



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การซ้ำของเปลือกมังคุดและเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระเชิงกล

Mechanical Bruising of Mangosteen Rind and Young Coconut Husk

นามผู้วิจัย นายอุดมศักดิ์ กิจทวี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การซ้ำของเปลือกมังคุดและเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระเชิงกล

Mechanical Bruising of Mangosteen Rind and Young Coconut Husk

โดย

นายอุดมศักดิ์ กิจทวี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2554

อุดมศักดิ์ กิจทวี 2554: การซ้ำของเปลือกมังคุดและเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระ
เชิงกล ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D. 111 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลของเปลือกมังคุดแห้งภายใต้ภาระเชิงกล
และศึกษาการซ้ำและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กันของผลมะพร้าวอ่อน ภายใต้ภาระเชิงกล

การใช้ตัวแปรเชิงกลได้แก่ ความแน่นเนื้อ (อัตราส่วนแรงต่อการเปลี่ยนรูป) และดัชนี
ความแน่นเนื้อ (อัตราส่วนความเร่งสูงสุดต่อเวลากระแทกสัมพัทธ์ที่สมนัยกัน) ประเมินผลมังคุดที่
ถูกกดด้วยแผ่นแบนแข็งที่ติดตั้งกับเครื่อง Universal Testing Machine (Instron 5569) และ
กระทำกระแทกด้วยหัวกระแทก โดยใช้ปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัยได้แก่ ก) ภาระ 6 ระดับ (100, 80,
60, 40, 20 และ 0 % ของแรงแตก ข) ระยะเจริญเติบโตของผลมังคุด 2 ระยะ (สีเขียวและสีม่วง
ดำ) ค) จำนวนวันเก็บรักษา (0, 4, 8 วันหลังจากวันทดสอบ) วิเคราะห์การทดลองทางสถิติด้วย
ANOVA และ DMRT ผลการทดสอบปรากฏว่า ภาระกด ระยะการเจริญเติบโต และวันเก็บรักษา
มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5 % กับความแน่นเนื้อและดัชนีความแน่นเนื้อ มังคุดเกิด
เปลือกแข็งเนื่องจากของเหลวภายในผนังเซลล์ซึ่งเสียหายจากการรับภาระทำปฏิกิริยากับอากาศ
ภายนอกจนเกิดการสะสมลิกนิน มังคุดสีชมพูมีแนวโน้มเป็นมังคุดเปลือกแข็งได้น้อยกว่ามังคุด
ม่วงดำ อาการเปลือกแข็งของมังคุดเป็นอาการ “ซ้ำ” ของเปลือกมังคุด

ผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3 ระยะการเจริญเติบโต (ระยะหนึ่ง
ชั้น ชั้นครึ่ง และสองชั้น) การทดสอบแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ การทดสอบก่อนเกิดการซ้ำ
(Below threshold) และการทดสอบหลังเกิดการซ้ำ (Beyond threshold) ผลปรากฏว่ามะพร้าว
อ่อนระยะสองชั้น เป็นระยะที่เกิดการซ้ำได้ง่ายที่สุด

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Udomsak Kitthawee 2011: Mechanical Bruising of Mangosteen Rind and Young Coconut Husk. Doctor of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Siwalak Pathaveerat, Ph.D. 111 pages.

The objective of this research was to study the mechanical properties of hard rind mangosteen for quality controlling and to determine young coconut fruit bruising mechanism subjected to quasi-static compression and impact test.

The research included the mechanical property of firmness (F/D) and a firmness index (A/t) to evaluate the mangosteen that was compressed by rigid flat plate installed to the Universal Testing Machine (Instron 5569) and impacted by impacting rod. There were three control factors: a) 6 loading (100, 80, 60, 40, 20 and 0 % of rupture force) b) 2 maturity stages (Pink and Dark Purple) and c) 3 storage days (0, 4 and 8 days after testing day). Analysis was achieved by using ANOVA and DMRT. Results showed that compressive and impact loading, maturity and storage significantly affected firmness and firmness index at $p < 0.05$. When the solution in the cell oxidize by surrounding atmosphere due to cell wall failure, the mangosteen would hard rind by lignifications. The pink mangosteen tended to be hard rind less than the dark purple fruit. The hard rind of mangosteen was the "Bruise" in the mesocarp of fruit.

The sample young coconut included three different maturity stages (immature, mature, overmature) were studied for bruising response below and beyond the bruise threshold. Overmature young coconut exhibited the most bruise under loading.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และรองศาสตราจารย์ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี Professor Dr. Pictiew Chen และ Professor Dr. David C. Slaughter สำหรับ โอกาสในการตีพิมพ์และนำเสนอผลงานทางวิจัยในระดับนานาชาติ รวมไปถึงการผลักดันจนได้ไปทำวิจัย ณ University of California at Davis ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมหาวิทยาลัยชั้นนำของโลก

ขอขอบคุณ คุณลุงสุรศักดิ์ เกษตรกรชาวสวนมะพร้าวอ่อน อ. บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร สำหรับคำแนะนำและช่วยเหลือในการเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อนที่ใช้ในการทดสอบ ผศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ เอื้อเฟื้อมั่งคุดเป็นพิเศษ ขอขอบคุณอาจารย์ประกิต ทิมขำ บุคลากรทุกฝ่าย และเพื่อนทุกคน ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกที่กรุณาสนับสนุนงบประมาณวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอรวรรณ กิจทวี ที่ให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ และคุณแม่ ที่สนับสนุน และส่งเสริมให้ข้าพเจ้ามีวันนี้

คุณความดีที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้พึงจะมีขออุทิศแด่ ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จริโมภาส

อุดมศักดิ์ กิจทวี

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	32
สรุปผลการทดลอง	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดทั้งสองระดับ เมื่อได้รับการกดเกือบสัณทิตย	36
2	ปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดทั้งสองระดับ เมื่อได้รับการกระทำกระแทก	38
3	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดสีม่วงและสีชมพู เมื่อได้รับการกดเกือบสัณทิตยและกระทำกระแทก	39
4	ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm}^3$) ของผลมังคุดระยะม่วงดำที่ได้รับภาวะกดเกือบสัณทิตยที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	41
5	ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm}^3$) ของผลมังคุดระยะชมพูที่ได้รับการกดเกือบสัณทิตยที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	42
6	ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลมังคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการกดเกือบสัณทิตยที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	43
7	ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลมังคุดระยะชมพูที่ได้รับการกดเกือบสัณทิตยที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	44
8	ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm}^3$) ของผลมังคุดระยะม่วงดำที่ได้รับภาวะแบบกระทำกระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	45
9	ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm}^3$) ของผลมังคุดระยะชมพูที่ได้รับภาวะแบบกระทำกระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	46
10	ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลมังคุดระยะม่วงดำที่ได้รับภาวะแบบกระทำกระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	47
11	ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลมังคุดระยะชมพูที่ได้รับภาวะแบบกระทำกระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา	48
12	สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรชื้น (V_B) กับพลังงานกระทำ (E_p) ที่ใช้ในการกระทำของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	54
13	ค่าความไวต่อการช้ำ (bruise susceptibility, mm^3/J) ของมะพร้าวอ่อนต่อการกระทำกระแทก	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
14	สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการชำรุด (P) กับพลังงานกระแทก (E_i)	57
15	ปริมาณความชำรุดและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) (ที่ $P^{**}=1.0$) ของมะพร้าวอ่อน เมื่อได้รับการกระทำกระแทก (32 mm impactor)	57
16	สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาณชำรุด (V_B) กับพลังงานกด (E_c) ที่ใช้ในการกดทดสอบของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อทดสอบด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	59
17	ค่าความไวต่อการชำรุด (bruise susceptibility, mm^3 / J) ของมะพร้าวอ่อนต่อการกดทดสอบ	60
18	สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการชำรุด (P) กับพลังงานกดทดสอบ (E_c)	61
19	แสดงปริมาณความชำรุดและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) (ที่ $P^{**}=1.0$) ของมะพร้าวอ่อน เมื่อได้รับการกดทดสอบ (32 mm impactor)	62

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภูมิแสดงระบบการคัดแยกของผลมังคุดสดภายในประเทศไทย	1
2	Magness-Taylor pressure tester	6
3	เครื่องวัดปริมาณแรงด้วยเกนาฟิกา (Handy Hit)	6
4	เครื่องทดสอบแบบกระแทกแบบต่างๆ	7
5	ลักษณะกราฟของการกระทำกระแทก	11
6	การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน	11
7	ระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทก	12
8	ส่วนประกอบของผลมะพร้าว	19
9	ผลมะพร้าวอ่อนแปรรูปในลักษณะต่างๆ	22
10	กราฟความน่าจะเป็นในการชำและพื้นที่การชำสัมพันธ์กับระดับพลังงานต่างๆ	25
11	ความกว้างและความลึกของรอยชำเปลือกมังคุดที่ถูกกระทำ ก. กดเกือบสถิต ข. กระทำกระแทก	26
12	หัวทดสอบขนาดต่างๆ	29
13	อุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติการชำแบบกระแทก	29
14	ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ก. เปลือกมังคุดเมื่อได้รับแรง กระทำ ข. เปลือกมังคุดปกติ	33
15	ปริมาณความชำกับพลังงานแบบกดเกือบสถิตย์	34
16	ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำและพลังงานแบบกดเกือบสถิตย์	35
17	ปริมาณความชำกับพลังงานแบบกระทำกระแทก	36
18	ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำและพลังงานแบบกระทำกระแทก	37
19	ลักษณะรอยชำของผลมะพร้าวอ่อน	52
20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระทำของผล มะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชิ้นเมื่อกระทำด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	53
21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระทำของผล มะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชิ้นครั้งเมื่อกระทำด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	53

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระแทกของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้นเมื่อกระแทกด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	54
23	ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกระแทก	56
24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	58
25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นครึ่งเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	58
26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้นเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ	59
27	ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกด	61

การชำของเปลือกมังคุดและเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระเชิงกล

Mechanical Bruising of Mangosteen Rind and Young Coconut Husk

คำนำ

ปัจจุบันผู้คนทั่วโลกในความสนใจกับการบริโภคผักและผลไม้สด เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าผักและผลไม้สดนั้นเป็นแหล่งวิตามิน เกลือแร่ และสารอาหารต่างๆ ที่ร่างกายต้องการและมักจะเป็นประโยชน์มากกว่าโทษ แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นผักและผลไม้สดมีปัญหาในเรื่องของความปลอดภัยเป็นเรื่องใหญ่ที่พ้อค้ำคนกลาง ผู้ขาย ผู้ส่งออก รวมไปถึงชาวสวนให้ความสำคัญคุณภาพของผักผลไม้ที่ซื้อขายยังประโยชน์ทั้งผู้ขายในเรื่องของราคาที่ดี และผู้ซื้อในเรื่องของคุณภาพที่ได้รับ

มังคุดเป็นผลไม้หนึ่งที่มีรสหวานอมเปรี้ยวและถูกปากคนไทยและต่างชาติ เป็นที่ต้องการมากทั้งในและต่างประเทศ ปัญหาในเรื่องของคุณภาพของมังคุดที่ผลิตได้ถือเป็นปัญหาสำคัญคุณภาพที่คำนึงถึงนอกจาก รูปร่าง ขนาด น้ำหนัก สี ความมันวาว ขางเปลือกแข็งและคุณภาพภายในเช่น เนื้อแก้วอีกด้วย (สมเกียรติ, 2543) ปัญหาคุณภาพส่งผลกระทบต่อราคาขายของมังคุดทั้งในและต่างประเทศ โดยเฉพาะปัญหาเปลือกแข็งของมังคุดซึ่งสามารถเกิดได้ง่ายถึงแม้มังคุดจะมีเปลือกหนาก็ตาม แม้ว่าการแข็งของเปลือกมังคุดจะไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อข้างในของผลมังคุดที่ใช้รับประทาน แต่การแข็งของเปลือกผลมังคุดก็แสดงว่าผลมังคุดนั้นมีคุณภาพไม่ดี และผู้บริโภคไม่นิยมซื้อผลมังคุดที่มีเปลือกแข็ง (สายชล, 2548)

