Manual sizing of the java apples of the Tongsamsri variety, destined for export, on average achieved a performance of 107.2 kg h⁻¹ with a contamination ratio (\bar{C}_R) of 27.9% and a mechanical damage (Eq. (7)) of 13.3% (Treeamnuak, Jarimopas, & Jantong, 2008). Percent of damaged area was found to be insignificantly different at $p < 0.05$ for the mechanically sized fruit when compared with the control for every variety. This implies that the sizing machine did not incur additional noticeable damage to the sized fruits. Alternatively, the java apple fruit mechanical sizer could be operated at zero noticeable damage. Fewer errors, improved capacities and, in particular, zero noticeable damages in the sorting of fruit are considered to be a significant advantage of the diverging belt sizing machine.

4. Conclusions

The performance test of the java apple fruit sizing machine indicate that velocity and inclination angle of the sizing belt, feeding belt velocity and the fruit orientation significantly affects the sizing performance at $p < 0.05$. The optimum conditions for continuous mechanical sizing were dependant on the variety of the fruit. The optimum sizing performance was characterised by an error ratio of 10.8–16.5% and a throughput capacity of 149.7–195.1 kg h⁻¹. Manual sizing of java apple destined for export feature average ratios of 27.9% in error, 13.3% in damage and a capacity of 107.2 kg h⁻¹. The

developed java apple sizing machine could be operated at "zero noticeable damage", and therefore no additional mechanical damage to the sized fruits.

Acknowledgement

All authors would like to dedicate the success of this work to late Professor Budit Jarimopas. This research grant was supported by the program Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Ph.D. Program Thai Doctoral degree from the Office of the Higher Education Commission, Thailand. The authors would also like to express their gratitude towards the financial support received from the Postgraduate Education and Research Development Project in Postharvest Technology at Chiangmai University and the Graduate School at Kasetsart University, Postharvest Technology Innovation Center (PHTIC). And finally we would like to thank the Rajamankala University of Technology Thanyaburi, Thailand.

REFERENCES

- Bupata, C., Jarimopas, B., & Chantong, S. (January 22–24, 2007). Conditions influencing design of a java apple fruit sizing machine. In: *Proceedings of the International Conference on agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/ Production Technology*, Khon Kaen, Thailand.
- Jarimopas, B., Kongwatananon, K., Rangdang, C., & Yamashita, R. (1988). Mangosteen sizing machine. *Kasetsart Journal (Natural Science Supplement)*, 22, 91–96.
- Jarimopas, B., Rathanakroa, D., & Chen, P. (November 28–30, 2002). Guava sizing machine. In: *Proceedings of the 7th International agricultural Engineering Conference*, Shanghai, China.
- Jarimopas, B., Siriratchatpong, P., Sukharom, S., Sihavong, S., & Goto, Y. (1992). Durian sizing machine. *Kasetsart Journal (Natural Science Supplement)*, 26, 65–74.
- Jarimopas, B., Toomsaengton, S., & Inprasit, C. (2007). Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine. *Journal of Food Engineering*, 79, 745–751.

- Jarimopas, B., Toomsaengtong, S., Singh, S. P., Singh, J., & Sothornvit, R. (2007). Development of wholesale packaging to prevent post-harvest damage to rose apples. *Journal of Applied Packaging Research*, 2(1), 27–44.
- Meriam, J. L. (1975). *Dynamics*. USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Mohsenin, N. N. (1996). *Physical properties of plant and animal materials*. 2nd Revised and Updated ed.. Thailand: Gordon and Breach Publishers
- Peleg, K. (1985). *Produce handling, packaging and distribution*. Connecticut, USA: AVI. Pub. Co. Inc.
- Sarakan, S., Jarimopas, B., & Chantong, S. (January 22–24, 2007). Textural properties of Thai java apple fruits. In: *Proceedings of the International Conference on agricultural, Food and Biological Engineering & post Harvest/Production Technology*, Khon Kaen, Thailand.
- Treesamnuak, K., Jarimopas, B., & Jantong, S. (August 14–15, 2008). Mechanical damage analysis of mechanically sized java apple fruit. In: *Proceeding of the 6th National Conference on postharvest Technology and post production, organized by postharvest Technology Innovation Center and Khon Kaen University*, Khon Kaen, Thailand.

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

Maturity Grading of Fresh Young Coconut Fruit Based on Light Property

Krawee TREEAMNUK¹, Bundit JARIMOPAS², Siwalak PATHAVEERAT³,
 Manusak JANTHONG⁴, Soros JIWANUWONG⁵

Abstract

This research was to determine the light property separating coconut maturity. Methodology included direct measurement of 60 fresh young coconut fruit selected at random. Volume and specific gravity of the young coconut sample was measured by water displacement method. Measurement of light property comprised two control factors; a) location of measurement on the fruit and b) maturity (immature, mature, over-mature). Light measurements were made at these locations: on three ridges, three faces and seven positions equally spaced along the fruit surface on the ridge or the face. Light property in term of absorbance was obtained by Spectrophotometer USB2000 Ocean Optic and analyzed by computer software Spectra suite Ocean Optic. Each fruit sample was cut open for measurement of flesh thickness.

Results showed the location of measurement and the maturity significantly affected the absorbance of light (370≤wavelength≤500nm) of young coconut fruit at $p < 0.05$

The proper position of light measurement is at the topmost point closest to the stem on the ridge. Measurements at this position clearly give maturity differentiation. The associated absorbance for the immature, mature and over-mature was 0.806 ± 0.11 , 0.887 ± 0.08 , 0.966 ± 0.10 respectively.

[Keywords] Young coconut, light property, absorbance, fruit orientation, Reuleaux diameter

1 Introduction

Young coconut is highly nutritious and one of the most important export fruits of Thailand. Cultivar generally grown in Thailand for export is *Nam Hom*. The total export value of young coconut in 2007 was USD 10 m. notwithstanding, highly demand of young coconut, the exported young coconut from Thailand was lower value than major producing country such as Malaysia, Philippines and Sri Lanka. Maturity stage grading is serious problem of young coconut production in Thailand. Because of Thai farmer could not classify the real maturity grade of harvested young coconut, so, the products were sold in low price of unsorted grade.

The traditional maturity stages of young coconut are indicated by man, which observe cluster emerge from canoe-shaped sheaths among the leaves, fruit skin color, rachilla color and nature of coconut skin. These indications are inaccurate method because they are depended on the weather and season (Nopparat, 1993). Recently, Nondestructive techniques are widely used in fruits qualification, Anupun (1997) applied the free-vibration from knocking with wood stick, to find the natural frequency index of Dorian (calculate from natural frequency, F and mass of Dorian, m). The results found that $2/3F^2 \ln(m)$ is appropriate form of index and the index number was reduced with respective durian ripeness. Bundit et al., (2004) developed the acoustic response tester

machine to detected the natural frequency of pine apple at difference stages of maturity. The results of testing with the machine are accuracy similar to Signal Analyzing machine YOGOKAWA AR 1200. The modes of spectroscopy between transmission mode and reflectance mode, Xiaping Fu et al., (2007) reported the visible-near infrared (VIS/NIR) range of 400-1,028 nm used to detect the brown heart in pears. The data were analyzed by discriminant analysis technique, the results shown that accuracy of detecting brown heart is 91.2% and transmission mode with stem-calyx axis horizontally placed of pears is better than vertical. The multi-linear regression (MLR), principal component regression (PCR) and partial least squares regression (PLSR) with first derivative and second derivative of $\log(1/R)$ that corrected from diffuse reflectance Vis-NIR in 350-1800 nm were used to predict the internal quality of pears (Yunde Liu et al., 2007). The prediction results of Soluble Solid Content (SSC) and firmness were quite accurate and the root mean standard error of prediction (RMSEP) of SSC and firmness are 0.662 °Brix and 1.232 N respectively. Yongni Shao et al., (2007) reported the application of reflectance Vis/NIRS in range of 350-2500 nm to detect the quality of tomato such as fruit firmness (indicated by compression force and puncture force), soluble solids content and acidity. PCR and PLS are used for data analysis. The analyzed models had significant results: for

* Corresponding author, Tel.: 0-3435-1896 Ext 3526; Fax: 0-3428-1099; E-mail address: kraweekrawee@yahoo.com
 1,2,3 Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsuen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand.
 4 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology, Pathumthani, Thailand.
 5 Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsuen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand.

determining SSC with great accuracy, and Vis/NIRS in full spectral range (400-2350 nm) could be used to assess certain tomato quality.

This research was to determine the light property for separating coconut maturity.

II Materials and Method

1. Maturity measurement

The samples of Young coconut *Nanhom* were harvested from the same farm at Samutsongkram Province, Thailand. A 60 fruits of various mature stages were used. The volume of fruit was measured by the displacement method and then the specific weight (SG) was calculated.

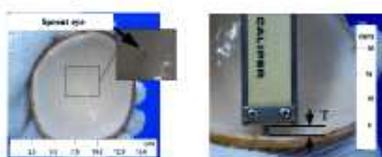


Fig. 1 (a) Sprout eye (b) Measurement of fresh thickness

Stages of maturity was verified by cut and overturn shell to find sprout eye on coconut flesh. The average flesh thickness (T) was measured by vernier caliper with 3 sampling at approximate radius of 1 cm around the sprout eye (Fig. 1)

2. Light property of Young coconut

The experiment included a spectra testing of 3 ridges (1', 2', 3') and 3 (1, 2, 3) faces of young coconut fruit (Figure 2). The distance between the stem-calyx to bottom of fruit, with approximate 2 cm out from stem and bottom, were split equally to 7 positions on curvature (Figure 2). Therefore, the total of measuring point on one fruit is 42 positions.



Fig. 2 Position and Dimension of young coconut

From Figure 3, the spectra testing consist of a 150 Watts of halogen lamp (1) Olympus 605020, the light was guided to the sample by the source fibers (2), and then received from the sample by lens (3) and the detector fibers (4) QP1000-2-UV/VIS. The angle between the incident light and the detector fiber was 90° and the distance from sample to both of fibers (2) and (4) were limited to 3 cm. The reflectance light from detector fiber was transformed, to digital signal, by USB2000 OCEAN OPTIC (5) and then the data were recorded by Computer software (Spectra suite OCEAN OPTIC). A white

Teflon[®] square rod was used as the optical reference standard for the system, since Teflon[®] had a very high reflectance.

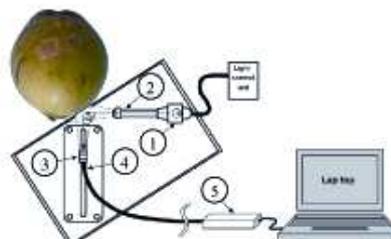


Fig.3 Schematic of spectra experiment

Signal was calculated by comparing the spectra reflected from the sample with the standard reference to R_R and then equation (1) (Xiaping, 2007) was used to transform R_R to Absorbance spectra (A_R):

$$A_R = \text{LOG}_e \left[\frac{1}{R_R} \right] \quad (1)$$

The root mean squares error of calibration (RMSEC) in equation (3) (Xiaping, 2007) was used to judge the success and accuracy of the prediction models. RMSEC are defined as follow:

$$\text{RMSEC} = \sqrt{\frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (2)$$

Where, \hat{y}_i - predicted value of the i -th observation; y_i - measured value of the i -th observation; n_c - number of observations in calibration set.

III Results and discussion

1. Maturity of Young coconut

The true and completed curves of absorbance spectra were obtained from the averaged of 3 ridges (Figure 5). Spectra from faces could not be used to analyze, because of roughed brown spots frequently occurring on faces area (Figure 4) and give the error and abnormal of spectra curve.



Fig. 4 Rough surface on young coconut

From Figure 5, the highest peak of spectra appeared at 2 points on the curve at range of 370-500 nm and 600-700 nm.

They are defined with $A_{max_{370-500}}$ and $A_{max_{600-700}}$ respectively. The young coconuts were classified into 3 groups of maturity stages by flesh thickness (Verakol, 2007) as IS = Immature Stage ($T < 1.75$ mm), MS = Mature Stage ($1.76\text{mm} \leq T \leq 3.80$ m), OS = Over mature Stage ($T > 3.81$ mm).

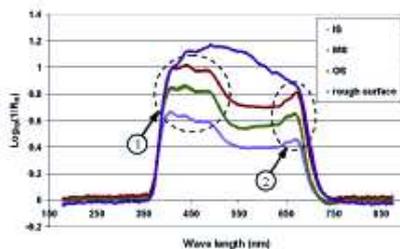


Fig. 5 Spectra of young coconut on position (1) and (2) = $A_{max_{370-500}}$, (2) = $A_{max_{600-700}}$ where IS = Immature Stage, MS = Mature Stage and OS = Over mature Stage

Characteristics of experiment sample are shown in table 1.