ในปี 2553 มีพื้นที่เพาะปลูกที่ให้ผลผลิตทั้งประเทศประมาณ 405,622 ไร่ ผลผลิตมังคุดรวมทั้งประเทศมีประมาณ 250,508 ตัน แต่มีการส่งออกมังคุดเพียง 119,572 ตัน คิดเป็นมูลค่า 1,956 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554) ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของผลมังคุดที่พบ ณ จุดรับซื้อในจังหวัดจันทบุรีและชุมพร ประกอบด้วย ผลร่วง เปลือกแข็ง ผิวกลากหรือผิวลาย ซึ่งเป็นความเสียหายที่สามารถสังเกตได้จากภายนอก และความเสียหายภายในเช่น เนื้อแก้ว ยางไหล เนื้อเน่าหรือในบางผลมีการผสมของความเสียหายมากกว่า 1 แบบ ความเสียหายแบบต่างๆ (Pushpariksha *et al.*, 2006) สามารถแบ่งได้ดังนี้คือ ผลร่วง เปลือกแข็ง ผิวกลาก ต่ำหนิภายใน มังคุดกลุ่มนี้มีทั้งที่คัดทิ้งและคัดแยกไว้ขายในราคาต่ำประมาณ 3-8 บาทต่อกิโลกรัม ลักษณะความ

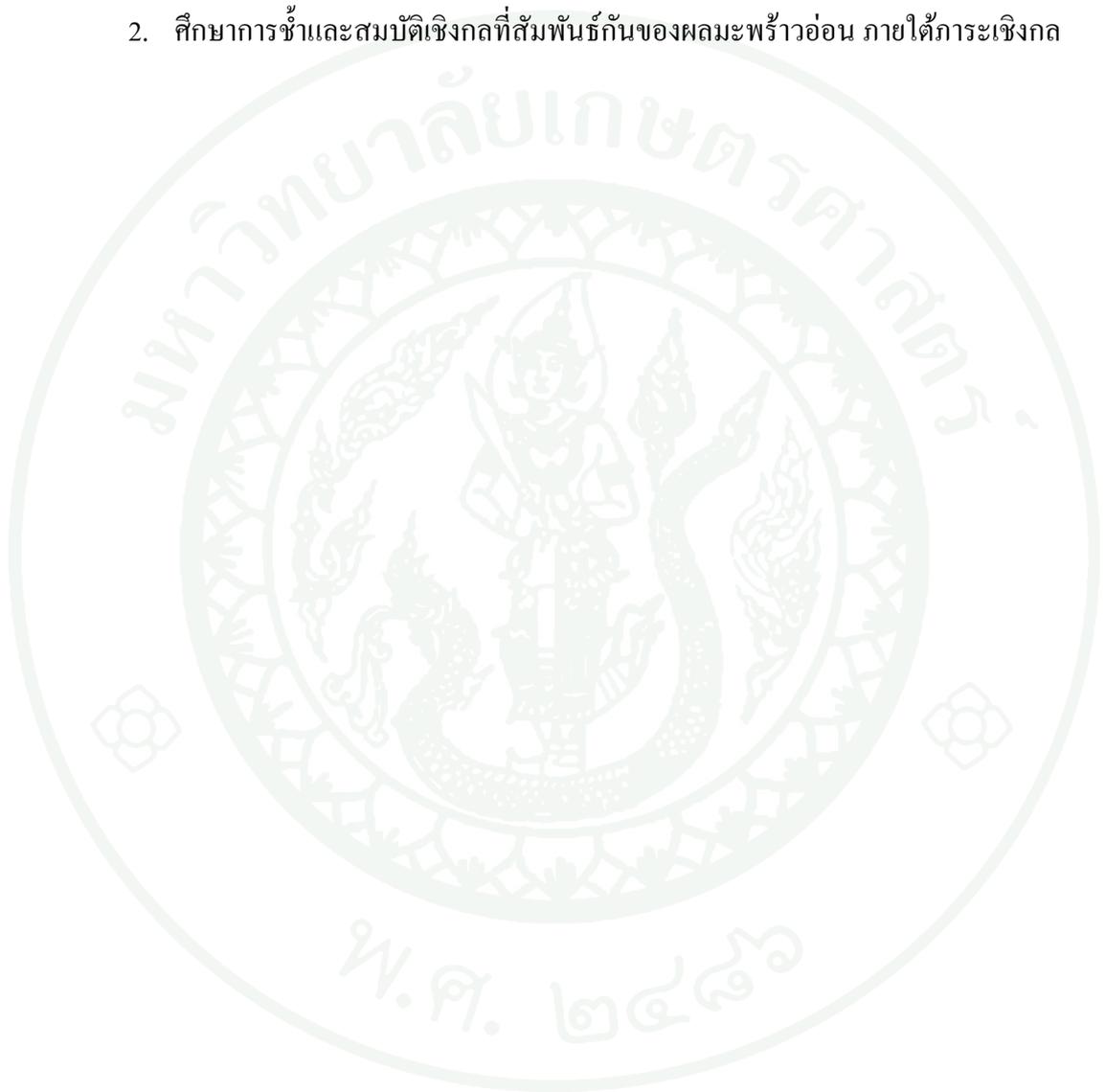
เสียหายที่มีปริมาณมากที่สุดคือ มังคุดผิวกากหรือตาย ซึ่งทำให้มูลค่าของมังคุดลดลงอย่างมาก ถ้าเป็นมังคุดผิวมันผลใหญ่ราคา 30-60 บาท แต่ในผิวกากผลใหญ่มีราคาเพียง 22-30 บาท พนิดาและ บัณฑิต (2549) พบว่าปริมาณมังคุดเปลือกแข็งกระจายในผู้ค้าเร่ ตลาดสด และซูเปอร์มาร์เก็ตเฉลี่ยสูงถึง 33.4% ดังนั้นอาการเปลือกแข็งในมังคุด สามารถพัฒนาได้ต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างจึงเป็นเหตุผลสำคัญในการพิจารณา ถึงแง่มุมในต่างจากการทดลองเพื่อหาผลในการนำไปปรับใช้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

ยังมีพืชอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่รู้จักดีในประเทศไทยและกำลังเป็นที่นิยมไปทั่วโลกในนาม มะพร้าวอ่อน มีสถิติในประเทศระบุว่า ปี 2553 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะพร้าวที่ให้ผลผลิตแล้ว 1,443,439 ไร่ ผลผลิตรวมประมาณ 1,298,147 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554) การส่งออกจะส่งในรูปแบบผลอ่อนไปต่างประเทศในลักษณะมะพร้าวควั่น และมะพร้าวเจียน (กรมวิชาการเกษตร ฐานความรู้ด้านพืช, 2549) สถิติการส่งออกมะพร้าวในปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยส่งออกมะพร้าวไปต่างประเทศ มีมูลค่า 489 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2554)

มะพร้าวอ่อนน้ำหอมเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในการส่งออก ซึ่งต้องมีการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวอย่างดีเพื่อป้องกันการช้ำของผล เริ่มตั้งแต่การขนย้ายออกจากสวนสู่กระบวนการผลิต ประกอบด้วยการตัดแต่งผล การจุ่มสารกันเชื้อรา และสารกันการเปลี่ยนสีของผิว ปัญหาสำคัญในการส่งออกมะพร้าวอ่อนที่มักพบเสมอคือ รอยช้ำที่เปลือกซึ่งเกิดจากการเก็บเกี่ยวและการขนถ่ายผลผลิตที่ขาดความระมัดระวัง อาการช้ำนี้จะเห็นเป็นบริเวณสีน้ำตาลในกาบมะพร้าวสีขาว โดยสังเกตได้ขณะแต่งผลและบางครั้งอาการรุนแรงมากจนไม่สามารถแต่งออกได้จึงกลายเป็นตำหนิทำให้มะพร้าวอ่อนด้อยคุณภาพลงและที่สำคัญยังเป็นแหล่งเกิดโรคอีกด้วย ปัญหาอีกประการหนึ่งที่เกิดจากการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวไม่เหมาะสม คือกะลาข้าวซึ่งเป็นความเสียหายที่ไม่อาจมองเห็นจากภายนอกหรือเมื่อตัดแต่งผลแล้วก็ตาม อาการดังกล่าวอาจทำให้คุณภาพภายในมะพร้าวเสียไปโดยน้ำเกิดกลิ่นหมักและเนื้อมะพร้าวเสียได้ ดังนั้นการทราบลักษณะการช้ำของผลมะพร้าวอ่อนสาเหตุและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กัน จะช่วยให้สามารถลดการสูญเสียให้น้อยลงและปรับปรุงการผลิตผลมะพร้าวอ่อนให้ได้คุณภาพเป็นมาตรฐาน

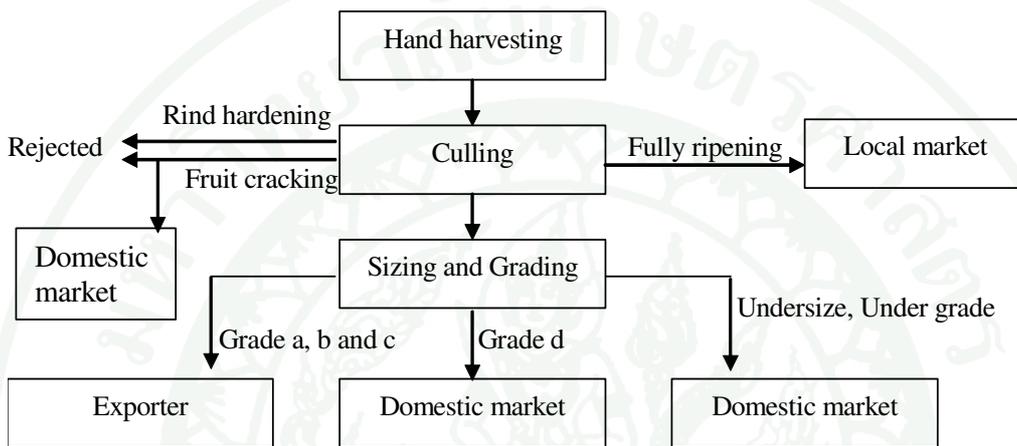
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติเชิงกลของเปลือกมังคุดแห้งภายใต้ภาวะเชิงกล
2. ศึกษาการซ้ำและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กันของผลมะพร้าวอ่อน ภายใต้ภาวะเชิงกล



การตรวจเอกสาร

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) มีถิ่นกำเนิดในประเทศมาเลเซียและมีการปลูกอย่างกว้างขวางในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Bunsiri *et al.*, 2003)



ภาพที่ 1 แผนภูมิแสดงระบบการคัดแยกของผลมังคุดสดภายในประเทศไทย

ที่มา: Jarimopas *et al.* (2008)

ระบบการคัดคุณภาพมังคุดในประเทศไทยได้สรุปออกเป็นเป็นแผนผัง ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยมังคุดที่ทำการเก็บเกี่ยว ถ้ามีอาการเปลือกแข็ง หรือผลร้าวจะถูกคัดทิ้ง ส่วนผลที่มีเปลือกสีม่วงเข้มจะถูกแยกออกไว้ขายในพื้นที่ เนื่องจากผลสุกเต็มที่ จึงมีอายุการจำหน่ายสั้น และมีเปลือกผลที่นุ่ม อาจเกิดการชำรุดอันจะทำให้เกิดอาการเปลือกแข็งได้ง่าย จึงไม่เหมาะกับการขนส่งไปขายไกลๆ ส่วนผลในระยะสีอื่นๆ จะถูกคัดขนาดและคัดเกรด ออกเป็นเกรดต่างๆ โดยเกรดมันใหญ่ มันเล็ก และกลากใหญ่ จะส่งไปขายต่างประเทศ ส่วนเกรด มันจิว ผลดอก และตกเกรด จะส่งขายในประเทศ