Table 1 Physical characteristic of Young coconut samples

State	Quantity	T (mm)	Dr (cm)	S.G.
IS	20	0.88±0.43	15.38±0.72	0.97±0.08
MS	24	2.67±0.63	14.93±0.86	0.96±0.08
OS	16	5.52±0.92	15.01±0.80	0.83±0.08

Remarks: The number behind ± is Standard deviation.

The value of $A_{max_{370-500}}$ (Table 2) were analyzed with Duncan multiple range test (DMRT) at significant difference, $p < 0.05$. Positions (2) to (7) were highly overlapped on maturity stage and $A_{max_{370-500}}$ in each stage of all position were overlapped too. The maturity stages could not be classified by $A_{max_{370-500}}$ measuring on only one position. However, the maturity stage classifying by light absorbance technique in production process probably to choose the position (1) since, this position give a lowest overlapped of stage and also have the maximum of difference value between each stages of maturity with the minimum Standard deviation too. And statistical analysis, by DMRT of $A_{max_{370-500}}$ on only position (1) gave the truth of 3 groups of maturity stages; IS, MS and OS at $p < 0.05$.

The Discriminant Analysis (DA) classification was calculated by using all of these parameters; Y_{max} (the highest peak of normalized reflectance curve, before transform to absorbance spectra), $A_{max_{370-500}}$, $A_{max_{600-700}}$ and S.G. The dependent variables and coefficient of classification function show in table 3 and 71.2% of cross-validated grouped cases correctly classified (table 4).

Table 2 Absorbance spectral from 3 ridges of young coconut, maturity stage and measurement positions.

Position	Maturity Stage	$A_{max_{370-500}}$	Difference
1	IS	0.8072±0.11 ^{ABC}	0.0805
	MS	0.8877±0.08 ^{CDDEF}	0.0771
	OS	0.9648±0.10 ^{DE}	
2	IS	0.8068±0.09 ^{ABC}	0.0587
	MS	0.8655±0.06 ^{CDDEF}	0.0478
	OS	0.9133±0.06 ^{EF}	
3	IS	0.7657±0.12 ^A	0.0633
	MS	0.8290±0.09 ^{ABCD}	0.0545
	OS	0.8835±0.05 ^{CDDEF}	
4	IS	0.7832±0.13 ^{AB}	0.1397
	MS	0.9229±0.09 ^{FGH}	0.0136
	OS	0.9366±0.08 ^{FGH}	
5	IS	0.8388±0.12 ^{ABCDE}	0.1343
	MS	0.9731±0.08 ^{HI}	-0.0795
	OS	0.8936±0.06 ^{DEFGH}	
6	IS	0.9154±0.10 ^{EF}	-0.0608
	MS	0.8546±0.22 ^{DEFGH}	0.0395
	OS	0.8942±0.06 ^{DEFGH}	
7	IS	0.8844±0.12 ^{CDDEF}	-0.0764
	MS	0.8080±0.19 ^{ABC}	0.1300
	OS	0.9380±0.06 ^{FGH}	

Remarks: 1. The number behind ± is Standard deviation.

2. Means with the same letter in the same column implies insignificant difference at $p < 0.05$

Table 3 Classification Function Coefficients

	GROUP		
	IS	MS	OS
Y_{max}	92.753	85.664	118.122
$A_{max_{370-500}}$	31.176	56.760	57.067
$A_{max_{600-700}}$	53.215	39.232	41.315
S.G.	176.377	176.813	146.397
Constant	-142.437	-151.193	-147.382

Remarks: Fisher's linear discriminant functions

The absolute of correlations in table 5, S.G. and Y_{max} were described by function 1 and $A_{max_{370-500}}$, $A_{min_{600-700}}$ were described by function 2 (correlation coefficient > 0.5 respectively). Graphical plot show the centroids of stage classification, by DA method were shown in Figure 6. number 1, 2 and 3 referred to IS, MS and OS respectively.

The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering
 "International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind", 2009.

Table 4 Classification results

Group	Predicted Group (%)	Total (%)			
		IS	MS	OS	
Original	IS	78.9	15.8	5.3	100.0
	MS	8.3	70.8	20.8	100.0
	OS	12.5	0.0	87.5	100.0
Cross-validated	IS	68.4	26.3	5.3	100.0
	MS	16.7	62.5	20.8	100.0
	OS	12.5	0.0	87.5	100.0

Remarks: In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.

Table 5 Structure Matrix

	Function	
	1	2
S.G	-.612(*)	.279
Ymax	.543(*)	-.023
AmAX ₇₅₀₋₅₀₀	.472	.718(*)
AmAX ₆₀₀₋₇₀₀	.375	.442(*)

Remarks: Largest absolute correlation between each variable and any discriminant function

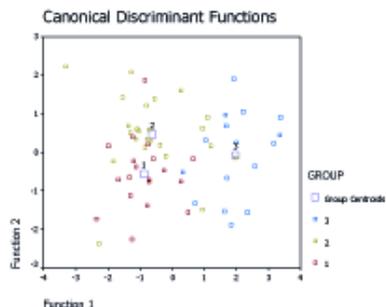


Fig.6 Classification of young coconut maturity stage with DA method

IV Conclusions

The performance of light in visible length was feasible for grading maturity of young coconut fruit. The proper position of light measurement is the topmost point closest to the stem on the ridge and clearly gives maturity differentiation. The associated absorbance for the immature, mature and over-mature was 0.806±0.11, 0.887±0.08, 0.966±0.10 respectively. Reuleaux diameter can be a good estimate representing the maximum and minimum diameters of the young coconut volume V. The orientation and the maturity significantly affected absorbance of light (370≤wavelength≤ 500nm) incident of young coconut fruit at p<0.05.

References

Anupun Terd Wongvorakul. **Frequency index as related to maturity stage of "Montong" durian**. 14 p. Journal of the National Research Council of Thailand. 30 (1997) Vol. 1/2: 25-38.

Bundit Jarimopas, Siwalak Pathavocrat Krawee Trocmnuk, Yuttana Ngamkeitkhajon. **Acoustic property tester of fruit**. Kasetsart Engineering Journal. 53(18)(2004):36-43.

Ngoprat Bamrungrak. 1993. **Major of Plants in Southern Thailand**. Bangkok: Pyramid Publishing Co.Ltd.

Virakul Meeklangsen. 2007. **Mechanical, Sound and Physiological Property of Young Coconut Fruit as Related to Maturity**. M.S. thesis. Agricultural Engineering Dept., Kasetsart University, Bangkok.

Xiaping Fu, Yibin Ying, Huishan Lu, Huirong Xu. **Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear**. Journal of Food Engineering 83 (2007) 317-323.

Yande Liu, Xingmiao Chen, Aiguo Ouyang. **Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry**. Food Science and Technology (2008) 1-6.

Yongui Shao, Yong He, Antihus H. Gomez, Annia G. Pereira, Zhongjun Qiu, Yun Zhang. **Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heatwave' (Lycopersicon esculentum) quality characteristics**. Journal of Food Engineering 81 (2007) 672-678.

การวิเคราะห์ความเสียหายเชิงกลของผลชมพู่เมื่อถูกคัดขนาดด้วยเครื่องจักรกล
Mechanical Damage Analysis of Mechanically Sized Java Apple Fruit

กระวี ศรีอำนาจ¹ บัณฑิต จริโนภาส¹ และ สักดา จันทร์ทอง¹
Krawee Treemnu¹ Bundit Jarimopas¹ and Sukda Junthong¹

Abstract

This research was to analyze the mechanical damage of java apple fruit mechanically sized by the diverging belt sizing machine (DBS). Methodology comprised determination of the fruit damage due to the diverging belt and measurement of damage reduction when using cushioning material. Three varieties was observed, i.e. Toonklao, Tubtimjan and Tongsamsri. Damage analysis by means of Duncan Multiple Range Test concerning three damage parameters, i.e. total damage percentage, percent damage of bruising/abrasion, percent damage of crack/cut was performed. Results showed that prevention of direct contact between a fruit could well protect the fruit from crack and cut. Application of 4 mm cushion could protect all kinds of damage to the java apple. No significant difference in damage was found between the mechanically sized fruit and the control fruit during storage. The damage of the mechanically sized fruit was significantly different to that manually sized fruit.

Keywords: Damage, Rose apple, Sizer

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะวิเคราะห์ความเสียหายเชิงกลของผลชมพู่ที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องกลคัดขนาดแบบ Diverging Belts, DBS วิธีการประกอบด้วยการศึกษาการเกิดความเสียหายจากสายพานคัดขนาด การลดความเสียหายด้วยวัสดุกันกระแทกและการศึกษาความเสียหายเมื่อทำการทดสอบแบบต่อเนื่อง โดยใช้ชมพู่พันธุ์ทูลเกล้า ทับทิมจันทร์และทองสามสีในการวิจัยประเมินความเสียหายด้วยค่าเปอร์เซ็นต์รอยขีดหรือลอก เปอร์เซ็นต์รอยแตกหรือบาดและเปอร์เซ็นต์ความเสียหายวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการDMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผลชมพู่กับผิวสายพาน DBS สามารถลดความเสียหายได้ โดยการนำ Stretch film หุ้มผลชมพู่ช่วยลดรอยบาดหรือแตกได้ดี การใช้วัสดุกันกระแทกหนา 2 mm ช่วยลดรอยลอกหรือขีดบ้างและการใช้วัสดุหนา 4 mm สามารถป้องกันการเสียหายทุกประเภทได้กับชมพู่ทุกผล ผลการทดลองเก็บรักษามผลชมพู่จากการคัดขนาดพบว่าไม่แตกต่างจากชมพู่ชุดควบคุม แต่เกิดความแตกต่างของความเสียหายระหว่างชมพู่ที่คัดด้วยเครื่องคัด DBS กับชมพู่ที่คัดด้วยคนอย่างชัดเจน

คำนำ

ชมพู่เป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ เพราะเป็นผลไม้ที่มีสีส้มสวยงามตามสายพันธุ์ มีกลิ่นหอม รสหวานและเนื้อกรอบ มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์สูง (บัณฑิตและสาวิกา, 2549) จัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ในปี พ.ศ. 2548 มีปริมาณการส่งออกถึง 93.70 ตัน (มูลค่า1,405.38 ล้านบาท) (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) การปลูก ชมพู่ยังได้รับความนิยมอย่างคั่งเนื่องเพราะขยายพันธุ์ได้ง่ายและเจริญเติบโตเร็ว โดยพันธุ์ที่นิยมบริโภค ได้แก่ พันธุ์ทูลเกล้า ทับทิมจันทร์และทองสามสี การใช้เครื่องจักรกลในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวและการกระทำเชิงกลพบว่า เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ ผลผลิตเสียคุณภาพ (Mohsenin, 1996) เช่นการใช้เครื่องคัดขนาด เครื่องบรรจุ บรรจุภัณฑ์และกระบวนการขนส่ง(บัณฑิต, 2549) ผลแอปเปิ้ลอาจเกิดการช้ำสูงถึง 93% หลังจากการขนส่งและ 91-95% เกิดจากการบรรจุใส่ถุง (Timm et al.,1989) ในประเทศจีนพบความเสียหายจากการขนส่งผักและผลไม้สดสูงมากกว่า 30 % (Zhang, 2000) สำหรับในประเทศไทยBundit jarimopas et al. (2008) ได้ทดสอบบรรจุภัณฑ์ขายปลีกมะขามหวานในปัจจุบันพบความเสียหายสูงถึง 56.7% และการคัดขนาดมังคุดด้วยเครื่องทำให้เกิดความเสียหายที่0.48% (Jarimopas et al., 2007) และมังคุดที่ขายส่งมีความเสียหายรวม (รอยแตก,ผิวแห้ง, มีวรุขระและความผิดปกติของเนื้อใน) ถึง 86% (Pushpaniksha et al., 2006) อย่างไรก็

¹ภาควิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน / ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140
² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kamphaengsaen / Postharvest Technology Innovation Center, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhon Pathom, 73140

ตามการตัดขนาดขนมปังในปัจจุบันต้องอาศัยแรงงานคนเป็นสำคัญ เพราะขนมปังเป็นผลไม้ที่บอบบาง ไรต่อความเสียหาย และซ้ำได้ง่ายโดยเฉพาะความเสียหายเชิงกลระหว่างการปฏิบัติ (Jarimopas et al., 2007) ในการขายส่งขนมปังทำให้เกิดความเสียหายเป็นรอยดกและซ้ำถึง 72.2% และ 123.3% ตามลำดับ (Toonsaengthong et al., 2006) จึงจำเป็นต้องใช้ผู้ที่ชำนาญทำการตัดขนาดด้วยความระมัดระวังซึ่งใช้เวลากับการปฏิบัติมาก สำหรับการตัดขนาดขนมปังด้วยเครื่องตัดแบบ diverging belt system, DBS ชนิด A (2550) พบว่าเกิดความเสียหายกับขนมปัง โดยเกิดรอยขาดและรอยดกมากที่สุด เนื่องจากผลขนมปังกระทบกับสายพานตัดโดยตรงและขนมปังที่เสียหายง่ายคือพันธุ์ทูลเกล้าเพราะมีความแน่นเนื้อต่ำ (บัณฑิตและสาวิกา, 2549)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเสียหายเชิงกลจากการตัดขนาดขนมปังด้วยเครื่องตัดแบบ DBS เพื่อต้องการที่จะลดความเสียหายดังกล่าวลงให้น้อยที่สุดหรือไม่เกิดความเสียหาย โดยศึกษากับขนมปังพันธุ์ทูลเกล้า ทั้งพิมพ์จันทร์และทองสามสี

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องตัดแบบ DBS มีความเหมาะสมต่อการตัดขนมปัง เนื่องจากผลขนมปังเป็นทรงวงรีคล้ายผลแพร์ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด, D_u เป็นตัวแปรในการตัดขนาด เนื่องจาก D_u มีความสัมพันธ์ที่ดีกับปริมาตรของผลขนมปัง (Chanida et al., 2007) เมื่อขนมปังถูกพาไปเคลื่อนที่ไปพร้อมสายพานตัดขนาดแล้ว ผลขนมปังจะถูกปล่อยให้ร่วงลงตามระยะทางที่ความกว้างของสายพานกว้างกว่า D_u ในระบบตัดขนมปังที่ทดสอบมีสายพานแนวขนานที่ใช้ป้อนขนมปังสู่สายพานตัด DBS ร่วมอยู่ด้วย ความเสียหายของผลขนมปังที่ผ่านการตัดแล้วถูกประเมิน (ชนิดา, 2550) จากเปอร์เซ็นต์รอยชำหรือดก (1) เปอร์เซ็นต์รอยแตกหรือรอยขาด (2) และเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (3) จากนั้นดำเนินการศึกษาด้วยวิธีการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์รอยชำหรือดก} = \frac{\text{พื้นที่รอยชำหรือรอยดกของผล}}{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของผล}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์รอยแตกหรือรอยขาด} = \frac{\text{ขนาดความยาวรอยแตกหรือรอยขาดทั้งหมด}}{\text{ความสูงขนมปังเฉลี่ย}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย} = \frac{\text{จำนวนผลที่เกิดความเสียหายทั้งหมด}}{\text{จำนวนผลขนมปังทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

1. การศึกษาการเกิดความเสียหายจากสายพานตัดขนาด

ใช้ขนมปังพันธุ์ทูลเกล้าเป็นชุดมีขนาดเล็ก(S)และใหญ่(L)อย่างละ 10 ผล ทดสอบที่ความเร็วสายพานตัด 7 14 และ 21 m/min สายพานป้อนเป็น 7 14 21 และ 29 m/min ทดสอบตัดขนาดแบบหุ้มผลด้วย Stretch film และแบบไม่หุ้มอย่างละ 5 ชุด

2. การลดความเสียหายด้วยวัสดุกันกระทบ

ใช้ขนมปังพันธุ์ทูลเกล้าเป็นชุดมีขนาด S กลาง(M)และ L ขนาดละ 38 ผล ใช้ความเร็วสายพานป้อนและตัดสูงสุดเป็น 29 m/min ตามลำดับ ทดสอบกับสายพานตัดที่ติดตั้งวัสดุกันกระทบหนา 2 และ 4 mm อย่างละ 5 ชุด

3. การศึกษาความเสียหายเมื่อทำการทดสอบแบบต่อเนื่อง

3.1 ใช้ขนมปังพันธุ์พิมพ์จันทร์และทองสามสีขนาด S M และ L ขนาดละ 30 ผล ใช้ความเร็วสายพานป้อนและตัดขนาดเป็น 20 m/min (เท่ากัน) ทดสอบกับสายพานตัดที่ติดตั้งวัสดุกันกระทบหนา 4 mm อย่างละ 5 ชุดต่อพันธุ์

3.2 ใช้ขนมปังพันธุ์ทองสามสีขนาดจำนวน 2 ชุด ชุดละ 46 kg ชุดแรกให้เกษตรกรตัดขนาดเป็น S M และ L อีกชุดตัดขนาดด้วยเครื่องที่ความเร็วสายพานป้อนและตัดขนาดเป็น 20 m/min (เท่ากัน)

การทดสอบข้อ 2. และ 3. สุ่มเก็บผลขนมปังจำนวน 60 ผลจากขนมปังที่ผ่านเครื่องตัดขนาดแล้วมาเก็บรักษาเปรียบเทียบกับขนมปังชุดควบคุมที่เริ่มต้นไม่มีความเสียหายไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน

ผลและวิจารณ์

ขนมปังมีลักษณะ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและน้ำหนักเมื่อแบ่งตามขนาดใหญ่ กลาง เล็ก ตามสายพันธุ์ได้เป็น 65.80 mm 77.13 mm 121.45 g, 60.66 mm 77.44 mm, 112.03 g, 55.69 mm 78.39 mm 99.83 g (ทองสามสี) ตามลำดับ และ 61.23 mm 76.48 mm 111.04 g, 57.10 mm 72.48 mm 95.73 g, 52.99 mm 71.96 mm 84.55 g (พิมพ์จันทร์) ตามลำดับ และ 60.27 mm 78.21 mm 105.02 g, 56.70 mm 76.06 mm 89.95 g, 54.36 mm 71.43 mm 75.79 g (ทูลเกล้า) ตามลำดับ ความเสียหายที่เกิดจากสายพานตัดขนาดพบว่าเกษตรกรหุ้มขนมปังด้วย Stretch film สามารถลดการเกิดรอยดกได้ดีกว่าการไม่หุ้มฟิล์มทุกความเร็วที่มีการทดสอบ (Figure 1) หรือการป้องกันผลขนมปังสัมผัสกับสายพานตัดขนาดโดยตรงมีความ

สำคัญต่อการเกิดความเสียหายของผลสุกและเมื่อทดสอบการคัดขนาดกับสายพานคัดที่บิวต์กันกระแทกหนา 2 mm (Table 1) พบว่าไม่ทำให้เกิดความเสียหายจากการบาด แรกและซ้ำ แต่เกิดการดกเป็นบางผลเท่านั้น จึงทำให้ค่า C.V. ในการทดสอบสูงมากและความเสียหายนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของผลโดยชมพู่ผลใหญ่จะเสียหายได้ง่ายและมากกว่าชมพู่ผลเล็ก

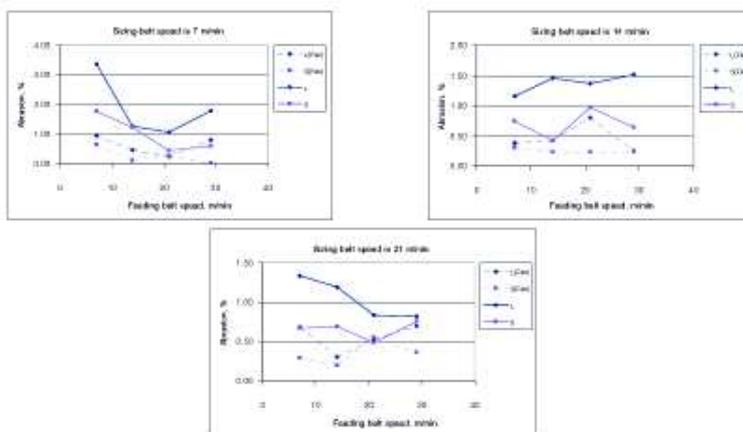
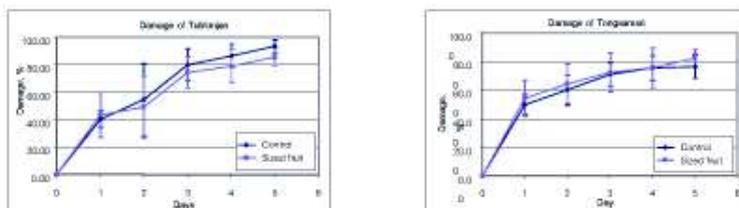


Figure 1 Java apple fruit (Toonkiao cultivar): L(Film), S(Film) are warped by film and L, S are usually fruit. All Java apples as shown in (a) (b) and (c) are sized at belt speeds of 7, 14 and 21 m/min respectively.

Table 1 Damage percentage of Toonkiao cultivar Java apple fruit.

Size	Abrasion, %	Crack or cut, %	Damage, %
L	0.04 (322.45)	0.00 (0)	15.79
M	0.02 (387.42)	0.00 (0)	7.89
S	0.03 (599.54)	0.00 (0)	5.26

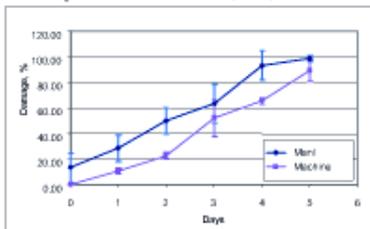
Remarks The number in () is Coefficient of Variation



Remarks The symbols \bar{I} and \bar{I} are band of Variation of mechanically sized Java apple fruit and Controlled.

Figure 2 Damaged of Java apple fruit were mechanically sized: (a) Tubtmjan cultivar (b) Tongsamrri cultivar

ในการทดสอบแบบคั่นเนื่องกับชมพู่ทองสามสีจำนวน 46kg พบว่า Ratio ขนาด S : M : L เป็น 1.00 : 0.99 : 0.57 เปรียบเทียบการคัดขนาดด้วยคนเมื่อวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการ DMRT แล้วพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันนี้ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในระยะเวลา 5 วัน (Figure 3) ความเสียหายที่เกิดจากคนมีมากกว่าการใช้เครื่องคัดขนาด



Remarks The symbols \square and \circ are band of Variation of mechanically sized Java apple fruit and man sized.

Figure 3 Damaged of Java apple fruit were mechanically sized, Tongsamsri cultivar.

เมื่อทดสอบกับสายพานคัดที่ปรับคัดที่กระแทกหนา 4 mm พบว่าผลชมพู่ทุกผลไม่เกิดความเสียหายทุกประเภท (รอยดง รอยบาดหรือแตกและรอยขีด) จากนั้นเมื่อทำการทดสอบแบบต่อเนื่องและเก็บรักษาผลชมพู่ที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 91% เป็นเวลา 5 วัน (Figure 2) พบว่าความเสียหายของชมพู่ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการ DMRT

สรุป

การป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงของผลชมพู่กับผิวสายพานคัดขนาดช่วยลดความเสียหายได้โดยการใช้ Stretch film ช่วยลดรอยบาดหรือแตกได้ดี การใช้วัสดุที่กระแทกหนา 2 mm ช่วยลดรอยดงหรือขีดบ้างและการใช้วัสดุหนา 4 mm สามารถป้องกันความเสียหายได้ทุกประเภท ผลการทดลองเก็บรักษาผลชมพู่จากการคัดขนาดพบว่าไม่แตกต่างจากชมพู่สด ความคม แต่เกิดความแตกต่างของชมพู่ที่คัดด้วยเครื่องกับที่คัดด้วยคนอย่างชัดเจน

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ชนิดา บุคค. 2550. การพัฒนาเครื่องคัดขนาดชมพู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน, นครปฐม.
 บัณฑิต จีวินภาส, รศ.ดร. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรระจุกินท์ และเชื้อมบรรจุมผลไม้. ครั้งที่ 1. ฟ้างชันส่วนจำกัคต้นมีที่บับลิจ
 ชิง, กรุงเทพฯ.
 บัณฑิต จีวินภาส และสาวิกา สาภากร. 2549. สมบัติเชิงกลของผลชมพู่ไทย. การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549.สมาคมวิศวกรรมเกษตร
 แห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ.2549. จังหวัดมหาสารคาม.
 http://www.oae.go.th. 2549. สถิติการส่งออกผลผลิตเกษตร. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
 Bundit Jarimopas, Siam Toomsaenglong, Sher Paul Singh, Jay Singh, and Rangsinee Sothomvit. 2007. Development of Wholesale
 Packaging to Prevent Post-Harvest Damage to Rose Apples. Journal of Applied Packaging Research, Vol.2,
 No.1-September 2007.
 Bundit Jarimopas dolhalhai Rachanukroa Sher Paul Singh Rungsinee and Sothomvit Post-harvest damage and performance
 comparison of sweet tamarind packaging. Journal of Food Engineering 88(2008): 193-201.
 Chanida Bupata, Bundit Jarimopas, and Sakda Chentong. 2007. Conditions Influencing Design of A Java Apple Fruit Sizing Machine.
 TSAE International conference, Khonkaen, Thailand.
 Jarimopas, B., S. Toomsaenglong and C. Inprasit. 2007. Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine. Journal of Food
 Engineering 79(2007):745-751.
 Mohsenin, N.N., 1996. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Publishers, Australia, 891p.
 Pushpaniksha, P., Singh, S.P., Jarimopas, B., Janhirun, A., 2006. Postharvest losses and performance comparison of wholesale
 packaging of mangosteen fruit under simulated vibration. In: Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on
 Packaging, 3-5 October, Tokyo, pp. 285-289.
 Toomsaenglong, S., Singh, S.P., Jarimopas, B., 2006. Post-harvest loss and development of wholesale packaging of fresh rose
 apples. In: Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on Packaging, 3-5 October, Tokyo, pp. 280-284.
 Zhang, M., 2000. Status and development of processing technology of fruit and vegetable in China. Food Mach, 76, 4-6 (in
 Chinese).