ความแน่นเนื้อ (Firmness)

ความแน่นเนื้อของผลไม้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการจัดการซื้อขายของผักและผลไม้ (Chen *et al.*, 1996) ความแน่นเนื้อเป็นลักษณะทางกายภาพอย่างหนึ่งซึ่งบ่อยครั้งจะถูกใช้ประเมินคุณภาพของผักผลไม้ (Harker *et al.*, 1996) ในผลิตภัณฑ์การเกษตรหลายอย่าง ความแน่นเนื้อสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของการเจริญเติบโตต่างๆ ไป ความแน่นเนื้อของผลไม้ลดลงทีละน้อยเมื่อโตเต็มที่มากขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อสุก ผลไม้ที่เสียหายหรือสุกเกินไปจะนิ่ม ดังนั้นความแน่นเนื้อสามารถใช้เป็นเกณฑ์สำหรับคัดเลือกผลิตภัณฑ์เกษตรออกเป็นกลุ่มความเติบโตสมบูรณ์ต่างๆ ได้ หรือแยกสุกเกินไปและพวกเสียหายจากพวกดีได้

Reyes *et al.* (1996) ได้ศึกษาแยกมะละกอออกเป็น 5 ระดับ ตามระดับสีผิวจากเขียวถึงสีเหลืองสามในสี่ส่วน ซึ่งมีความแน่นเนื้อลดลงจาก 129–16.5 นิวตัน

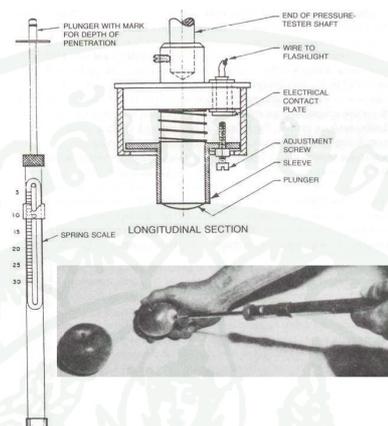
Delwiche *et al.* (1996) ได้ทำการแบ่งความแน่นเนื้อ (แรงจากการเปลี่ยนรูป 7.9 มิลลิเมตรเข้าไปภายในเนื้อผลไม้) ของ Bartlett pear ออกเป็น 3 ช่วงคือนิ่มความแน่นเนื้อน้อยกว่า 44 นิวตัน แน่นความแน่นเนื้ออยู่ระหว่าง 44 นิวตันถึงน้อยกว่า 70 นิวตัน แข็งความแน่นเนื้อมากกว่าหรือเท่ากับ 70 นิวตัน

ความแน่นเนื้อสามารถประเมินได้จาก (Finney, 1969)

1. แรงที่ทำให้ได้การเปลี่ยนรูปที่กำหนดให้ภายในผลิตภัณฑ์นั้น
2. การเปลี่ยนรูปที่เกิดจากแรงมาตรฐาน
3. อัตราส่วนแรงต่อการเปลี่ยนรูปภายในวัสดุระหว่างถูกภาระเชิงกลกระทำ

แนวคิดสำหรับข้อ 1 และ 3 คือยิ่งอ่านค่าได้มากผลิตภัณฑ์ยิ่งแน่นเนื้อมาก ส่วนข้อ 2 ยังมี การเปลี่ยนรูปน้อยผลิตภัณฑ์ยิ่งแน่นเนื้อมาก ความแน่นเนื้อของผลไม้ควรที่จะถูกวัดภายใต้สภาวะ ความเครียดน้อยๆ ไม่ให้เกินจุดคลาก (yield point) ของผลิตผลและสอดคล้องกับทฤษฎียืดหยุ่น (Bourne, 1967)

Schomer and Olsen (1962) พบว่าความแน่นเนื้อเป็นสัดส่วนกับแรงกดและได้ทำการปรับปรุงเครื่องทดสอบแรงดันผลไม้ (ภาพที่ 2) ซึ่งมีความลึกของการแทงหัวกดเข้าไปในผลไม้เท่ากับ 1.4 มม. โดยมีหลอดไฟเล็กๆ แจ่มแก่ผู้ทดสอบ



ภาพที่ 2 Magness-Taylor pressure tester

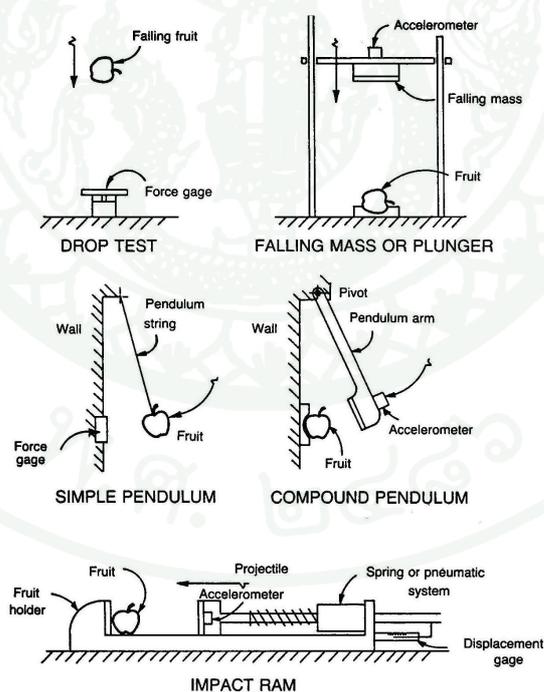
ที่มา: Mohsenin (1986)

การบอกความแน่นเนื้อด้วยเครื่อง HIT (Hardness, Immaturity and Texture Meter) เป็นวิธีที่ไม่ทำลายหรือทำให้ตัวอย่างผลไม้ที่เอามาทดสอบเสียหาย ทำให้สามารถตรวจสอบผลไม้ตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ระหว่างการเก็บรักษา กระบวนการตรวจสอบระดับความสุกเพื่อการจำหน่าย และเวลาที่ดีที่สุดที่จะบริโภค เครื่อง HIT จะประเมินความแน่นเนื้อจากปริมาณการเปลี่ยนรูปที่กำหนดที่เกิดจากแรงกดภายในช่วงยืดหยุ่น ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดทั้งความเสียหายและการเปลี่ยนรูปถาวรกับวัสดุตัวอย่าง



ภาพที่ 3 เครื่องวัดปริมาณแรงด้วยกนาพิกา (Handy Hit)

หลักการทํางาน (ภาพที่ 3) เครื่องวัดปริมาณแรงด้วยเกนาฬิกา (Dial gauge) โดยการกดผลไม้กับหัวกดซึ่งจะถ่ายทอดแรงกระทำสู่สปริงภายในเครื่องการจัดของสปริงจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเข็มที่หน้าปัทม์เครื่องซึ่งระบุระดับความแน่นอนเมื่อ Manago (1991) ได้เปรียบเทียบการใช้ Handy Hit กับเครื่องวัดความแน่นอนเนื้อของผลไม้ที่ใช้กันทั่วๆ ไป โดยทดลองกับผลกีวี่ที่ระยะการสุกต่างๆ พบว่า การใช้เครื่อง Handy Hit ในภาคสนามเป็นไปได้ ภาพที่ 4 แสดงเครื่องมือทดสอบการกระแทกแบบต่างๆ การทดสอบแบบ Drop test เป็นการทดสอบโดยปล่อยผลไม้ที่ความสูงระยะหนึ่งตกลงมากระแทกกับผิวหน้าเป็นพื้นเรียบ ซึ่งตรงข้ามกับแบบ Falling mass ที่จะปล่อยพื้นผิวซึ่งติดหัววัดความแรงไว้กระแทกกับผลไม้ที่อยู่กับที่ อีกแบบหนึ่งคือแบบ pendulum แบ่งเป็น Simple pendulum และ Compound pendulum ซึ่งทั้ง 4 แบบข้างต้นเป็นแบบที่จำเป็นต้องใช้แรงโน้มถ่วงของโลกจึงทำให้ค่าแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำกับผลไม้จึงจำเป็นต้องสามารถทราบค่าน้ำหนักที่แน่นอนและควบคุมได้ ส่วนแบบ impact ram เป็นแบบที่ไม่ได้ใช้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกแต่ใช้แรงซึ่งเกิดจากสปริงหรือระบบนิวเมติกไปกระแทกกับผลไม้ซึ่งพียงอยู่กับแท่นรับผลไม้จึงทราบค่าแรงที่กระทำกับผลไม้แน่นอนและสม่ำเสมอทุกครั้ง



ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบแบบกระแทกแบบต่างๆ

ที่มา: Peleg (1985)

การกระแทก

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

Delwiche *et al.* (1987) ระบุว่าแรงที่ได้จากการกระแทกของลูกพีชเมื่อลูกพีชกระแทกกับพื้นผิวเรียบแข็งสามารถวิเคราะห์ทำนายค่าความแน่นเนื้อและบอกถึงระดับความบริบูรณ์ได้ ลักษณะของแรงกระแทก (peak force/time to peak force²) และ F_{295} (295 Hz spectrum magnitude) มีความสัมพันธ์ดีกับ โมดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแน่นเนื้อจาก penetrometer และมีความสัมพันธ์ไม่ดีกับมวลและรัศมี ความโค้งของผลไม้ ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้สามารถที่จะแยกแยะลูกพีชที่ยังไม่บริบูรณ์กับบริบูรณ์ได้จากการหาค่าเพื่อแบ่งระดับความบริบูรณ์แต่ผลจากการทำเครื่องคัดแยกมีปัญหาในเรื่องตำแหน่งลูกพีชที่ตกกระแทกสัมผัสกับแก้วแรงไม่มีความแน่นอน Delwiche *et al.* (1989) สร้างระบบการคัดแบบเรียงเดียวได้ถูกพัฒนาโดยใช้ดัชนี $\frac{F}{t^2}$ เมื่อ F = แรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้น, t = เวลาตั้งแต่เริ่มกระแทกจนถึงเวลาในตำแหน่งที่แรงกระแทกสูงสุด ในการคัดวัสดุเกษตรและลูกแพร์ให้แยกเป็นแข็ง (hard firm) และนุ่ม (soft) มีความเร็วในการคัดแยก 5.1 ผลต่อวินาที มีการคัดแยกตามความแน่นเนื้อถูกต้อง 74%

Meredith *et al.* (1990) รายงานว่าแรงสูงสุดที่ได้จากเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) ซึ่งสามารถวัดความแน่นเนื้อมีความสัมพันธ์ที่ดีกับ coefficient of restitution ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้กำหนดมาจากแรงกระแทกที่เกิดติดกัน 2 ครั้ง โดยได้ค่าของแรงจาก load-cell tripod

Zapp *et al.* (1990) ได้พัฒนาผลไม้จำลองทรงกลมเพื่อนำไปสู่การเก็บข้อมูลค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในระหว่างการจัดการ, การบรรจุและขนส่งของผักและผลไม้ ปรากฏว่าเมื่อทดลองแบบปล่อยผลไม้ตก สัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากผลไม้จริง Bollen (1993) นำข้อมูลซึ่งได้จากเครื่องมือทรงกลม (Instrumented sphere) ที่ปล่อยไปพร้อมผลไม้ปรากฏ

ว่าเมื่อผลไม้เกิดการกระแทกที่ความสูงประมาณ 50 มิลลิเมตรมีโอกาส 20 เปอร์เซ็นต์ที่แอปเปิ้ลจะเกิดความชำรุดเสียหายผ่านศูนย์กลางเกิน 1 ตารางเซนติเมตร

McGlone *et al.* (1997) รายงานว่าปัญหาที่ติดตามมาของวิธีการปล่อยผลไม้ตกคือแรงกระแทกที่เกิดขึ้นมีค่าขึ้นอยู่กับปัจจัยของน้ำหนักและรัศมีความโค้งงอของผลไม้ซึ่งมีค่าแปรปรวนค่อนข้างสูงจึงมีผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัดความแน่นเนื้อ