การทดสอบเครื่องคัดขนาดชมพูแบบไร้ความเสียหาย Test of Zero Damage Java Fruit Sizer

กระวี ศรีจันทร์^{1,3}, ศิวลักษณ์ ปุริวิรัตน์¹, อรุณพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล^{1,3} และ มนุศักดิ์ จานทอง²
Krawee Treeamnu^{1,3}, Siwalak Pathaveerat^{1,3}, Anupun Terdwongworakul^{1,3} and Manuskul Janthong²

Abstract

The purpose of this research was to test and evaluate the efficiency of sizing machine. The sizing machine was 598 mm X 1430 mm X 520 mm steel and feeding machine was 390 mm X 1520 mm X 765 mm. Diverging belt sizing machine were powered by two 187 Watts 220 Volts 50 Hz electric motors, gear reducer and pulley. In operation, java fruit were sat on the carrier of feeding belt station that fed to the sizing belt station through cloth sack. The fruit slowly dropped down and lightly contacted the sizing belt. The horizontal travel and divergence of the sizing belt, and fruit weight together caused the fruit to move down to the aperture where the fruit was measured and released to receiving tray. Performance test indicated that velocity and inclination angle of the sizing belt, feeding belt velocity and fruit orientation significantly affected the sizing performance at $p < 0.05$. The optimum conditions for continuous mechanical sizing depended on variety. The optimum sizing performance was characterized by error of 10.8-16.5 % and the throughput capacity of 149.7-195.1 kg/hr. Manual sizing of the exported java apple featured 27.9% error, 13.3% damage and 107.2 kg/hr capacity. The sizing machine of java apple could be operated without the observed damage.

Key word: Java apple, sizing, diverging belt

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องคัดขนาดชมพูแบบไร้ความเสียหาย เครื่องคัดขนาดและเครื่องป้อนเป็นโครงสร้างเหล็ก ขนาด 598 มม x 1,430 มม x 520 มม และ ขนาด 390 มม x 1,520 มม x 765 มม ตามลำดับ เครื่องคัดขนาดเป็นแบบสายพานต่าง ขั้วด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 187 Watt 220 Volts 50 Hz ผ่านชุดเฟืองและล้อสายพาน ในการทำงาน ผลชมพูจะถูกวางบนสายพานป้อนที่จาลำเลียงชมพูลงสู่สายพานคัดขนาดผ่านถุงผ้าเพื่อลดความเร็วและลดการกระแทกกับสายพานคัดขนาด จากนั้นผลชมพูจะถูกพาให้เคลื่อนไปในแนวขนานพร้อมกับสายพานคัดขนาดจะถ่างออกจนเมื่อขนาดของผลน้อยกว่าระยะสัมผัสกับสายพานคัดขนาด ผลจึงร่วงหล่นจากสายพานลงสู่ถาดรองรับตามขนาดที่กำหนดไว้ต่อไป การทดสอบสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดพบว่า มุมของสายพานคัดขนาด, ความเร็วของสายพานป้อนและสายพานคัดขนาด และรูปแบบการวางตัวของผลชมพู มีผลต่อสมรรถนะของการคัดขนาดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สภาวะที่ดีที่สุดของการคัดขนาดขึ้นอยู่กับพันธุ์ของชมพู สมรรถนะการคัดขนาดสูงสุดของเครื่องพบว่า เกิดการคัดขนาด 10.8-16.5% และมีอัตราการคัดขนาด 149.7-195.1 kg/hr และไม่สังเกตพบความเสียหายของชมพูจากเครื่องคัดขนาด ในขณะที่การคัดขนาดด้วยคนเกิดความผิดพลาด 27.9% มีอัตราการคัดขนาด 107.2 kg/hr และเกิดความเสียหาย 13.3%

คำสำคัญ ชมพู, เครื่องคัดขนาด, สายพานต่าง

คำนำ

ชมพูเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั้งภายในและนอกประเทศ เนื่องจาก เป็นผลไม้ที่มีรสหวานกรอบ สีสันสวยงามและอุดมไปด้วยสารอาหาร โดยในปี 2549 มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 1.7 พันล้านบาท ภายหลังจากเก็บเกี่ยวผลไม้ การคัดขนาดเป็นกิจกรรมสำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจาก ก) ช่วยให้ขายได้ราคาสูงขึ้นมากกว่าการขายละขนาดกัน ข) ช่วยดึงดูดความสนใจของผู้ซื้อ และ ค) ช่วยให้ออกแบบบรรจุภัณฑ์ได้ง่ายและเหมาะสม (บัณฑิต, 2550 และ peleg, 1995) ชมพูเป็นผลไม้ที่บอบบาง ไร้ต่อความเสียหายและซ้ำได้ง่ายโดยเฉพาะความเสียหายเชิงกลในการปฏิบัติ (Jarimopas et al., 2007) ในการขาย

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73150

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kampeangsaan, Kasetsart University Kampeangsaan campus, Nakompathem 73150

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ทุ่งครุ 12110

⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhatkai University of Technology Tanyaburi, Pathombani 12110

⁵ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีเชิงการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

⁶Postharvest Technology Innovation Center, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

ส่งชมพบว่าเกิดความเสียหายเป็นรอยถลอกและชำรุดถึง 72.2% และ 123.3% ตามลำดับ (Toonsaengthong et al., 2006) จึงจำเป็นต้องใช้ผู้ชำนาญคัดขนาดด้วยความระมัดระวัง ซึ่งใช้เวลากับการปฏิบัติมาก ให้อัตราการทำงานต่ำ มีการคัดขนาด และทำให้เกิดความเสียหายสูง การคัดขนาดทางกลใช้หลักการของสายพาน, สายพานกับแผ่นกั้นและสายพานต่าง ได้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเครื่องคัดขนาดผลไม้หลายชนิด Jarimopas et al. (2007) ได้ใช้สายพานและแผ่นกั้นสร้างเครื่องคัดขนาดมังคุด (3เกรด: เล็ก กลาง ใหญ่) ได้อัตราการทำงาน 1,026 kg/hr เปรียบเทียบการคัดขนาด 23% การใช้สายพานต่างคัดมังคุด (บดขีด และคณะ. 2542) พบว่าสามารถคัดได้ที่อัตรา 1,100 kg/hr ที่ประสิทธิภาพการคัดขนาด 80% ซึ่งเครื่องเหล่านี้ยังไม่มีความเสียหายเมื่อใช้คัดชมพู่ Bupata et al. (2007) ได้รายงานถึงขนาดของผลชมพู่ว่าแปรผันตามน้ำหนักของผลและความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลกับการคัดขนาดได้รายงานโดย Sarakan et al. (2007) แม้ว่าจะเป็นผลไม้ที่มีความนิ่มและมีศักยภาพในการส่งออกสูง แต่กลับพบว่าปัญหาความเสียหายและค่าจ้างแรงงานที่สูง ทำให้เกิดความต้องการเครื่องคัดขนาดชมพู่ขึ้น ซึ่งเครื่องคัดขนาดที่วางไปยังไม่สามารถใช้กับชมพู่ได้ งานวิจัยนี้มุ่งที่จะออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องคัดขนาดชมพู่สุดที่มีความผิดพลาดน้อยและเกิดความเสียหายต่ำที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องคัดขนาดผลชมพู่

เป็นระบบสายพานต่างซึ่งเป็นกลไกอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน การทำงานของเครื่อง (Figure 1) ผลชมพู่ถูกวางบน U-shape rubber โดยให้ทางขับเคลื่อนที่ด้านหลัง ชมพู่จะเคลื่อนที่ไปและตกลงสู่ถุงผ้าที่ไม่เพียงแต่รองรับผลชมพู่ในแนวตั้งเท่านั้น แต่ยังช่วยลดความเร็วของการตกและทำให้ผลชมพู่สัมผัสอย่างนุ่มนวลกับผิวสายพานคัดขนาดและวางตัวในแนวตั้งอย่างถูกต้องอีกด้วย จากนั้นสายพานคัดขนาดจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับถาดออกกว้างขึ้น (Figure 2) จนทำให้ผลชมพู่ตกลงสู่ถาดรองรับที่ถูกระงับขนาดด้วยแผ่นกั้นต่อไป Figure 2b แสดงภาพด้านบนของสายพานต่างเครื่องคัดขนาดชมพู่ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขนาด (S, M, L)

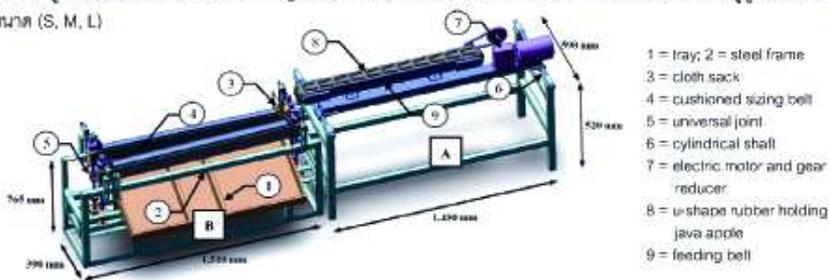


Figure 1 Schematic diagram of java fruit sizing machine

สายพานคัดขนาดนี้มีความยาว 110 cm มุมถ่าง β มีค่าเป็น 0.29° , 9.55° และ 0.34° สำหรับชมพู่พันธุ์ ชูลเกล้า, ทับทิมจันทร์และทองสามสี (Bupata et al. 2007) มุม α คือมุมเอียงของสายพานที่รองรับผลชมพู่ไว้ โดยมุม α และ ระยะแผ่นกั้นแบ่งขนาด คำนวณจากสมการของ Peleg (1985) Figure 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องป้อนชมพู่ (A) และเครื่องคัดขนาด (B) เครื่องป้อนติดตั้งเพลาลำหรับปรับเลือนสายพานป้อนไว้ที่ด้านหลัง สายพานป้อนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 0.25 hp ที่สามารถปรับความเร็วได้ เครื่องคัดขนาดประกอบด้วยสายพานคัดขนาด 2 เส้น, ถาดรับผลชมพู่และแผ่นกั้นแบ่งขนาดทั้งหมดถูกบุด้วยโฟมยางหนา 4 mm สายพานนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 220V 50Hz 1,450rpm และสามารถปรับความเร็วรอบได้ ที่ส่วนรับชมพู่ของเครื่องคัดขนาดติดตั้งถุงผ้าเพื่อควบคุมผลชมพู่ให้ตกอย่างนิ่มนวลและได้แนวในแนวตั้ง