Reyes *et al.* (1996) ได้ทำการสร้างหัววัดการกระแทกเพื่อแยกมะละกออกเป็น 5 ระดับ ความสูงซึ่งสามารถแยกได้และมวลและรูปร่างของมะละกอยังไม่มีผลต่อหัววัดด้วยแต่หัววัดไม่สามารถแยกมะละกอผลที่ยังไม่บริบูรณ์จากมะละกอผลที่บริบูรณ์ได้

McGlone *et al.* (1997) ระบุว่า การตกกระทบของก๊วที่ความสูงต่างๆ ไม่เกิน 50 มิลลิเมตรสามารถใช้ทฤษฎี Impact force analysis (IFA) ทำนายค่าความแน่นเนื้อ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแน่นเนื้อที่ได้จาก penetrometer ปรากฏว่ามีความสัมพันธ์ที่ดี

Abbott (1999) รายงานว่าสมบัติทางกลมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัส ส่วนประกอบของสมบัติความยืดหยุ่นหนืด (viscoelastic behavior) ของเนื้อสัมผัสมีความสำคัญในการกำหนดความต้านทานการชำรุดและการวัดแรง โดยวิธีของ MT (Magness Taylor) ลักษณะของหัววัดของ MT ไม่เป็นเครื่องทรงกลมหรือเรียบ Bourne (1982) กล่าวว่าในการเปรียบเทียบแรงที่ได้จาก MT ไม่สามารถที่จะแปลงค่าเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับหัววัดขนาดหนึ่งกับขนาดอื่นๆ ได้ หรือเปลี่ยนค่าเป็นเรขาคณิตอื่น Bajema *et al.* (1998) ได้พัฒนาเครื่อง impact tester สำหรับค้นคว้าเพื่อลดความเหนียว (Toughness) ของเนื้อเยื่อปรากฏว่าที่อุณหภูมิค่าประมาณ 5 องศาเซลเซียสและ strain rate สูงๆ สามารถลดความเหนียวของเนื้อเยื่อหัวมันได้

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีสมบัติความยืดหยุ่นหนืดซึ่งความยืดหยุ่นหนืดเป็นสมบัติรวมกันระหว่างสมบัติเหมือนของแข็งและสมบัติเหมือนของเหลว (Mohsenin, 1986) ถึงแม้ว่าผลไม้จะมีสมบัติความยืดหยุ่นหนืดแต่ผลกระทบของความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการกระทำที่เร็วขึ้นและผลไม้จะมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้การกระทำที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็ว (Chen *et al.*, 2001) เมื่อมีวัสดุยืดหยุ่นทรงกลมกระทำบนพื้นผิวเรียบ แรงที่เกิดขึ้นขึ้นกับความเร็ว, มวล, รัศมีความโค้ง, ยังโมดูลัสและอัตราส่วนปัวซองของทรงกลม (Chen *et al.*, 1996) ในการทดลองที่ใช้วิธี Drop test แรงกระทำที่ได้เป็นฟังก์ชันของมวลและรัศมีความโค้งของผลไม้ซึ่งมีความแปรปรวนมากในตัวแปรทั้งสองและส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดความแน่นเนื้อ

(Chen *et al.*, 1996) และแรงที่ได้จะมีอิทธิพลมาจากความเร็วและมวลของผลไม้มากกว่าโมดูลัสของผลไม้ (Chen *et al.*, 2001)

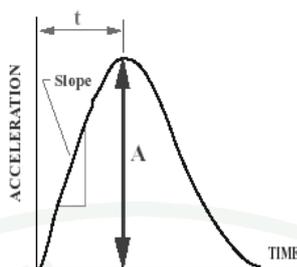
มีวิธีการที่ต่างออกไปคือกระแทกผลไม้ด้วยหัวกระแทกทรงกลมขนาดเล็กซึ่งทราบน้ำหนักที่แน่นอนและรัศมี ความโค้งและความเร่งของหัวกระแทก ประโยชน์ของวิธีนี้คือการตอบสนองแรงกระแทกเป็นอิสระจากมวลของผลไม้และมีผลกระทบน้อยมากจากรัศมี ความโค้งของผลไม้ Ruiz-Altisent *et al.* (1993) พัฒนาระบบซึ่งใช้ Impact parameter ในการคัดแยกผลไม้ (apples, pears and avocados) ที่ระดับความแน่นเนื้อต่างๆ ผลการศึกษา (Chen *et al.*, 1996) เมื่อใช้น้ำหนักหัวกระแทกที่มีค่าน้อย (ประมาณ 10 กรัม) ซึ่งว่า

1. สัญญาณมีค่ามากขึ้นเมื่อน้ำหนักน้อยลง (จากหัวกระแทก 50 กรัมเหลือ 10 กรัม)
2. เพิ่มค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t ; A =ความเร่ง, t =เวลาที่สัมพันธ์กับความเร่ง)
3. ลดความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของผลไม้เนื่องจากน้ำหนักกระแทกที่น้อย
4. ลดความเสียหายเนื่องจากการกระแทก

และยังชี้อีกว่าน้ำหนักน้อยๆ นั้นจะถูกจำกัดอยู่เนื่องจากน้ำหนักของหัววัดความเร่งและความสามารถในการควบคุมความเร็ว ความเร็วมีผลอย่างมากต่อดัชนีความแน่นเนื้อ เมื่อน้ำหนักหัวกระแทกน้อย สายสัญญาณซึ่งต่อกับหัวกระแทกจะมีผลต่อการตกกระทบ ทำให้ตกกระทบไม่ตั้งฉากกับผิวของผลไม้และยังดึงหัวกระแทกให้ตกกระทบช้าลง

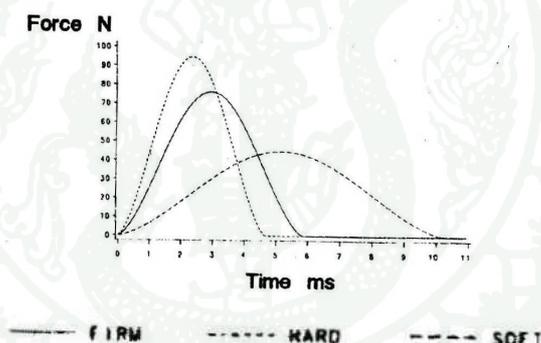
Chen *et al.* (1996) ได้แสดงการสร้างสูตรคณิตศาสตร์และสรุปว่าเวลาที่ต้องการได้แรงกระแทกสูงสุด $t = 1.47 \times D/V$ และดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) มีค่า $A/t = 0.68 \times F \times V / D \times m_1$ เมื่อ D = การเปลี่ยนรูปมากที่สุดของผลไม้เมื่อถูกกระแทก V = ความเร็วของหัวกระแทก m_1 = มวลของหัวกระแทก A = ความเร่ง F = แรงที่เกิดขึ้น

Impact Acceleration History



ภาพที่ 5 ลักษณะกราฟของการกระทำกระแทก

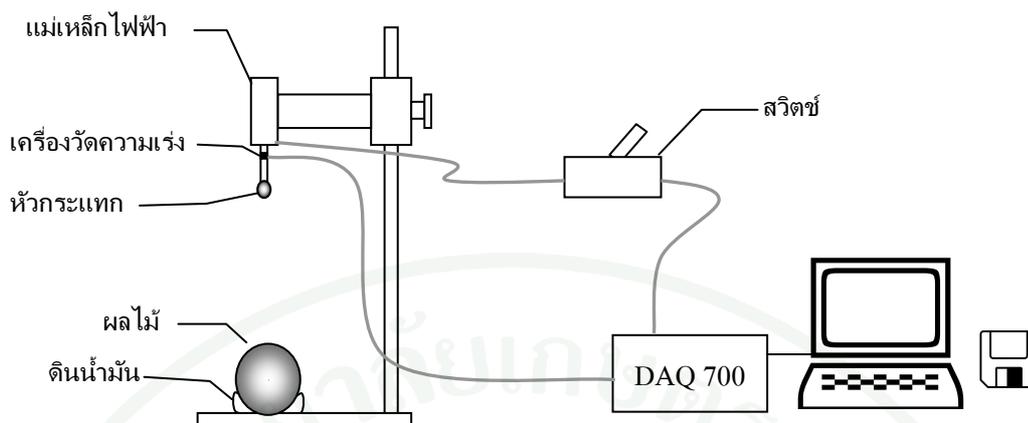
การวิเคราะห์ผลภาพที่ 5 แสดงลักษณะต่างๆ ไปของกราฟสัญญาณความเร่งที่ได้จากหัววัด ความเร่งกับเวลาระหว่างการกระทำกระแทกของหัวกระแทกกับผลไม้ เมื่อเกิดการกระแทก หัวกระแทกจะกดผลไม้เข้าไปในลักษณะความเร่งเพิ่มขึ้นกับเวลาการกระแทก



ภาพที่ 6 การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน

ที่มา: Delwiche *et al.* (1987)

ภาพที่ 6 แสดงกราฟการกระจายแรงกระแทกกับเวลาของผลไม้ที่มีระดับความแน่นเนื้ออ่อน แน่นและแข็ง ลักษณะกราฟเหมือนภาพที่ 6 เนื่องจากแรงแปรผันตามความเร่งเมื่อน้ำหนักหัวกระแทกคงที่ กราฟทั้ง 3 มีความแตกต่างกันทั้งค่าแรงมากที่สุด ระยะเวลาที่สมนัยกับแรงมากที่สุด และความชันของกราฟความเร่ง (A) ลดลงและเวลา (t) เพิ่มขึ้นและความแน่นเนื้อลดลง จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) มาสัมพันธ์กับตัวแปรกำหนดความแน่นเนื้ออื่นๆ เช่น ค่าโมดูลัสยัง



ภาพที่ 7 ระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทก

ภาพที่ 7 แสดงระบบเครื่องมือวัดหาสมบัติการกระแทกซึ่งประกอบไปด้วย ดินน้ำมัน, แม่เหล็กไฟฟ้า, เครื่องวัดความแรง (BBN CE501 M101), หัวกระแทก (ประกอบด้วยลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและด้ามซึ่งเปลี่ยนน้ำหนักได้โดยมี 3 ระดับคือ 10, 30 และ 50 กรัม), Data Acquisition Unit (NI DAQ 700), คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมและสวิตช์

Mohsenin (1986) กล่าวว่า การเสียหายทางกล คือ ความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปร่างมากเกินไปจากแรงกระทำอยู่กับที่หรือแรงกระแทก การชนย้ายและชนส่งทำให้เกิดภาวะเชิงกลได้แก่ การกระแทก และการสั่นสะเทือนกระทำกับบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ภายในเสียหาย

บัณฑิต (2545) กล่าวว่า การเสียหายของผัก ผลไม้ จากการชนส่งที่เรียกว่าการซ้ำของลูกกลิ้ง (Rolling bruising) เป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผักผลไม้สดและแปรรูป สาเหตุของความเสียหายมาจากความล้มเนื่องจากแรงของการสั่นสะเทือนซ้ำแล้วซ้ำเล่าต่อผลไม้ ส่งผลให้เซลล์ภายในผิวผลไม้แตก ปัจจัยที่กำหนดความรุนแรงของความเสียหายมี 2 ประการคือ ความเข้มของการสั่นสะเทือน และระยะเวลาในการสั่นสะเทือน

Schoorl และ Holt (1980) ได้จำแนกความล้มเหลวเชิงกลไว้ 3 ประเภทคือ การแตก (Cracking) การลื่น (Slip) และการซ้ำ (Bruising) การแตกหรือการแยกของไขมันฝรั่งถูกรายงานโดย Mohsenin (1970, 1977) Sherif (1976) ได้บรรยายการแตกในศูนย์กลางของหัวมันฝรั่งว่า เนื่องมาจากแรงเค้นดึงและแรงเค้นเฉือน (Tensile and shear stress) Diehl *et. al.* (1982) ได้รายงาน

การล้มเหลวตามแนวเส้นแรงเค้นเฉือนมากที่สุดในเนื้อมันฝรั่งว่า การล้มเหลวในการอัดตามแกนเดียว (Uniaxial compression) เกิดขึ้นตามแนวแรงเค้นเฉือนมากที่สุดทำให้เกิดการล้มเหลวตามระนาบ 45 องศากับแนวการกระทำของภาระ

ปกติผักผลไม้จะถูกภาระกระทำระหว่างการจัดการหลังเก็บเกี่ยว การขนส่ง การกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภค มีนักวิจัยรายงานว่า สิ่งแรก และสิ่งที่สำคัญที่สุด ในการทำให้เกิดรอยช้ำน้อยที่สุด คือการทำให้เกิดพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) กับผลไม้ที่น้อยที่สุด ในทุกๆ ขั้นตอน ระหว่างปฏิบัติกับเครื่องจักร มีนักวิจัยหลายคน (Bajema *et al.*, 1998; Holt and Schoorl, 1977; Jarimopas *et al.*, 2008) ได้พยายามศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผลไม้เมื่อถูกกระทำ

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

จุดเริ่มเกิดรอยช้ำ (Bruise Threshold) คือ ความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ปล่อยตกลงสู่พื้นผิวแข็งจนตัวอย่างทดสอบนั้นเกิดความเสียหาย (Bajema *et al.*, 1998) หรือ พลังงานกระทำที่มากเพียงพอที่ทำให้รอยช้ำปรากฏ (พิจารณาโดยการมอง) โดยมีความน่าจะเป็น (Probability) หรือความเป็นไปได้ของการเกิดการช้ำเท่ากับ 1 การหาค่าจุดเริ่มเกิดรอยช้ำของกลุ่มตัวอย่างทดสอบทั้งหมด (ไม่ได้หาเฉพาะผลใดผลหนึ่ง) เรียกว่าการหาจุดเริ่มเกิดรอยช้ำแบบ Statistical Threshold ทำโดยการปล่อยตัวอย่างทดลองจำนวนเท่ากัน ที่หลายๆ ระดับความสูง (เช่น ปล่อยแอปเปิ้ล 10 ผล ต่อระดับความสูงที่ทำการทดสอบ, 10 ระดับความสูง) จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการช้ำ ที่ทุกๆ ระดับความสูง

มั่งคุด

การเปลี่ยนสีของเปลือกผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ระยะดังนี้ (กรมวิชาการเกษตร, 2550)

ระยะ 0 ผลมีสีขาวอมเหลืองสม่ำเสมอ หรือมีสีขาวอมเหลืองแต้มด้วยสีเขียวอ่อน หรือ จุดสีเทา มียางสีเหลืองภายในเปลือกในระดับรุนแรงมาก เนื้อและเปลือกไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ผลที่เก็บเกี่ยวในระยะนี้สามารถเปลี่ยนสีถึงระดับ 6 ได้แต่รสชาติไม่ดี

ระยะ 1 ผลมีสีเหลืองอ่อนอมเขียว มีจุดสีชมพูกระจายอยู่บางส่วนของผิวผล ยางภายในเปลือกยังคงมีอยู่ในระดับรุนแรง เนื้อและเปลือกยังไม่สามารถแยกออกจากกันได้

ระยะ 2 ผลมีสีเหลืองอ่อนอมชมพู มีประสีชมพูกระจายไปทั่วทั้งผล ยางภายในเปลือกยังมีอยู่ในระดับปานกลาง การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือกทำได้ยากถึงปานกลาง เป็นระยะอ่อนที่สุดที่เก็บเกี่ยวแล้วได้ผลผลิตคุณภาพดี

ระยะ 3 ผลมีสีชมพูสม่ำเสมอ ประสีชมพูเริ่มขยายเข้ามารวมกันไม่แบ่งแยกกันอย่างชัดเจน เหมือนในระยะ 2 ยางภายในเปลือกยังคงมีอยู่น้อยถึงน้อยมาก การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือกทำได้ง่ายกว่าระยะ 2

ระยะ 4 ผลมีสีแดงหรือน้ำตาลอมแดง บางครั้งมีแต้มสีม่วง ยางภายในเปลือกมีน้อยมาก จนถึงไม่มี การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือกทำได้ง่าย

ระยะ 5 ผลมีสีม่วงแดง ภายในเปลือกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกสามารถแยกออกจากกันได้ง่าย

ระยะ 6 ผลมีสีม่วงเข้มจนถึงดำ ภายในเปลือกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกแยกออกจากกันได้ง่าย

การเก็บผลมังคุด ชาวสวนมักจะเก็บทุกวันหรือวันเว้นวัน โดยการสอยอย่างระมัดระวังไม่ให้ผลมังคุดตกกระแทกพื้น ถึงแม้ว่าผลมังคุดมีเปลือกหนาก็ตาม แต่เปลือกจะไม่ทนทานต่อการกระทบกระแทก เปลือกจะขำและแข็ง บีบไม่ออกในเวลาต่อมา ส่วนเปลือกด้านในจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงและลามไปถึงเนื้ออย่างรวดเร็ว (สมเกียรติ, 2543)

แม้ว่าจะไม่นำมังคุดที่สอยตกกระแทกพื้นมารวบรวมไปจำหน่าย แต่ยังคงพบมังคุดเปลือกแข็งได้ในผลที่มีอาการของโรคผลเน่า ซึ่งเกิดจากเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบจุด ใบไหม้ หรือกิ่งแห้ง กิ่งแตก ที่สามารถจะเข้าทำลายที่ผลได้ด้วย ทำให้เกิดอาการผลเน่าเสียหายและอาจเกิดต่อเนื่องไปจนถึงหลังการเก็บเกี่ยวทำให้เปลือกแข็งได้ (สมศักดิ์, 2541; สมเกียรติ, 2543)

สมโภชน์ (2535) พบว่าความแข็งของเปลือกผลจะลดลงเมื่อมีวัยมากขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผลเปลี่ยนสีจากระยะที่ 2 สีเหลืองอ่อนอมชมพูไประยะที่ 4 สีน้ำตาลแดง หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเปลือกผลน้อยมาก

Jarimopas *et al.* (2008) ดำรวจความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของผลมังคุดที่พบส่วนใหญ่ประกอบด้วย ผลร้าว เปลือกแข็ง ผิวกลากหรือผิวลาย ซึ่งเป็นความเสียหายที่สามารถสังเกตได้จากภายนอก และความเสียหายภายในเช่น เนื้อแก้ว ขางไหล เนื้อเน่าหรือในบางผลมีการผสมของความเสียหายมากกว่า 1 แบบ ผลร้าว เปลือกแข็ง ผิวกลาก ต่ำหนิภายในซึ่งมีเปลือกแข็ง 2.1% ของผลผลิต

พนิดาและบัณฑิต (2549) มังคุดมีทั้งที่คัดทิ้งและคัดแยกไว้ขายในราคาต่ำประมาณ 3-8 บาทต่อกิโลกรัม โดยมากมังคุดผลร้าว นั้นถือกันว่าเป็นผลที่มีอาการเนื้อแก้วแต่เมื่อผ่าดูพบว่าไม่ได้มีอาการเนื้อแก้วทุกผล บางผลก็เป็นปกติ โดยส่วนใหญ่ผลร้าวมีอาการไม่พึงประสงค์ ไม่ว่าจะเป็นเนื้อแก้ว ขางไหลหรือเนื้อเน่า ส่วนน้อยมีอาการปกติ ลักษณะความเสียหายที่มีปริมาณมากที่สุดคือ มังคุดผิวกลากหรือลาย ซึ่งทำให้มูลค่าของมังคุดลดลงอย่างมาก ถ้าเป็นมังคุดผิวมันผลใหญ่ราคา 30-60 บาทแต่ในผิวกลากผลใหญ่มีราคาเพียง 22-30 บาท

จริงแท้ (2549) อาการเปลือกแข็งของมังคุดถือเป็นการตอบสนองต่อการกระทบกระเทือนทางกลโดยไม่เกิดบาดแผลในพืช

Ketsa and Atantee (1998) ระบุว่า มังคุดเมื่อได้รับการกระทบกระแทกจะเกิดอาการเปลือกแข็งซึ่งอาการที่เกิดขึ้นเกิดจากการสะสมของลิกนินที่เปลือกของมังคุด

Bunsiri *et al.* (2003) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออาการเปลือกแข็งที่เกิดขึ้น ระบุว่าความแน่นเนื้อของเปลือกผลขึ้นอยู่กับ ความสูง (แรงที่กระทำ) , ระยะเวลาหลังได้รับแรงกระทำ, วัยและบรรยากาศรอบๆ ผล (ออกซิเจน) โดยยิ่งเพิ่มภาวะมากขึ้นจะส่งผลต่อความแน่นเนื้อที่มากขึ้น

สายชล เกตุษา (2549) ระบุว่า ผักและผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนไม่สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 1-4 องศาเซลเซียส ได้นานเหมือนกับผักและผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตหนาว เพราะจะทำให้ผลิตผลเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (chilling injury) และแนะนำว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนคือประมาณ 10-12 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะมังคุดควรเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-4 สัปดาห์

Dangcham *et al.* (2008) ได้ทดสอบผลกระทบความแน่นเนื้อของเปลือกของมังคุดที่มีผลต่ออุณหภูมิการเก็บรักษาของผลมังคุดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (6 °C) ปรากฏว่า ความแน่นเนื้อของเปลือกมังคุดมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติระหว่างเก็บภายใต้สภาวะออกซิเจนน้อย (0.25%) และสภาวะปกติก็ตาม

มาโนชญ์ (2534) รายงานว่าในมังคุดที่มีการตกกระทบจะสร้างลิกนินขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมๆ กับการแข็งตัวของเปลือกมังคุด โดยมังคุดที่ตกจากที่สูงจะมีการแข็งตัวเร็วกว่าผลที่ตกจากที่ต่ำกว่า และเมื่อนำวัยต่างๆ ของผลมังคุดมาศึกษา พบว่าเปลือกมังคุดสีม่วงแดงเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วภายในเวลา 6 ชั่วโมง ขณะที่ผลที่มีสีเหลืองอ่อนอมเขียวเกิดอาการเปลือกแข็งภายใน 18 ชั่วโมง

รำไพ และ จินตนา (2536) ได้ศึกษาผลของแรงกดต่อคุณภาพของมังคุด พบว่า มังคุดในระยะสีน้ำตาลแดง จะเกิดอาการเปลือกแข็งเมื่อได้รับแรงกดตั้งแต่ 1.5 กิโลกรัมขึ้นไป ในขณะที่มังคุดในระยะสีม่วงแดง จะเกิดอาการเปลือกแข็งเมื่อได้รับแรงกดตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัมขึ้นไป

อาภาภรณ์ (2537) สมศักดิ์ (2538) และ สายชล และ สมศักดิ์ (2539) ได้ศึกษาการแข็งตัวของเปลือกผลมังคุดอันเนื่องจากการตกกระทบ โดยปล่อยให้ผลมังคุดตกกระทบพื้นคอนกรีต พบว่าความแข็งของเปลือกหลังการตกกระทบทันทีมีค่าต่ำกว่าของเปลือกที่ไม่ตกกระทบ แต่ความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการตกกระทบ ส่วนผลที่ไม่ตกกระทบความแข็งจะคงที่ และพบว่าออกซิเจนมีผลต่อการแข็งตัวของเปลือก ส่วนความชื้นของเปลือกพบว่าไม่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของเปลือกผลมังคุดบริเวณที่ตกกระทบ

Jarimopas *et al.* (2007) ได้ออกแบบและทดสอบเครื่องคัดขนาดม้งคุด ผลปรากฏว่า เครื่องมีความสามารถในการคัด 1026 kg/hr และเกิดความเสียหายในจำนวนที่น้อยประมาณ 0.48% โดยความเสียหายเกิดในรูปของอาการแตก