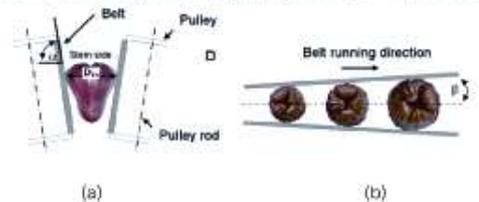


Figure 2 (a) D_n and sizing mechanism (b) sizing on traveling of sizing belt

การทดสอบประสิทธิภาพการคัดขนาด

2.1 ทดสอบหามุม α เอียงของสายพานคัดขนาด (3 ค่า; 75°, 80°, 85°) และความเร็วสายพานคัด (3 ค่า; 10, 20, 30 m/min) ที่เหมาะสม โดยป้อนชมพู่ด้วยความเร็วสายพานป้อนคงที่ 15m/min กับชมพู่ทั้ง 3 พันธุ์ (ทูลเกล้า, หับทิมจันทร์และทองสามสี) ประเมินสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดด้วยค่า E_s , Q และ \bar{C}_x ตามสมการของ Peleg (1985)

2.2 การหาความเร็วของสายพานป้อนที่เหมาะสม ปรับตั้งมุม α และความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมกับชมพู่แต่ละพันธุ์ (ผลจากหัวข้อ 2.1) แล้วทดสอบป้อนชมพู่ด้วยความเร็วสายพานป้อนต่างกัน (4 ค่า; 5, 15, 20, 25m/min) ทำซ้ำ 5 ซ้ำ

2.3 การวางผลชมพู่ 2 แบบ (แบบสุ่มและแบบวางให้ด้าน D_m เคลื่อนไปสัมผัสกับสายพานคัดขนาด) ปรับตั้งเครื่องด้วยมุม, ความเร็วสายพานคัดขนาดและความเร็วสายพานป้อนที่เหมาะสมกับชมพู่แต่ละพันธุ์ (ผลจากหัวข้อ 2.1 และ 2.2) ทำซ้ำ 5 ซ้ำ สุ่มชมพู่ที่ผ่านเครื่องคัดขนาดแล้วจำนวน 90 ผล นำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 12 ชม. แล้วตรวจสอบความเสียหายด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (จำนวนผลเสีย/ผลทั้งหมด)

2.4 ทดสอบคัดต่อเนื่องกับชมพู่พันธุ์ทั้ง 3 พันธุ์ พันธุ์ละ 500 ผล ประเมินสมรรถนะการคัดขนาดเปรียบเทียบกับคัดขนาดด้วยแรงงานคน

ผล

1. ความเร็วที่เหมาะสมและมุมเอียงของสายพานคัดขนาด ได้คำนวณเอียงและความเร็วของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมกับชมพู่แต่ละพันธุ์เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเจือปนของขนาด, \bar{C}_x ที่ต่ำที่สุดได้ดัง Table 2

Table 1 Effects of velocity and inclination angle of the sizing belt on sizing machine

variety	Inclination angle (degree)	Sizing belt velocity (m/min)	\bar{C}_x (%)	E_s (%)
Toonklao	85	20	23.30±4.19	79.74±5.21
Tubtimjan	75	20	12.13±3.39	92.77±2.63
Tongsamsri	80	20	18.91±3.26	88.22±7.64

Remark \bar{C}_x = Mean contamination ratio or error; E_s = Sizing efficiency

2. ความเร็วที่เหมาะสมของสายพานป้อน ภายหลังจากปรับตั้งเครื่องคัดขนาดให้มีมุมและความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสม พบว่าความเร็วสายพานป้อนของชมพู่ทุกพันธุ์เป็น 15m/min โดยจะให้ค่า \bar{C}_x ต่ำที่สุดและ E_s ที่ดีสำหรับพันธุ์ทูลเกล้า, หับทิมจันทร์และทองสามสีเป็น 11.35±2.16, 92.26±1.99; 24.24±2.40, 86.68±5.80 และ 20.58±10.26, 80.93±12.08 ตามลำดับ

3. การวางผลชมพู่แบบให้ D_m เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสายพานคัดขนาดจะช่วยลด \bar{C}_x ได้เกือบเท่าตัว แต่ทำให้อัตราการคัดขนาดลดลงเช่นกัน (Table 2)

Table 2 Effect of fruit orientation on sizing machine performance of java apple fruit

Variety	Fruit orientation	Q (kg/hr)	\bar{C}_x (%)	E_s (%)
Toonklao	A	263.92±11.30 ^a	17.21±2.09 ^b	93.52±3.00
	B	179.87±4.90 ^a	9.84±1.93 ^b	93.62±1.83
Tubtimjan	A	333.09±28.51 ^b	6.47±2.46 ^b	91.23±10.41 ^a
	B	214.22±8.37 ^a	3.16±1.07 ^a	97.94±0.97 ^a
Tongsamsri	A	326.70±33.49 ^b	14.26±3.69 ^b	88.63±5.30 ^a
	B	187.44±5.69 ^a	8.66±1.80 ^b	91.51±2.70 ^b

Remark A = Random placement; B = Maximum diameter placement

Figure 3 แสดงการกระจายของเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของชมพู่ที่คัดขนาดด้วยเครื่องเปรียบเทียบกับชมพู่ชุดควบคุม(ไม่ถูกคัด) เปรียบเทียบการเก็บรักษาที่ 15°C ตามระยะเวลา ซึ่งพบว่าชมพู่ทั้ง 3 พันธุ์ ไม่เกิดความเสียหายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับชมพู่ชุดควบคุม

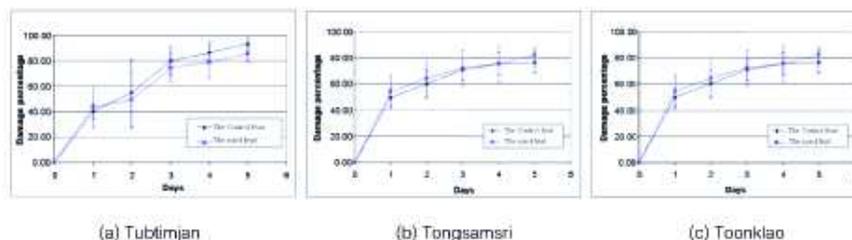


Figure 3 Damage comparison of java fruit with regard to storage time

4. การทดสอบเครื่องคัดขนาดแบบต่อเนื่อง

สมรรถนะการคัดต่อเนื่อง C_h and Q เมื่อคัดรวมพันธุ์ทับทิมจันทร์, ทองสามสีและพลูเก๊าเป็น 12.2%, 195.1 kg/hr; 16.5%, 181.7 kg/hr and 10.8%, 149.7 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งค่า C_h จะสูงมากขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ Q จะลดต่ำกว่าข้อ 3 เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีอัตราส่วนขนาดไม่เท่ากันโดยทับทิมจันทร์เป็น 0.2: 1: 0.24, ทองสามสีเป็น 1: 0.99: 0.57 และพลูเก๊าเป็น 0.48: 1.00: 0.33 (เล็ก: กลาง: ใหญ่) การคัดขนาดด้วยคนให้ Q เป็น 107.2 kg/hr, C_h เป็น 27.9% และเกิดความเสียหายเชิงกลถึง 13.3% (Treeamruk et al., 2008)

วิจารณ์และสรุป

การทดสอบแสดงให้เห็นว่ามุม ความเร็วของสายพานคัดและสายพานป้อน และรูปแบบการวางผลรวมพูนสายพานป้อน มีผลต่อสมรรถนะการคัดที่ $p < 0.05$ สภาพวะที่ดีที่สุดเมื่อทดสอบคัดต่อเนื่องขึ้นกับพันธุ์ชมพู ค่าสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดให้ เปอร์เซ็นต์การคัดคัด 10.8-16.5 % อัตราการคัด 149.7-195.1 kg/hr โดยไม่สร้างความเสียหายแก่ผลพูนอย่างสังเกตเห็น ในขณะที่การคัดขนาดด้วยคนเกิด เปอร์เซ็นต์การคัดคัด 27.9% ความเสียหาย 13.3% และให้อัตราการคัด 107.2 kg/hr

คำขอบคุณ

ด้วยความรุดถึง ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จิวโมภาส ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Jarimopas, B., S. Toomsaenglong, S.P. Singh, J. Singh and R. Sothomvit. 2007. Development of Wholesale Packaging to Prevent Post-Harvest Damage to Rose Apples. *Journal of Applied Packaging Research* 2:27-44.
- Buapata, C., B. Jarimopas, and S. Chantong. 2007. Conditions influencing design of a java apple fruit sizing machine. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology*, 22-24 January 2007, Khon Kaen.
- Jarimopas, B., K. Kongwatsanon, C. Rangdang, and R. Yamashita. 1988. Mangosteen sizing machine *Kasetsart J. (Nat. Sci. Suppl.)* 22: 91-96.
- Jarimopas, B., P. Siratchatapong, S. Sukharom, S. Sihavong, and Y.Goto. 1992. Durian sizing machine. *Kasetsart J. (Nat. Sci. Suppl.)* 26: 65-74.
- Jarimopas, B. 2006. *Postharvest Sorting Machinery, Packaging and Packing House of Fruit*. Edition 1st. Funny Publishing Association Co. Ltd., Bangkok.
- Jarimopas, B., S. Toomsaenglong and C. Inprasit. 2007. Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine. *Journal of Food Engineering* 79: 745-751.
- Peleg, K. 1985. *Produce Handling, Packaging and Distribution*, AVI. Pub. Co. Inc. Connecticut. 626 p.
- Sarekan, S., B. Jarimopas and S. Chantong. 2007. Textural properties of Thai java apple fruits. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology*, 22-24 January 2007, Khon Kaen.
- Treeamruk, K., B. Jarimopas and S. Jantong. 2008. Mechanical damage analysis of mechanically sized java apple fruit. In *Proceeding of the 6th National Conference on Postharvest Technology and Post Production*, organized by Postharvest Technology Innovation Center at Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 14-15 August 2008.



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 ประจำปี 2554
31 มีนาคม - 1 เมษายน 2554 ณ ซลจันท์ พัทธยาวิธาน จ. ชลบุรี



การลดความเสียหายของชมพูในเครื่องคัดขนาด Reducing Damage of Rose Apple in Sizing Machine

กระวี ตรีอำนรรค์¹, ศิวลัคน์ ปฐวีรัตน์², อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล³ และ มนุศักดิ์ จานทอง³
Krawee Treamnuk¹, Siwalak Pathaveerat², Anupun Terdwongworakul³ and Manusak Janthong³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะลดความเสียหายเชิงกลของผลชมพูที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดแบบสายพานถ่างโดยใช้วัสดุกันกระแทกบางชนิดบนสายพานคัดขนาด พร้อมทั้งหาสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่อง ทำการทดสอบเบื้องต้นด้วยชมพูพันธุ์ทูลเกล้าและประเมินความเสียหายด้วยค่า เปอร์เซ็นต์รอยขีดหรือถลอก เปอร์เซ็นต์รอยแตกหรือบาดและเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย จากนั้นทำการทดสอบต่อเนื่องกับชมพูพันธุ์ทูลเกล้าและทองสามสี ประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องด้วยอัตราคัดขนาดและเปอร์เซ็นต์การคัดผิด วิเคราะห์ผลด้วย วิธีการDMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการใช้วัสดุกันกระแทกหนา 2 mm ผนึกบนสายพานช่วยลดรอยถลอกหรือขีดได้บ้างและการใช้วัสดุหนา 4 mm สามารถป้องกันความเสียหายทุกประเภทได้กับชมพูทุกผล สภาวะที่ดีที่สุดของการคัดขนาดขึ้นอยู่กับพันธุ์ของชมพู สมรรถนะการคัดขนาดสูงสุดของเครื่องพบว่า เกิดการคัดผิดขนาด 10.8-16.5% และมีอัตราคัดขนาด 149.7-195.1 kg/hr และไม่สังเกตพบความเสียหายของชมพูจากเครื่องคัดขนาดในขณะที่ การคัดขนาดด้วยคนเกิดความผิดพลาด 27.9% มีอัตราการทำงาน 107.2 kg/hr และเกิดความเสียหาย 13.3%

คำสำคัญ: ความเสียหายเชิงกล, เครื่องคัดขนาด, ชมพู

ABSTRACT

This research objective was to 1) reduce the mechanical damage of rose apple that was sized by diverging belt-type machine 2) determine the optimum operating condition of the sizing machine. Cushioning materials mounted on the belt were used to modify the sizing belt. Methodology comprised pre-determination of cushion was carried out with Toonkiao variety to observe fruit damage. Mechanical damage was evaluated by abrasion percentage, crack or cut percentage and damage percentage. After pre-determination, Toonkiao and Thongsamsri varieties were used to test the performance of sizing in continuous operation. Sizing capacity and percent of error were evaluated the performance of machine. Results showed that the 2 mm of cushion could well protect the fruit from crack and cut. Application of 4 mm cushion could protect all kinds of damage. Performance test indicated that the optimum conditions for continuous mechanical sizing depended on variety. The optimum sizing performance was characterized by error of 10.8-16.5 % and the throughput capacity of 149.7-195.1 kg/hr. Manual sizing of the exported rose apple featured 27.9% error, 13.3% damage and 107.2 kg/hr capacity. The sizing machine of rose apple could be operated without the observed damage.