Pushpariksha *et al.* (2006) ได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อความเสียหายของผลม้งคุดเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนที่ระดับ 4 Hz เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาถึงบรรจุภัณฑ์หลายๆ ชนิด ปรากฏว่าบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุดคือ กล่องกระดาษลูกฟูก บรรจุภัณฑ์แบบ Pattern pack 3 ชั้นชนิดถาดหลุม เพราะเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับผลม้งคุดน้อยที่สุด กีบเลี้ยงชำ 23.3% ขั้วชำ 2.2% เปลือกแข็ง 5.6% และเปลือกถลอก 9.3% แต่ยังมีข้อมูลเพิ่มเติมอีกว่าเมื่อใช้บรรจุภัณฑ์ในลักษณะตะกร้าพลาสติกรูปสี่เหลี่ยม บรรจุภัณฑ์แบบสุ่ม ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปนั้น หลังได้รับการทดสอบปรากฏว่า มีความเสียหายในส่วนของเปลือกแข็งสูงที่สุด คือ 48%

พนิดาและบัณฑิต (2549) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล โดยมีความชันในส่วนต้นของกราฟระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้เพื่อบอกความแตกต่างระหว่างม้งคุดดีและม้งคุดเปลือกแข็งได้ อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรสมบัติเชิงกลอื่นๆ ที่นำมาทดลองเปรียบเทียบดูความไวและความแม่นยำในการตรวจสอบปัญหา

มะพร้าว

มะพร้าว (Coconut = โคนัท) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. อยู่ในวงศ์ Palmae เป็นพืชตระกูลปาล์ม มะพร้าวมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ต่อมาแพร่หลายไปยังอเมริกา อินเดีย มาดากัสการ์และแอฟริกา ชาวสเปนเป็นผู้นำไปยังหมู่เกาะเวสต์อินดีส และทะเลแคริบเบียนตอนใต้ แหล่งปลูกและผลิตมะพร้าวในปัจจุบันอยู่ตามหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก ทวีปอเมริกาใต้ ทวีปอเมริกาเหนือ เม็กซิโก อินเดีย ฟิลิปปินส์ ศรีลังกา อินโดนีเซียและมาเลเซีย มะพร้าวสามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย ในประเทศไทยปลูกมากที่จังหวัดชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช (นพพร, 2542)

การจำแนกพันธุ์มะพร้าวมีผู้จำแนกไว้หลายแบบซึ่งแตกต่างกันไป หลักที่ใช้ในการจำแนกพันธุ์มักจะเป็นขนาดของต้น อายุตกผล และขนาดผล พันธุ์มะพร้าวไทยได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกันคือ มะพร้าวพันธุ์ต้นสูง และต้นเตี้ย (พานิชย์, 2544)

มะพร้าวพันธุ์ต้นสูง ลักษณะสำคัญคือ ต้นสูง ออกผลช้า มีสะเกโทกที่โคนต้น ส่วนมากเป็นมะพร้าวที่ปลูกเพื่อใช้น้ำมันในเนื้อมะพร้าวสำหรับประกอบอาหาร หรือใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มักเป็นพันธุ์ต้นสูง พวกนี้มักมีอายุยืน (60-80 ปี หรือมากกว่านั้น) ขึ้นอยู่กับสภาพดิน มักจะต้านทานต่อโรคและแมลงยกเว้นพวกไวรัสที่ทำให้เกิดโรคบางชนิด จะเริ่มติดผลเมื่ออายุประมาณ 8-10 ปีหลังปลูก ในกลุ่มนี้จะแยกพันธุ์ตามสถานที่ที่ขึ้นอยู่ หรือลักษณะของผลที่เห็นเด่นชัด เช่น มะพร้าวหัวลิง ทะลายร้อย ปากจก เปลือกหวาน มะพร้าวใหญ่ มะพร้าวกะโหลก เป็นต้น

มะพร้าวพันธุ์ต้นเตี้ย เป็นพันธุ์ออกผลเร็ว ต้นเตี้ยไม่มีสะเกโทก พันธุ์พวกนี้มักจะติดดอกออกผลในช่วง 3-4 ปีหลังจากปลูก ผลผลิตจะออกเต็มที่ในช่วง 9-10 ปี อายุการให้ผลที่ระดับเศรษฐกิจอยู่ประมาณ 30-40 ปี สีของผลจะมีทั้งสีเหลือง ทอง สีเหลืองงาช้าง สีเขียว สำหรับผลของพันธุ์ต้นเตี้ยจะมีทั้งขนาดผลเล็กและผลใหญ่ พันธุ์ผลเล็กที่สุดในกลุ่มนี้คือ Cocco Nino ในฟิลิปปินส์ ซึ่งปัจจุบันมีการนำไปปลูกกระจายทั่วไปทุกส่วนของโลก มะพร้าวพันธุ์ต้นเตี้ยได้แก่ มะพร้าวหมูสี หมูสีเขียว ทุ่งเคล็ด หมูสีเหลือง มะพร้าวไฟ ปะทิว มะพร้าวอ่อน นกคุ้ม ฯลฯ

มะพร้าวต้นเตี้ยที่นิยมบริโภคในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ มะพร้าวน้ำหอม และมะพร้าวน้ำหวาน โดยมะพร้าวน้ำหอมจะมีกลิ่นหอมในตัวเองคล้ายใบเตย ส่วนมะพร้าวน้ำหวานจะมีรสหวานเพียงอย่างเดียว หนึ่งในมะพร้าวต้นเตี้ย ที่น่าสนใจมากเป็นพิเศษในปัจจุบันคือมะพร้าวอ่อนน้ำหอม ซึ่งเป็นที่ชื่นชอบของผู้คนภายในประเทศและชาวต่างประเทศ มะพร้าวน้ำหอมนี้จัดเป็นมะพร้าวพันธุ์หนึ่ง แต่ในมะพร้าวน้ำหอมด้วยกันยังแยกเป็นชนิดเป็นชนิดได้อีก 3 ชนิด (กลุ่มเกษตรศาสตร์, 2531) มีลักษณะและขนาดของผลแตกต่างกัน ส่วนด้านความหวานและความหอมของน้ำใกล้เคียงกัน ไม่มีชนิดใดเหนือกว่าอย่างชัดเจน มะพร้าวน้ำหอมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่

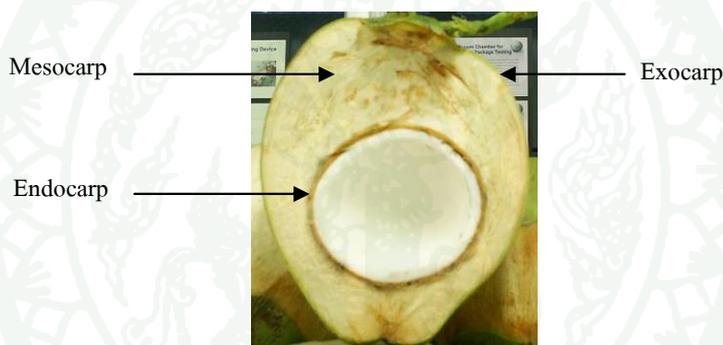
มะพร้าวน้ำหอมชนิดผลยาวหรือผลเล็ก มะพร้าวน้ำหอมชนิดนี้มีขนาดผลเล็ก ลักษณะผลยาวรี ผลภายในหัวท้ายแหลม ทรงผลไม่สวยงาม

มะพร้าวน้ำหอมชนิดผลกลม มะพร้าวน้ำหอมชนิดนี้เป็นขนาดผลใหญ่ที่สุดในบรรดามะพร้าวน้ำหอมด้วยกันคือใหญ่ทั้งขนาดภายนอกและขนาดภายใน มะพร้าวชนิดนี้มีผลกลม มีเปลือกบางกว่ามะพร้าวน้ำหอมชนิดอื่น ปัจจุบันนิยมผลิตมะพร้าวชนิดนี้มาก เนื่องจากตัดแต่งผลได้ง่ายและสวยงามกว่ามะพร้าวน้ำหอมชนิดอื่นๆ

มะพร้าว น้ำหอมชนิดผลรีหรือชนิดก้นจีบ เป็นมะพร้าว น้ำหอมที่มีลักษณะกึ่งกลางระหว่างมะพร้าวผลยาวกับมะพร้าวผลกลม ขนาดผลของมะพร้าว น้ำหอมชนิดก้นจีบมีขนาดใหญ่พอสมควร ถึงขนาดผลจะมีขนาดใหญ่ไม่เท่ากับพันธุ์ลูกผสมก็ตาม

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผลมะพร้าว

ผล (Fruit) ผลมะพร้าวจะมีขนาดโตเต็มที่หลังจากที่มีการผสมเกสรแล้ว 6 เดือน และหลังจากนั้นอีก 6 เดือน ผลก็จะสุกแก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยว ลักษณะของผลเป็นแบบ fibrous drups ที่เรียกกันว่า Tut ขนาดของผล สีของผล จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะประจำพันธุ์ ผลของมะพร้าวหรือเปลือกมะพร้าวนี้ประกอบด้วยชั้นต่างๆ 3 ชั้น (ภาพที่ 8) คือ



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว

Exocarp คือ เปลือกนอกสุดของผล เป็นแผ่นของเส้นใยที่เหนียวและแข็ง เมื่อผลแก่จะมีสีเขียว แดง หรือเหลืองตามลักษณะประจำพันธุ์ สำหรับผลที่แก่และแห้งจัดจะมีสีน้ำตาลเข้ม

Mesocarp เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากเปลือกนอกเข้ามา เมื่อผลยังอ่อนมีลักษณะอ่อนนุ่มบางพันธุ์อาจมีรสหวานรับประทานได้ แต่เมื่อผลแก่จะกลายเป็นชั้นของเส้นใยที่เรียกว่า กาบมะพร้าว (coir) ซึ่งชั้นนี้จะหนาประมาณ 4-8 เซนติเมตร (ตามแต่พันธุ์)

Endocarp เป็นชั้นในสุดที่มีกาบมะพร้าวหุ้มล้อมรอบ เมื่อผลแก่จะมีลักษณะแข็ง สีน้ำตาลดำ ที่เรียกว่า กะลา (husk or shell) ซึ่งผิวด้านนอกของกะลาจะมีสันนูน 3 สัน ที่กะลาด้านที่อยู่ทาง

ข้าวของผลจะมีตาอยู่ 3 ตา carpel ละ 1 ตา โดยมีตาแข็ง 2 ตา และตานิ่มอันใหญ่ 1 ตา ตานิ่มนี้จะอยู่บนส่วนของกะลาอันใหญ่ที่สุด เมื่อมะพร้าวออกหน่อออกมา ต้นอ่อนจะแทงทะลุผ่านตานิ่มอันนี้

ลักษณะและการเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อน

วิธีการที่สามารถใช้สังเกตอายุการเก็บเกี่ยวมะพร้าวที่เหมาะสม (กลุ่มเกษตรสัญจร, 2531) ได้แก่

นับทะลาย นับทะลายที่จะเก็บเกี่ยวเป็นทะลายที่หนึ่ง แล้วนับทะลายที่ออกตามมาเป็นทะลายที่สองและสามไปเรื่อยๆ เมื่อจั่นที่ 12 แทงออกและกาบหุ้มยังไม่แตกเป็นระยะที่มะพร้าวทะลายแรกอยู่ในช่วงที่อ่อนกำลังดี

สังเกตจากหางหนู มะพร้าวที่มีอายุผลมาก จนกะลามีสีดำหางหนูจะแห้งตั้งแต่ข้าวผลไปจนจรดปลาย มะพร้าวอ่อนหางหนูแห้งครึ่งหนึ่ง ส่วนอีกครึ่งหนึ่งยังสดอยู่ วิธีนี้อาจคลาดเคลื่อนได้ในฤดูร้อนที่แดดจัดมากๆ เพราะหางหนูอาจแห้งก่อนกำหนด