Keywords: Mechanical damage, Sizing machine, Rose apple

บทนำ

ชมพูเป็นผลไม้ที่มีรสหวานกรอบ สีสันสวยงามและอุดมไปด้วยสารอาหาร มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์สูง

(บัณฑิตและสาริกา, 2549) ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั้งภายในและนอกประเทศ โดยในปี 2549 มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 1.7 พันล้านบาท โดยพันธุ์ที่นิยมบริโภค ได้แก่พันธุ์

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Prathom tani, 12110

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

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Prathom tani, 12110

ทูลเกล้าฯ ทับทิมจันทร์และทองสามสี การปลูกหมุ่ยังได้รับความนิยมาอย่างต่อเนื่องเพราะขยายพันธุ์ได้ง่าย เจริญเติบโตและเก็บผลผลิตได้เร็ว

ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลไม้นี้ การคัดขนาดเป็นกิจกรรมสำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจาก ก) ช่วยให้ขายได้ราคาสูงขึ้นมากกว่าการขายคละขนาดกัน ข) ช่วยดึงดูดความสนใจของผู้ซื้อ และ ค) ช่วยให้ออกแบบบรรจุภัณฑ์ได้ง่ายและเหมาะสม (บัณฑิต, 2549 และ Peleg, 1985) การใช้เครื่องจักรกลในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวและการกระทำเชิงกลพบว่าเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ ผลผลิตเสียคุณภาพ (Mohsenin, 1996) เช่นการใช้เครื่องคัดขนาดเครื่องบรรจุ บรรจุภัณฑ์และกระบวนการขนส่ง (บัณฑิต, 2549) ผลแอปเปิ้ลอาจเกิดการชำรุดถึง 93% หลังจากการขนส่งและ 91-95% เกิดจากการบรรจุใส่ถุง ในประเทศจีนพบความเสียหายจากการขนส่งผักและผลไม้สดสูงมากกว่า 30% (Zhang, 2000) สำหรับในประเทศ Bundit jarimopas et al. (2008) ได้ทดสอบบรรจุภัณฑ์ขายปลีกมะขามหวานในปัจจุบันพบความเสียหายสูงถึง 56.7% และการคัดขนาดมุ้งคูดด้วยเครื่องทำให้เกิดความเสียหายที่ 0.48% (Jarimopas et al., 2007) และมุ้งคูดที่ขายส่งมีความเสียหายรวม (รอยแตก, ผิวขรุขระ, ผิวขรุขระและความผิดปกติของเนื้อใน) ถึง 86% (Pushpariksha et al., 2006) หมุ่เป็นผลไม้ที่บอบบาง ไวต่อความเสียหายและชำรุดได้ง่าย โดยเฉพาะความเสียหายเชิงกลในการปฏิบัติ (Jarimopas et al., 2007) ในการขายส่งหมุ่พบว่าเกิดความเสียหายเป็นรอยถลอกและชำรุดถึง 72.2% และ 123.3% ตามลำดับ (Toonsengthong et al., 2006) จึงจำเป็นต้องใช้ผู้ชำนาญคัดขนาดด้วยความระมัดระวัง ซึ่งใช้เวลากับการปฏิบัติมากให้อัตราการทำงานต่ำ มีการคัดขนาดและทำให้เกิดความเสียหายสูง การคัดขนาดทางกลใช้หลักการของสายพาน, สายพานกับแผ่นกันและสายพานถ่าง ได้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเครื่องคัดขนาดผลไม้หลายชนิด Jarimopas et al. (2007) ได้ใช้สายพานและแผ่นกันสร้างเครื่องคัดขนาดมุ้งคูด (3 เกรด: เล็ก กลาง ใหญ่) ได้อัตราการทำงาน 1,026 kg/hr เปอร์เซ็นต์การคัดผิด 23% การใช้สายพานถ่างคัดมุ้งคูด (บัณฑิตและคณะ, 2542) พบว่าสามารถคัดได้ที่อัตรา 1,100 kg/hr ที่ประสิทธิภาพการคัดขนาด 80% Bupata et al. (2007) ได้รายงานถึงขนาดของผลหมุ่ว่าแปรผันตามน้ำหนักของผลและความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลกับการคัดขนาดได้รายงานโดย Sarakan et al. (2007) สำหรับการคัดขนาดหมุ่ด้วยเครื่องคัดแบบ diverging belt system, DBS ชนิด A (2550) พบว่าเกิดความเสียหายกับหมุ่ โดยเกิดรอยขาดและรอยถลอกมากที่สุด เนื่องจากผลหมุ่ตกกระทบกับสายพานคัดโดยตรง

และหมุ่ที่เสียหายคือพันธุ์ทูลเกล้าฯ เพราะมีความแน่นเนื้อต่ำ (บัณฑิตและสวริกา, 2549)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเสียหายเชิงกลจากการคัดขนาดหมุ่ด้วยเครื่องคัดแบบ DBS เพื่อต้องการที่จะลดความเสียหายดังกล่าวลงพร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องคัดขนาดดังกล่าว โดยศึกษากับหมุ่พันธุ์ทูลเกล้าฯ และทองสามสี

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องคัดขนาดหมุ่

สายพานถ่าง (Diverging Belt) เป็นกลไกที่มีความเหมาะสมต่อการคัดผลหมุ่ เนื่องจากผลหมุ่เป็นทรงกรวยคล้ายผลแพร์ ทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด, D_m เป็นตัวแปรในการคัดขนาด เนื่องจาก D_m มีความสัมพันธ์ที่ดีกับปริมาตรของผลหมุ่ (Chanida et al., 2007) สายพานคัดขนาดนี้มีความยาว 110 cm มุมถ่าง β มีค่าเป็น 0.29° , 9.55° และ 0.34° สำหรับหมุ่พันธุ์ทูลเกล้าฯ, ทับทิมจันทร์และทองสามสี (Bupata et al. 2007) มุม α คือมุมเอียงของสายพานที่รองรับผลหมุ่ไว้ โดยมุม α และ ระยะแผ่นกันแบ่งขนาด คำนวณจากสมการของ Peleg (1985) การทำงานของเครื่อง (ภาพที่ 1) ผลหมุ่ถูกวางบน U-shape rubber โดยให้ทางขับผลขึ้นไปด้านหน้า หมุ่จะเคลื่อนที่ไปและตกลงสู่ถุงที่ไม่ว่าเพียงแต่รองรับผลหมุ่ในแนวตั้งเท่านั้น แต่ยังช่วยลดความเร็วของการตกและทำให้ผลหมุ่สัมผัสอย่างนุ่มนวลกับผิวสายพานคัดขนาดและวางตัวในแนวตั้งอย่างถูกต้องอีกด้วย จากนั้นสายพานคัดขนาดจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับถ่างออกกว้างขึ้น (ภาพที่ 2) จนทำให้ผลหมุ่ตกลงสู่ถาดรองรับที่ถ่างแบ่งขนาดด้วยแผ่นกันต่อไป

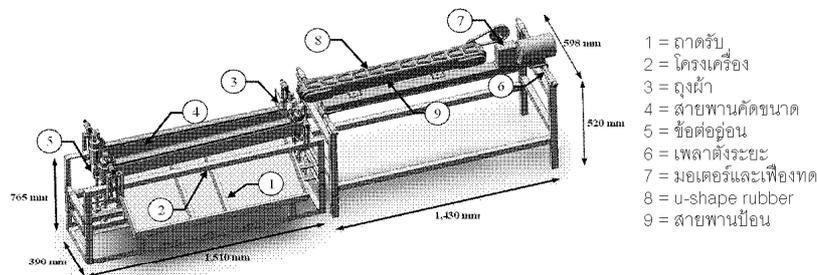
การทดสอบเบื้องต้น

ความเสียหายของผลหมุ่ที่ผ่านการคัดแล้วถูกประเมิน (ชนิด A, 2550) จากเปอร์เซ็นต์รอยชำหรือถลอก (1) เปอร์เซ็นต์รอยแตกหรือรอยขาด (2) และเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (3) จากนั้นดำเนินการศึกษาด้วยวิธีการดังนี้

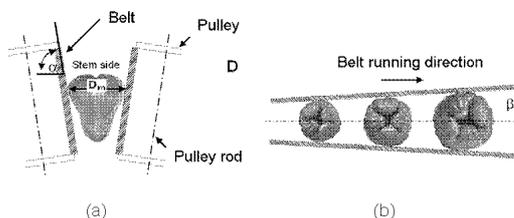
$$\% \text{ รอยชำ, ถลอก} = \frac{\text{พื้นที่รอยชำ, ถลอกของผล}}{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของผล}} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ รอยแตก, ขาด} = \frac{\text{ความยาวรอยแตก, ขาดทั้งหมด}}{\text{ความสูงหมุ่ทั้งผล}} \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ ความเสียหาย} = \frac{\text{จำนวนผลที่เกิดความเสียหายทั้งหมด}}{\text{จำนวนผลหมุ่ทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$



ภาพที่ 1 เครื่องคัดขนาดขมพู



ภาพที่ 2 (a) D_m และกลไกการคัดขนาด (b) การถูกคัดขนาดขณะสายพานเคลื่อนที่ไป

ใช้ขมพูพันธุ์ทุลเกล้าเป็นชุดมีขนาดเล็ก (S) กลาง (M) และใหญ่ (L) ขนาดละ 38 ผล ใช้ความเร็วสายพานป้อนและสายพานคัดขนาดสูงสุดเป็น 29 m/min และ 21 m/min ตามลำดับ ทดสอบกับสายพานคัดที่ตีด้รสดุ๊กันกระแทกหนา 2 และ 4 mm อย่างละ 5 ชุด

การทดสอบแบบต่อเนื่อง

ใช้ขมพูพันธุ์ทุลเกล้าและทองสามสีที่คัดเลือกเฉพาะผลที่ไร้ตำหนิจัดเป็นชุด ประกอบด้วยผลขนาด L, M และ S ขนาดละ 30 ผล

1.1 มุมเอียงของสายพานคัดขนาด (α) ที่เหมาะสม

ปรับตั้งมุม α (3 ค่า; 75°, 80°, 85°) และความเร็วสายพานคัด (3 ค่า; 10, 20, 30 m/min) ที่เหมาะสมโดยป้อนขมพูด้วยความเร็วสายพานป้อนคงที่ 15m/min กับ ขมพูพันธุ์ทุลเกล้าและทองสามสี ประเมินสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดด้วยค่า Ew, Q และ C_g ตามสมการของ Peleg (1985) ทำซ้ำจำนวน 5 การทดลอง

1.2 ความเร็วของสายพานป้อนที่เหมาะสม

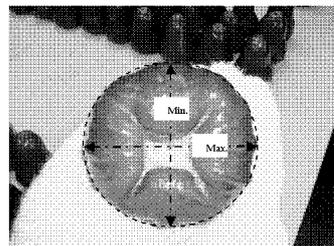
ปรับตั้งมุม α และความเร็วสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมกับขมพูแต่ละพันธุ์ (ผลจากหัวข้อ 2.1) แล้วทดสอบป้อนขมพูที่ความเร็วสายพานป้อนต่างกัน (4 ค่า; 5, 15, 20, 25m/min) ทำซ้ำ 5 การทดลอง

1.3 รูปแบบการวางผลขมพูที่เหมาะสม

ทดสอบการวางป้อนผลให้ด้าน D_m (ภาพที่ 3 เส้น Max) เคลื่อนไปสัมผัสกับสายพานคัดขนาดเพื่อใช้การคัดขนาดถูกต้องมากที่สุด เปรียบเทียบกับการวางป้อนแบบสุ่ม ทำซ้ำ 5 การทดลอง

1.4 การคัดขนาดแบบต่อเนื่อง

ทดสอบคัดกับขมพูพันธุ์ทองสามสี 500 ผล ประเมินสมรรถนะการคัดขนาดเปรียบเทียบกับคัดขนาดด้วยแรงงานคน สุ่มขมพูที่ผ่านเครื่องคัดขนาดแล้วจำนวน 60 ผล นำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 12 ชม. แล้วตรวจสอบความเสียหายด้วยค่าจากสมการที่ (1) และ (3) เปรียบเทียบกับตัวอย่างขมพูชุดควบคุมซึ่งไม่มีตำหนิ จำนวนเท่ากัน