สังเกตจากสีผล บริเวณรอยต่อของข้าวกับตัวผลของผลมะพร้าวอ่อนจะมีสีขาวเป็นวงรอบข้าวผล ถ้าสีขาวยังเป็นวงกว้างก็แสดงว่ามะพร้าวยังอ่อนอยู่มาก ต่อเมื่อส่วนสีขาวบริเวณรอยต่อเหลือเพียงเล็กน้อยพอเป็นวงรอบข้าวก็แสดงว่าได้ระยะเก็บเกี่ยวพอดี

การเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อนในระยะที่เหมาะสมจะได้ผลมะพร้าวที่มีคุณภาพดี คือ น้ำมีรสหวาน และมีรสอมเปรี้ยว (พานิชย์, 2544) นอกจากนี้ยังไม่มีการสร้างเนื้ออีกด้วย ในการเก็บเกี่ยวชาวสวนจะแบ่งผลมะพร้าวออกเป็น 3 ประเภทโดยดูจากความหนาของเนื้อเป็นเกณฑ์ คือ

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

มะพร้าวชั้นครึ่ง ผลมะพร้าวมีอายุหลังจากจั่นบานประมาณ 180–185 วัน น้ำเริ่มหวานขึ้น วัดความหวานได้ประมาณ 6.0–6.6 องศาบริกซ์ มะพร้าวเริ่มสร้างเนื้อมากขึ้นจนเกือบเต็มกะลา แต่บริเวณส่วนชั้นของผลยังคงมีลักษณะเป็นวุ้นอยู่บ้าง มะพร้าวชนิดนี้ยังถือว่าอ่อน ไม่เหมาะแก่การขายทั้งผล แต่เหมาะสำหรับบรรจุแก้วใส่ในตู้เย็น ชนิดที่แต่ละแก้วมีทั้งน้ำทั้งเนื้ออยู่ด้วยกัน อย่างไรก็ตามมีผู้บริโภครายชอบบริโภคมะพร้าวแบบชั้นครึ่งนี้เหมือนกัน

มะพร้าวสองชั้น ผลมีอายุหลังจากจั่นบานประมาณ 200–210 วัน น้ำมีรสหวาน วัดความหวานได้ 6.6–7.0 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ มะพร้าวที่มีเนื้อหนาอ่อนนุ่ม เต็มผลแต่ยังไม่แก่จนเกินไป หรือไม่แก่จนเนื้อภายในแข็ง สามารถบริโภคเนื้อได้ทั้งผล ส่วนใหญ่ชาวสวนจะเก็บเกี่ยวมะพร้าวในช่วงนี้

การปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวมะพร้าวอ่อน

การปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวทำหลังการเก็บมะพร้าวมาจากต้น รักษาความสดและคุณภาพให้ดีที่สุดจนถึงมือของผู้บริโภค ซึ่งธนรัตน์ (2550) กล่าวว่า มะพร้าวอ่อนสามารถรับแรงกดได้มากกว่าแรงกระแทกถึง 67 เท่า ดังนั้นในขั้นตอนของการเก็บเกี่ยว การขนส่ง ตลอดจนกระบวนการต่างๆ ก่อนถึงมือผู้บริโภคต้องระมัดระวังไม่ให้มะพร้าวอ่อนถูกกระแทกจะสามารถช่วยลดความเสียหายเนื่องจากการชำได้ ซึ่งขั้นตอนการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวแบ่งออกเป็นดังนี้

การปฏิบัติการขณะเก็บเกี่ยว ข้อควรระวังในการเก็บผลมะพร้าว คือ การชำของผล ซึ่งปกตินิยมใช้คนปีนขึ้นไปเก็บผลมะพร้าว โดยทั่วไปแล้วมะพร้าวอ่อนที่พอเหมาะจะรับประทาน จะได้จากการเริ่มนับจากหลังดอกบาน 7-8 เดือน เนื้อจะนุ่ม น้ำหอมและหวาน การใช้ไม้สอยไม่เป็นที่นิยมเพราะจะทำให้มะพร้าวตกลงมากระแทกดินทำให้ผลชำ เกษตรกรจะเก็บเกี่ยวโดยใช้คนขึ้นเก็บแล้วใช้เชือกผูกทะเลาย ใช้มีดตัดโคนจั่น ค่อยๆ หย่อนลงพื้นผลจะไม่กระทบกระเทือน หรือการโยนลงร่องน้ำระหว่างแถวมะพร้าว หากเกิดผลชำจะนำในเวลาต่อมา ทำให้ส่งออกไม่ได้

การขนส่งผลผลิตออกจากสวน การขนย้ายผลมะพร้าวอ่อนออกจากสวน เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อการส่งออกนั้น จะต้องมีความรวดเร็วเพื่อรักษาคุณภาพผลให้สด การขนส่งผลผลิตอาจใช้รถกระบะหรือรถบรรทุกก็ได้ แต่ระวังอย่าให้เกิดการชำที่เปลือก ต้องระวังระแ

ทะเลาะที่มแทงผลที่อยู่ใกล้กันจนทำให้เกิดความเสียหาย ขณะขนส่งระยะทางไกลๆ และควรมีผ้าคลุมเพื่อป้องกันแสงแดดจัด (จริงแท้, 2549)

การทำความสะอาดผล เริ่มจากการตัดผลมะพร้าวออกจากทะเลาะทีละผล คัดแยกผลไม่สมบูรณ์ หรือมีตำหนิ เป็นโรคและผลเล็กออก นำน้ำสะอาดมาล้างขจัดสิ่งสกปรก เปลี้ยหอยและเปลี้ยเป้งออกจากผลซึ่งอาจติดมาในช่วงที่อยู่ในร่องน้ำในแปลง แล้วใช้ผ้าสะอาดเช็ดผลให้แห้ง

การตัดแต่งผล มะพร้าวอ่อนที่จะหน่ายในตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ (ภาพที่ 9) ต้องได้รับการตัดแต่งผลให้สวยงามได้รูปทรงตามตลาดต้องการ นิยมทำกัน 2 แบบคือ มะพร้าวควั่น เป็นการตัดแต่งให้มะพร้าวมีรูปทรงสวยงาม นำมารับประทาน และสะดวกในการจัดวางผล มะพร้าวเจียนเป็นมะพร้าวที่ต้องเจียนทั้งเปลือกนอก (สีเขียว) และเปลือกในออก แล้วลอกให้ถึงกะลาเหลือเฉพาะส่วนข้าวผลไว้เล็กน้อย นำไปซัดกะลาจนเรียบ โดยใช้เครื่องเจียน การเจียนมะพร้าวทำให้น้ำหนักการส่งออกต่อผลเหลือเพียง 500–600 กรัม จากมะพร้าวควั่นปกติ 1,000–1,200 กรัมต่อผล ซึ่งทำให้สามารถประหยัดค่าขนส่งไปยังตลาดต่างประเทศ (หนึ่งฤทัย, 2542)



ภาพที่ 9 ผลมะพร้าวอ่อนแปรรูปในลักษณะต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

สมบัติเชิงกลของเปลือกมังคุดแห้งภายใต้ภาวะเชิงกล

1. อุปกรณ์

- 1.1. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
- 1.2. เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 1.3. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569
- 1.4. เครื่องมือวัดสมบัติการกระแทก พร้อมระบบประมวลผล
- 1.5. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 1.6. มังคุดสด
- 1.7. มีดและเขียง

2. การทดสอบสมบัติเชิงกลของเปลือกมังคุดแห้งภายใต้ภาวะเชิงกล

ผลมังคุดถูกนำมาจากสวน อ.หลังสวน จ.ชุมพร และ จ.จันทบุรี โดยทำการเลือกผลที่มีขนาดใกล้เคียงกันคือน้ำหนักประมาณ 76-100 กรัม (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) แบ่งเป็นสองวัยคือวัยสีเขียวและวัยสีม่วงดำจากระดับสีของมังคุด 7 ระดับ (กรมวิชาการเกษตร, 2550) ทำการคัดเลือกผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงเชิงกลอื่นๆ ผลมังคุดจะถูกขนส่งจากสวนมาทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ผลมังคุดส่วนหนึ่งจะนำมาทดสอบในเบื้องต้นเพื่อหาแรงกดจนเปลือกแตกและแรงกระแทกจนเปลือกมังคุดแตก เพื่อใช้ในการกำหนดในการทดลองต่อไป

2.1. ศึกษาถึงกลไกการเกิดการแข็งของเปลือกมังคุด

2.1.1. นำมังคุดผลสดปกติให้ภาวะที่ 80 % ของแรงกดแตก ด้วยเครื่องมือวัดสมบัติการกระแทก พร้อมระบบประมวลผล

2.1.2. นำผลม้งคูดที่ได้รับภาระที่ 80% ของแรงกดแตก ไปทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (KAPI)

2.1.3. นำผลม้งคูดสดปกติอีกชุดหนึ่ง ไปทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (KAPI)

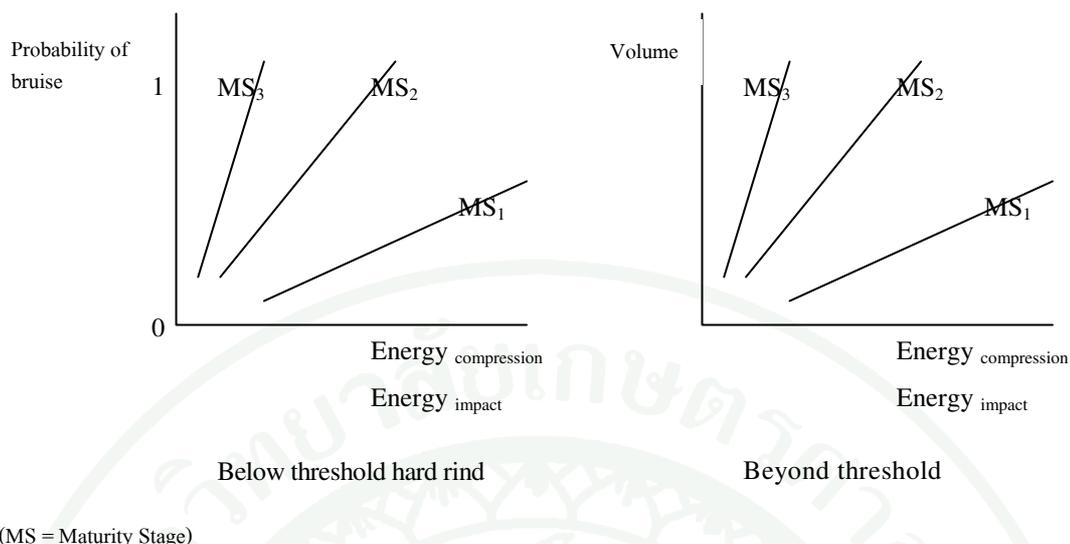
2.2. ศึกษาวิธีการตรวจสอบอาการแข็งของเปลือกของม้งคูด

นำม้งคูดจากสวนทั้ง 2 ระดับสีจำนวน 1200 ผล แบ่งเป็น 2 ชุด (ระดับสีชมพูและระดับสีม่วงดำ) โดยทำการเลือกผลที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ทำการคัดเลือกผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงสิ่งกลอื่น ๆ ผลม้งคูดจะถูกขนส่งจากสวนมาทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน แล้วทำการทดลองโดยให้ภาระกับม้งคูด หลังจากนั้นทำการทดสอบ ด้วยเครื่อง UTM และ เครื่องมือวัดสมบัติการกระแทกพร้อมระบบประมวลผล

2.2.1. ให้ภาระผลม้งคูดกดเกือบสถิตย์ (Quasi-static compression) ตามมาตรฐาน ASAE S368.3 MAR 95 โดยใช้ Spherical indenter ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร กับเครื่อง UTM ด้วยความเร็ว 15 มิลลิเมตรต่อนาที จำนวน 480 ผล (ระดับสีชมพู 240 ผลและระดับสีม่วงดำ 240 ผล) ผลม้งคูดจำนวนทุก 20 ผลจะถูกทำการให้ภาระเริ่มจาก 1 นิวตันเพิ่มครั้งละ 1 นิวตัน จนกระทั่งผลม้งคูดเกิดการแตก