ภาพที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (Max.)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดสอบเบื้องต้น

ชมพู่พันธุ์ทุลเกล้ามีลักษณะ เมื่อแบ่งผลออกเป็น ขนาดใหญ่ กลาง เล็ก ได้ตั้งตารางที่ 1 เมื่อใช้วัสดุกัน กระแทกหน้า 2 mm ติดกับสายพานคัดขนาด เพื่อป้องกัน ความเสียหาย คำนวณความเสียหายตามสมการที่ (1) (2) และ (3) พบว่าไม่ทำให้เกิดความเสียหายจากการ บาด แตะและซ้ำ แต่เกิดการถลอกเป็นบางผล (ตารางที่ 2) จึง ทำให้ค่า C.V. ในการทดลองสูงมากและความเสียหายนี้ยัง ขึ้นอยู่กับขนาดของผลโดยชมพู่ผลใหญ่จะเสียหายได้ง่าย และมากกว่าชมพู่ผลเล็ก

ตารางที่ 1 ขนาดเฉลี่ยชมพู่พันธุ์ทุลเกล้าที่ใช้ทดสอบ

Size	Diameter, mm	Height, mm	Weight, g
L	60.07 (1.81)	73.44 (4.82)	96.86 (6.31)
M	57.78 (1.02)	72.30 (5.47)	88.38 (6.77)
S	54.85 (2.63)	70.64 (6.18)	80.70 (7.72)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ Coefficient of Variation

ตารางที่ 2 ความเสียหายที่เกิดกับชมพู่พันธุ์ทุลเกล้า

Size	Abrasion, %	Crack or cut, %	Damage, %
L	0.04 (322.45)	0.00 (0)	15.79
M	0.02 (387.42)	0.00 (0)	7.89
S	0.03 (599.54)	0.00 (0)	5.26

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ Coefficient of Variation

เมื่อทดสอบกับสายพานคัดที่ปรับวัสดุกันกระแทก หน้า 4 mm พบว่าผลชมพู่ทุกผลไม่เกิดความเสียหายทุก ประเภท (รอยถลอก รอยบาดหรือแตกและรอยซ้ำ)

การทดสอบแบบต่อเนื่อง

ค่ามุมเอียงและความเร็วของสายพานคัดขนาดที่เหมาะสมกับชมพู่พันธุ์ทุลเกล้าและทองสามสี พิจารณา จากเปอร์เซ็นต์การคัดผิด (C_r) ที่ต่ำที่สุด แสดงได้ดัง ตารางที่ 3

ความเร็วที่เหมาะสมของสายพานป้อน ภายหลังจากปรับตั้งเครื่องคัดขนาดให้มีมุมและความเร็วสายพาน คัดขนาดที่เหมาะสม พบว่าความเร็วสายพานป้อนของ ชมพู่ทุกพันธุ์เป็น 15m/min โดยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ C_r ต่ำ ที่สุดและเปอร์เซ็นต์ E_w ที่ดีสำหรับพันธุ์ทุลเกล้า และทอง สามสี คือ $11.35 \pm 2.16, 92.26 \pm 1.99$ กับ $20.58 \pm 10.26, 80.93 \pm 12.08$ ตามลำดับ

ตารางที่ 3 มุมเอียง, α และความเร็วสายพานคัดขนาด

variety	α (degree)	Sizing belt velocity (m/min)	\bar{C}_r *	E_w *
Toonklao	85	20	23.30 (4.19)	79.74 (5.21)
Tongsamsri	80	20	18.91 (3.26)	88.22 (7.64)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ Coefficient of Variation

* C_r = Mean contamination ratio or error;

E_w = Sizing efficiency

สำหรับการวางผลชมพู่แบบ B แบบให้ D_m เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสายพานคัดขนาด (ตารางที่ 4) จะ ช่วยลด C_r ได้เกือบเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับการวางแบบ สุ่ม (A) แต่ก็ทำให้อัตราการคัดขนาด (Q) ลดลงเช่นกัน

ตารางที่ 4 ผลของรูปแบบการวางชมพู่ต่อการคัดขนาด

Variety	orientation *	Q (kg/hr)	\bar{C}_r (%)	E_w (%)
Toonklao	A	263.92 (11.30 ^a)	17.21 (2.09 ^b)	93.52 (3.00 ^a)
	B	179.87 (4.90 ^a)	9.84 (1.93 ^a)	93.62 (1.83 ^a)
Tongsamsri	A	326.70 (33.49 ^b)	14.26 (3.69 ^b)	88.63 (5.30 ^b)
	B	187.44 (5.69 ^a)	8.66 (1.80 ^a)	91.51 (2.70 ^b)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บคือ Coefficient of Variation

* A = Random placement; B = Maximum diameter placement

สมรรถนะการคัดต่อเนื่อง \bar{C}_r และอัตราการ ทำงาน (Q) เมื่อคัดชมพู่พันธุ์ ทุลเกล้าและทองสามสีมีค่า เป็น 10.8%, 149.7 kg/hr และ 16.5%, 181.7 kg/hr ตาม ลำดับ ซึ่งค่า C_r จะสูงมากขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ Q จะลด ต่ำลงกว่าในการทดสอบ orientation เนื่องจากตัวอย่างที่ ใช้ทดสอบการทำงานแบบต่อเนื่องมีอัตราส่วนขนาดไม่ เท่ากันโดย ทองสามสีมีค่าเป็น 1: 0.99: 0.57 และทุลเกล้า เป็น 0.48: 1.00: 0.33 (เล็ก: กลาง: ใหญ่) ซึ่งต่างจากการ ทดสอบที่ผ่านมา ที่ใช้อัตราส่วนขนาดคงที่ โดยที่การคัด ขนาดด้วยคนให้ Q เป็น 107.2 kg/hr, \bar{C}_r เป็น 27.9% และเกิดความเสียหายเชิงกลถึง 13.3% (Treeamnuak et al., 2008)

ในการประเมินความเสียหาย ทำโดยคำนวณเปอร์เซ็นต์ตามสมการที่ (1) และ (3) จากนั้นแบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับที่ 1 – ไม่ปรากฏความเสียหายหรือรอยชำรุด ระดับที่ 2 - เปอร์เซ็นต์รอยชำรุดน้อยกว่า 0.5% และระดับที่ 3 – เปอร์เซ็นต์รอยชำรุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5% ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเสียหายของชมพูหลังการคัดขนาด

Variety	Level of damage	Control set		Sized fruit	
		รอยชำ (%)	ความเสียหาย (%)	รอยชำ (%)	ความเสียหาย (%)
Toonkiao	1	74.44	-	65.56	-
	2	25.56	0.12(0.09)	34.44	0.09(0.04)
	3	-	-	-	-
Tongsamsri	1	36.67	-	65.56	-
	2	61.11	0.13(0.10)	32.22	0.14(0.11)
	3	2.22	0.71(0.12)	2.22	0.94(0.26)

พบว่าความเสียหายของชมพูที่ถูกคัดขนาดเมื่อเก็บรักษาไว้นาน 12 ชั่วโมง ที่ 15°C สำหรับพันธุ์ทุลเกล้า อยู่ในระดับ 1 – 2 และมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม ในพันธุ์ทองสามสีเกิดความเสียหายในระดับ 3 น้อยมาก ค่าที่แสดงในระดับ 1 คือ ไม่สังเกตเห็นความเสียหายของผลชมพู ซึ่งไม่แตกต่างกับชุดควบคุมเช่นกัน

สรุป

การใช้วัสดุกันกระแทกหนา 2 mm ช่วยลดรอยถลอกหรือชำรุดบ้างและการใช้วัสดุหนา 4 mm สามารถป้องกันความเสียหายได้ทุกประเภท การทดสอบแสดงให้เห็นว่ามุม ความเร็วของสายพานคัดและสายพานป้อน และรูปแบบการวางผลชมพูบนสายพานป้อน มีผลต่อสมรรถนะการคัดที่ $p < 0.05$ สมรรถนะที่ดีที่สุดเมื่อทดสอบคัดต่อเนื่องขึ้นกับพันธุ์ชมพู ค่าสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดให้ เปอร์เซ็นต์การคัดคัด 10.8-16.5 % อัตราการคัด 149.7-195.1 kg/hr โดยไม่สร้างความเสียหายแก่ชมพูอย่างสังเกตเห็นได้ ในขณะที่การคัดขนาดด้วยคนเกิดเปอร์เซ็นต์การคัดคัด 27.9% ความเสียหาย 13.3% และให้อัตราการคัด 107.2 kg/hr

คำขอขอบคุณ

ด้วยความระลึกถึง ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จริโมภาส ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวหน่วยงานร่วมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Chanida Bupata. 2550. การพัฒนาเครื่องคัดขนาดชมพู วิทยานิพนธ์ปริญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน, นครปฐม.
- บัณฑิต จริโมภาส, รศ.ดร. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุผลไม้. ครั้งที่ 1. ทางหุ้นส่วนจำกัดพินิตบิลดิซิ่ง, กรุงเทพฯ.
- บัณฑิต จริโมภาส และสาวิกา สารการ. 2549. สมบัติเชิงกลของผลชมพูไทย. การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ.2549, จังหวัดมหาสารคาม.
- Bundit Jarimopas dolhathai Rachanukroa Sher Paul Singh Rungsinee and Sothornvit Post-harvest damage and performance comparison of sweet tamarind packaging. *Journal of Food Engineering* 88(2008): 193-201.
- Bupata, C., Jarimopas, B. and Chantong, S. 2007. Conditions influencing design of a java apple fruit sizing machine. *In Proceedings of the International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology*, 22-24 January 2007, Khon Kaen.
- Chanida Bupata, Bundit Jarimopas. and Sakda Chantong. 2007. Conditions Influencing Design of A Java Apple Fruit Sizing Machine. *TSAE International conference*, Khonkaen, Thailand.
- Jarimopas, B., S. Toomsaengtong and C. Inprasit. 2007. Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine. *Journal of Food Engineering* 79(2007):745-751.
- Mohsenin, N.N., 1996. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Publishers, Australia, 891p.
- Peleg, K. 1985. *Produce Handling, Packaging and Distribution*, AVI. Pub. Co. Inc. Connecticut. 625 p.
- Pushpariksha, P., Singh, S.P., Jarimopas, B., Janhirun, A., 2006. Postharvest losses and performance comparison of wholesale packaging of mangosteen fruit

- under simulated vibration. In: Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on Packaging, 3–5 October, Tokyo, pp. 285–289.
- Toonsaengthong, S., Singh, S.P., Jarimopas, B., 2006. Post-harvest loss and development of wholesale packaging of fresh rose apples. In: Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on Packaging, 3–5 October, Tokyo, pp. 280–284.
- Treeamnuk, K., Jarimopas, B. and Jantong, S. 2008. Mechanical damage analysis of mechanically sized java apple fruit. *Proceeding of the 6 th National Conference on Postharvest Technology and Post Production*, organized by Postharvest Technology Innovation Center at Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 14-15 August 2008.
- Zhang, M., 2000. Status and development of processing technology of fruit and vegetable in China. *Food Mach.* 76, 4–6 (in Chinese).

การใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux เพื่อพยากรณ์ปริมาตรและความถ่วงจำเพาะของมะพร้าวอ่อนด้วยเทคนิค
MLR
Reuleaux Diameter in the Prediction of Volume and Specific Gravity of Young Coconut with MLR
Technique

กระวี ตรีอำนรรค¹, ศิวลักษณ์ ปรุวิรัตน์¹, อนุปันต์ เทอดคงศรีวรกุล¹ และ มนุศักดิ์ จาบทอง²
Krawee Treeamnuk¹, Siwalak Pathaveerat¹, Anupun Terdwongworakul¹ and Manusak Janthong²

Abstract

This research aims to study mathematical equations to predict in volume and specific gravity of young coconut fruit in each maturity states. The equations were created from Reuleaux diameter with Multiple Linear Regression, MLR. The two types of equation were created, the first was created from only Reuleaux diameter and the other was created from Reuleaux diameter and height of young coconut fruit. The results shown that the later equation has ability to predict the fruit volume in each and whole maturity state very well ($R^2=0.91$). The predicted value of volume was used to calculate specific gravity of young coconut fruit and found that the calculated specific gravity was good agree with experimental value ($R^2=0.82$, RMSEC=0.0383). This non-destructive technique can be applied to evaluated maturity states of young coconut fruit and reduce process of operation form traditional water displacement method.

Key words: Reuleaux diameter, predicting equation, specific gravity

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการพยากรณ์ปริมาตรและความถ่วงจำเพาะของผลมะพร้าวอ่อนในแต่ละวัยจากเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux ด้วยเทคนิค multiple linear regression (MLR) สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายปริมาตรผลมะพร้าวอ่อนถูกสร้างขึ้นสองแบบคือ สมการที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เฉพาะค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux และสมการที่ได้จากค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux ร่วมกับความสูงของผลมะพร้าวอ่อนจากการศึกษาพบว่าสมการที่สร้างจากเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux ร่วมกับความสูงของผลมะพร้าวมีความสามารถในการพยากรณ์ปริมาตรผลมะพร้าวอ่อนได้อย่างดีเยี่ยม ($R^2=0.91$) ทั้งแบบผลวัยและแยกวัย และเมื่อนำค่าปริมาตรที่ได้มาคำนวณร่วมกับน้ำหนักผลของมะพร้าวพบที่สามารถพยากรณ์ค่าความถ่วงจำเพาะได้ดี ($R^2=0.82$, RMSEC=0.0383) เมื่อนำวิธีการประเมินวัยมะพร้าวอ่อนด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลายไปปฏิบัติในภาคการผลิตแล้ว การพยากรณ์ค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux แทนการหาคำนวณจากวิธีการแทนที่น้ำ สามารถลดขั้นตอนการปฏิบัติและเวลาลงได้อย่างมาก

คำสำคัญ : เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux, สมการพยากรณ์, ความถ่วงจำเพาะ

คำนำ

มะพร้าวอ่อนเป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคกันทั่วไปทั้งตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ โดยเฉพาะพันธุ์น้ำหอมเนื่องจากน้ำหนักมีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย ซึ่งไม่มีในมะพร้าวอ่อนจากประเทศอื่น (สุพจน์, 2543) เป็นไม้ผลที่มีศักยภาพในการส่งออกสูง ในปี 2550 มีมูลค่าการส่งออกรวม 353.45 ล้านดอลลาร์ (กรมการค้าต่างประเทศ, 2550) ปัญหาส่วนหนึ่งในการผลิตคือการจำแนกวัยและคุณภาพของมะพร้าวอ่อนเพราะผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้จะกระทบระยะการเจริญเติบโตและระดับคุณภาพกัน ส่งผลต่อมาตรฐานการผลิตมะพร้าวอ่อนและทำให้สูญเสียมูลค่าหรืออาจถูกปฏิเสธผลผลิตจากประเทศคู่ค้าเมื่อ

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73150

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kampeangsean, Kasetsart University, Kampeangsean Campus, Nakhon Pathom 73150

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Tanyaburi, Pathumtani 12110

ส่งออกไปแล้วได้ การใช้ดัชนีความบรูณ์ (maturity index) ได้แก่การนับอายุ การสังเกตสี รูปร่าง ขนาด และความถ่วงจำเพาะ (SG) สามารถจำแนกรั้วของผลิตผลเกษตรได้ดี (จิ่งแท้, 2544) ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นจึงเป็นตัวแปรคุณลักษณะทางกายภาพที่สำคัญประการหนึ่ง โดยสามารถใช้เป็นตัวแปรในการจำแนกรั้วของมะพร้าวอ่อนได้ (Treeamnuak, 2009) การหาปริมาตรและ SG โดยปกติจะใช้วิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (บัณฑิต, 2545) สมบัติทางกายภาพที่สำคัญอีกประการคือ เส้นผ่านศูนย์กลางผลซึ่งถูกใช้เป็นตัวแปรในการคัดขนาดและคุณภาพผลผลิต (กระวี และคณะ, 2552) ภาพตัดขวางของผลมะพร้าวมีความคล้ายคลึงกับสามเหลี่ยมด้านโค้ง (Reuleaux triangle) และเส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux เป็นตัวแปรหนึ่งที่ถูกใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตแบบสามเหลี่ยมด้านโค้งดังกล่าว (Smith S, 1993)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะหาขนาดปริมาตรและ SG ของผลมะพร้าวอ่อน โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux เป็นตัวแปรในการทำนาย

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การวัดมิติของผลมะพร้าวอ่อน

ดำเนินการทดสอบ ที่ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ กำแพงแสน โดยใช้ผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมจากสวนอ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสงคราม รั้ว immature stage (IS), mature stage (MS) และ over mature stage (OS) รั้วละ 20 ผล ประเมินรั้วด้วยการวัดความหนาเนื้อ, T ที่ระยะ 1 cm รอบตานิ่ (Figure 1(a)) ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Figure 1(b)) (Treeamnuak, 2009) โดย ; IS: $T < 1.75$ mm, MS: $1.76\text{mm} \leq T \leq 3.80$ mm และ OS: $T > 3.81$ mm (Meeklangsen, 2007) วัดความสูง (h) เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux (Dr) ทั้ง 3 เส้น คือ Dr_1, Dr_2, Dr_3 เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแต่ละผล (Figure 2)

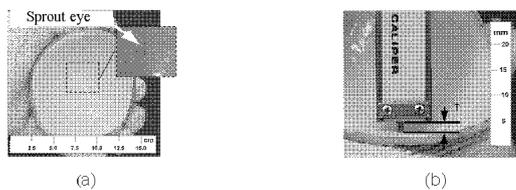


Figure 1 (a) Sprout eye (b) Measurement of fresh thickness

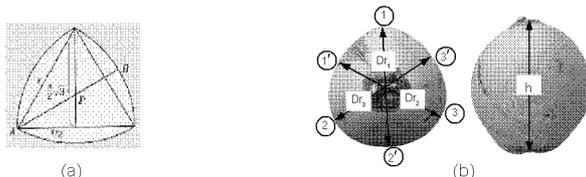


Figure 2 (a) Reuleaux distance (AB) (b) Measurement positions and length on young coconut fruit

2. การวัดปริมาตรและความถ่วงจำเพาะ (SG)

ด้วยวิธีการแทนที่น้ำตามความสัมพันธ์ eq(1)

$$SG = \text{Weight in air} / \text{Weight in water} \tag{1}$$

นำค่า Dr และ H ไปสร้างสมการพยากรณ์ด้วยเทคนิค multiple linear regression (MLR) เพื่อทำนายปริมาตรและค่า SG ต่อไป

ผลการทดลอง

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการพยากรณ์ปริมาตรของผลมะพร้าวอ่อนในแต่ละวัยแสดงใน Table 1

Table 1 Prediction models for young coconut volume

Model	Reuleaux Dia., Dr (cm)	Height, h (cm)	Constant
Model 1	291.795	76.404	-3859.25
Model 2	307.839	0	-2743.42

และความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่พยากรณ์ต่อค่าที่วัดได้จริงของปริมาตรผลแสดงใน Figure 3

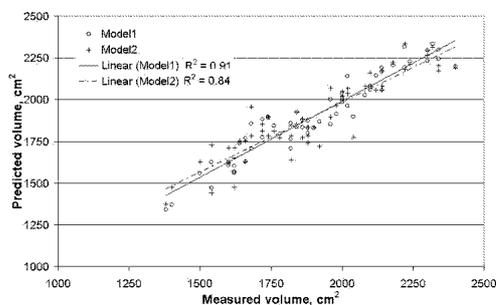


Figure 3 Predicted volume and measured volume of young coconut

Model 1 มีความคลาดเคลื่อนในการทำนายต่ำกว่า Model 2 ในทุกวัยที่ทดสอบ (Table 2) และสามารถทำนายปริมาตรได้ดีขึ้นในช่วงวัย mature stage ในวัย over mature stage พบว่า Model 2 ให้ความแม่นยำต่ำลง ซึ่งเป็นไปได้ว่า การพัฒนาของมะพร้าวจากวัย MS ไปสู่วัย OS เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux ของผลอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ผลมะพร้าวอาจมีการเพิ่มขึ้นของความสูง (h) เพียงอย่างเดียว ทำให้ Model 1 ที่มีค่า h เป็นตัวแปรด้วยสามารถพยากรณ์ได้ดีกว่า Model 2

Table 2 Statistics of validation of young coconut volume between model 1 and model 2

Stage	Model 1		Model 2	
	R ²	RMSEC	R ²	RMSEC
IS	0.86	93.8152	0.88	94.0097
MS	0.94	66.3422	0.90	86.0633
OS	0.92	66.8797	0.73	131.2470
Total	0.91	76.4046	0.83	102.6180

จาก Table 3 เมื่อนำค่าปริมาตรที่พยากรณ์ได้มาคำนวณเป็นความถ่วงจำเพาะ SG พบว่า Model 1 ให้การพยากรณ์รวมที่ดีกว่า Model 2 โดยที่พยากรณ์ในวัย over mature ได้ดีที่สุด (R²=0.90) นอกจากนี้ยังให้ความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าเมื่อพิจารณาจากค่า RMSEC และความสัมพันธ์ของค่าพยากรณ์กับค่า SG จริง แสดงใน Figure 4

Table 3 Statistics of validation of young coconut specific weight between model 1 and model 2

Stage	Model 1		Model 2	
	R ²	RMSEC	R ²	RMSEC
IS	0.49	0.0475	0.55	0.0461
MS	0.78	0.0354	0.63	0.9585
OS	0.90	0.0290	0.56	0.8364
Total	0.82	0.0383	0.70	0.0507

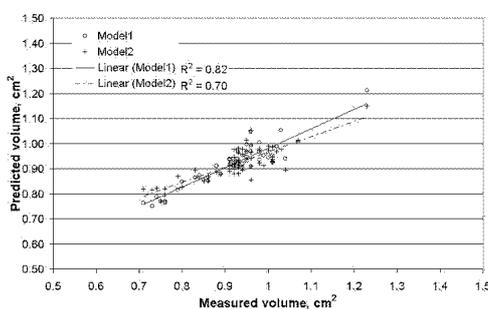


Figure 4 Predicted SG and measured SG of young coconut

สรุป

การใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง Reuleaux ร่วมกับความสูงของผลสร้างเป็นสมการด้วยเทคนิค MLR สามารถพยากรณ์ ปริมาตรผลมะพร้าวอ่อนได้อย่างดีเยี่ยม ($R^2=0.91$, $RMSEC=76.4046$) ทั้งแบบคละวัยและแยกวัย และเมื่อนำค่าปริมาตรที่ พยากรณ์ได้มาคำนวณร่วมกับน้ำหนักผลของมะพร้าวพบจำสามารถพยากรณ์ค่าความถ่วงจำเพาะได้ดี ($R^2=0.82$, $RMSEC=0.0383$)

คำขอบคุณ

ด้วยความระลึกถึง ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต จริโนภาส ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว หน่วยงานร่วมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมการค้าต่างประเทศ. 2550. สถิติการส่งออก - นำเข้า. แหล่งที่มา: <http://www.dft.go.th>. วันที่เข้าถึงข้อมูล 17 กันยายน 2552.
- กระวี ศรีอำรรค, ศิวลักษณ์ ปุสุวีรัตน์, อนุพันธ์ เทอดวงค์สุวรรณ และมนูศักดิ์ จานทอง. 2552. การทดสอบเครื่องคัดขนาดชมพูแบบไร้ความเสียหาย. สัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 7. 19-20 สิงหาคม 2552. จ.กระบี่.
- จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2544. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 396น.
- บัณฑิต จริโนภาส. 2545. ลมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร ภาค1: ทุบทุก. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 161น.
- สุพจน์ ตั้งจิตพร. 2543. มะพร้าวน้ำหนัก. วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีชลบุรี วิทยาลัยการศึกษาระบบทวิศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, ชลบุรี. 366 น.
- Meeklangsen, V. 2007. Mechanical, Sound and Physiological Property of Young Coconut Fruit as Related to Maturity. M.S. Thesis. Agricultural Engineering Dept., Kasetsart University, Bangkok.
- Smith S. 1993. Drilling Square Holes. The Mathematics Teacher, 86 (7): 579-583.
- Treeamuk, K., Jarimopas, B., Pathaveerat, S., Janthong, M. and Jiwunuwong, S. 2009. Maturity grading of fresh young coconut fruit based on light property. In Proceedings of the 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering. 1-3 April 2009, Nakhon Ratchasima.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายกระวี ตรีอำนรรค
เกิดวันที่	25 กรกฎาคม พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	นครปฐม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ใน สถาบันอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่