2.2.2. นำผลม้งคูดอีกชุดหนึ่งจำนวน 720 ผล (ระดับสีชมพู 360 ผลและระดับสีม่วงดำ 360 ผล) ให้ภาระแบบกระทำกระแทกโดยใช้อุปกรณ์วัดสมบัติการกระแทกของบัตทิตและอูคมสค์กี (2547) ที่ติดตั้งหัวกระทำจากลูกปืน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยทำการเปลี่ยนพลังงานต่างๆ โดยการเพิ่มความสูงเริ่มจาก 1 เซนติเมตร จนถึง 10 เซนติเมตร เพิ่มครั้งละ 1 เซนติเมตรทุกๆ ม้งคูดจำนวน 20 ผล

2.2.3. ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการผ่าเพื่อตรวจสอบรอยชำที่ เกิดขึ้น แล้วทำการวิเคราะห์ โดยแสดงดังภาพที่ 10



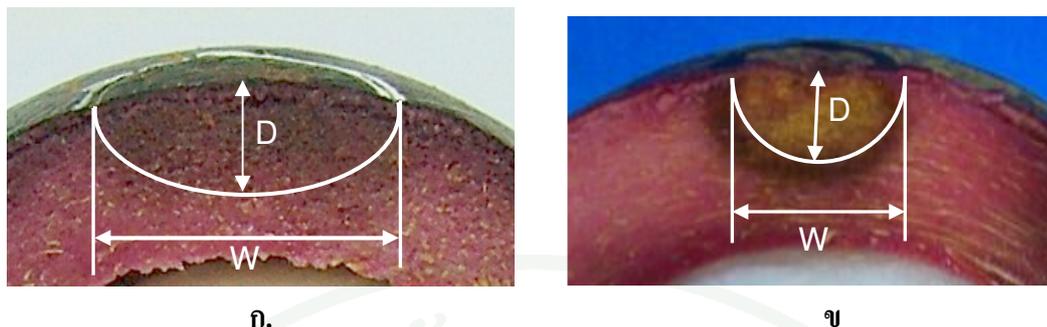
ภาพที่ 10 กราฟความน่าจะเป็นในการช้ำและพื้นที่การช้ำสัมพันธ์กับระดับพลังงานต่างๆ

ทำการทดสอบบันทึกค่าพลังงานทุกๆ การทดสอบแล้วทำการเขียนกราฟดังภาพที่ 10 เพื่อคำนวณหาค่าระหว่าง พลังงานและปริมาตรความช้ำ (beyond threshold) และความน่าจะเป็นของความช้ำและพลังงาน (อาการเปลือกแข็ง) โดยคำนวณจาก

$$\text{ความน่าจะเป็นของการช้ำ} = \frac{\text{จำนวนผลที่ช้ำ}}{\text{จำนวนผลช้ำในแต่ละระดับพลังงาน}} \quad (1)$$

ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดการช้ำ = 1 หมายถึง ผลมั่งคุดปกติที่ถูกทดสอบช้ำทุกผล จุดเริ่มเกิดเปลือกแข็งหมายถึงพลังงานกระทำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้มั่งคุดทุกผลที่ทำการทดสอบเกิดอาการเปลือกแข็ง

การหาปริมาตรเนื้อช้ำ (Chen and Sun, 1981)



ภาพที่ 11 ความกว้างและความลึกของรอยช้ำเปลือกมังคุดที่ถูกกระทำ ก. กดเกือบสถิต
ข. กระทำกระทันหัน

$$\text{ปริมาตรเนื้อช้ำ (Bruise Volume, ภาพที่ 11)} = \frac{\pi}{8} w^2 D \quad (2)$$

โดยที่ w = ความกว้างรอยช้ำ (mm)

D = ความลึกรอยช้ำ (mm)

2.3. การทดสอบเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำให้เกิดอาการมังคุดเปลือกแข็ง

2.3.1. ทำการคัดเลือกผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงเชิงกลอื่นๆ แบ่งเป็นสองวัยคือวัยสีชมพูและวัยสีม่วงดำจากระดับสีของมังคุด 7 ระดับวัยละ 720 ผล

2.3.2. กดผลมังคุดด้วยแผ่นแบนแข็ง (Rigid flat plate) ของ Universal Testing Machine Instron 5569 (UTM) ลงบนแก้มผล ด้วยความเร็ว 15 mm/min (ASAE standard, 1998) เพื่อหาแรงกดแตก ทดสอบจำนวน 20 ช้ำ นำผลที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย โดยแบ่งมังคุดออกเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 60 ผล

ก. กลุ่มที่ 1 ให้แรงกดสูงสุดจนแตก

ข. กลุ่มที่ 2 ให้แรงกดสูงสุดเท่ากับ 80% ของแรงกดแตก

ค. กลุ่มที่ 3 ให้แรงกดสูงสุดเท่ากับ 60% ของแรงกดแตก

ง. กลุ่มที่ 4 ให้แรงกดสูงสุดเท่ากับ 40% ของแรงกดแตก

- จ. กลุ่มที่ 5 ให้แรงกดสูงสุดเท่ากับ 20% ของแรงกดแตก
- ฉ. กลุ่มที่ 6 ไม่ได้รับแรงกระทำ (ปัจจัยควบคุม)

2.3.3. กระทบผลมั่งคุดด้วย อุปกรณ์วัดสมบัติการกระทบของ บัณฑิต และ อุดมศักดิ์ (2547) โดยหัวกระทบทำจากลูกปืนกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ในการทดสอบกับมั่งคุดวัยสี่ชมพูจะใช้หัวกระทบโดยมีน้ำหนักของหัวกระทบ 50 กรัม และในการทดสอบกับมั่งคุดวัยสี่ม่วงดำจะใช้หัวกระทบโดยมีน้ำหนักของหัวกระทบ 40 กรัม โดยแบ่งมั่งคุดออกเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 60 ผล

- ก. กลุ่มที่ 1 ให้แรงกระทบสูงสุดจนแตก
- ข. กลุ่มที่ 2 ให้แรงกระทบสูงสุดเท่ากับ 80% ของแรงกระทบแตก
- ค. กลุ่มที่ 3 ให้แรงกระทบสูงสุดเท่ากับ 60% ของแรงกระทบแตก
- ง. กลุ่มที่ 4 ให้แรงกระทบสูงสุดเท่ากับ 40% ของแรงกระทบแตก
- จ. กลุ่มที่ 5 ให้แรงกระทบสูงสุดเท่ากับ 20% ของแรงกระทบแตก
- ฉ. กลุ่มที่ 6 ไม่ได้รับแรงกระทำ (ปัจจัยควบคุม)

2.3.4. นำผลมั่งคุดที่ได้จากการกระทำในข้อ ค และ ง ทำการเก็บรักษาใน อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

- ก. ทำการเก็บรักษา 0 วัน
- ข. ทำการเก็บรักษา 4 วัน
- ค. ทำการเก็บรักษา 8 วัน

2.3.5. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วย Analysis of Variance (ANOVA) และ Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

การชำและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กันของผลมะพร้าวอ่อนภายใต้ภาวะเชิงกล

1. อุปกรณ์

- 1.1. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
 - 1.2. เวอร์เนียคาลิเปอร์
 - 1.3. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569
 - 1.4. อุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติการชำแบบกระแทก
 - 1.5. หัวทดสอบสี่ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14, 19, 25, และ 32 มม. , ภาพที่ 12)
 - 1.6. มะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอม
 - 1.7. มีดและเขียง
2. การทดสอบการชำและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กันของผลมะพร้าวอ่อน ภายใต้ภาระเชิงกล

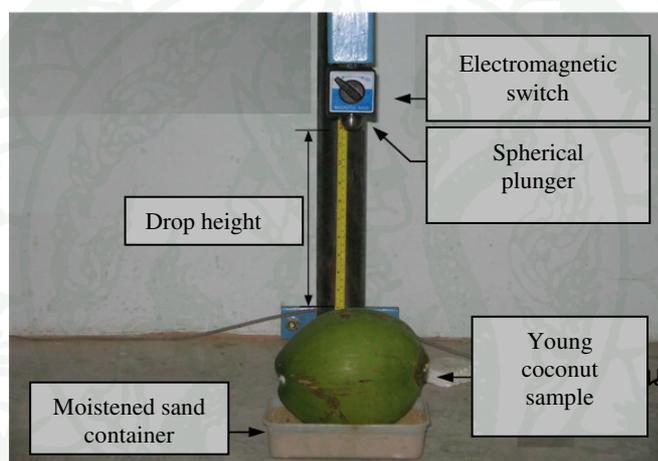
2.1. ให้ภาระมะพร้าวอ่อนแบบกระทำกระแทก (Impact test)

2.1.1. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรชำและพลังงานกดเลขจุดขีดแบ่งเกิดรอยชำ (Beyond Threshold)

สุ่มเลือกผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมที่มีขนาดสม่ำเสมอเก็บใหม่จากสวน อ.บ้านแพ้ว จ.นครปฐม มะพร้าวอ่อนแต่ละลูกถูกวางบนกะบะทรายขึ้น หัวทดสอบทั้งสี่หัวทดสอบ (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14, 19, 25, และ 32 มม. , ภาพที่ 12) จะถูกติดตั้งบนอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติการชำแบบกระแทก (ภาพที่ 13) ที่ละหัว โดยทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของอุปกรณ์ปล่อยหัวทดสอบ 10 ระดับ ตั้งแต่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, และ 50 เซนติเมตร ในหัวทดสอบแต่ละขนาดจะทำการปล่อยผู้ฝิวมะพร้าวอ่อนผลละ 5 จุกรอบผล จำนวน 2 ผล ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการผ่าเพื่อตรวจสอบรอยชำที่เกิดขึ้น แล้วบันทึกผลปริมาตรความชำ (สมการที่ 2) ทำการเลือกขนาดหัวทดสอบที่สามารถให้การกระตุ้นการเกิดความชำในมะพร้าวอ่อนได้มากที่สุด เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

	A	B	C	D
Diameter (mm)	14	19	25	32
Mass (g)	12	24	48	96

ภาพที่ 12 หัวทดสอบขนาดต่างๆ



ภาพที่ 13 อุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติการช้ำแบบกระแทก

คำนวณพลังงานในการปล่อยตกจาก

$$E_i = mgh$$

(4)

โดยที่ E_i = พลังงานในการปล่อยตก (J)

m = มวลของหัวทดสอบ (kg)

g = 9.81 (m/s²)

h = ความสูงของหัวทดสอบ (m)

2.1.2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำและพลังงานกดขณะก่อนจุดขีดแบ่งเกิดรอยซ้ำ (Below Threshold)

สุ่มเลือกผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมที่มีขนาดสม่ำเสมอเก็บใหม่อีกชุดหนึ่งจากสวน อ.บ้านแพ้ว จ.นครปฐม เนื้อหนึ่งชั้นจำนวน 60 ผล เนื้อหนึ่งชั้นครึ่งจำนวน 56 ผล เนื้อสองชั้นจำนวน 76 ผล หัวทดสอบที่ถูกเลือกจากข้อ 2.2.1 ก. จะถูกติดตั้งบนอุปกรณ์ทดสอบหาสมบัติการซ้ำแบบกระแทก โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับ 2.2.1 ก. ปลดปล่อยหัวทดสอบที่ระดับความสูง 16 ถึง 30 , 14 ถึง 27, และ 5 ถึง 23 เซนติเมตร สำหรับมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้น หนึ่งชั้นครึ่ง และเนื้อสองชั้นตามลำดับ จำนวน 5 จุกรอบผล และเพิ่มขึ้นทีละ 1 เซนติเมตร

ทำการเขียนกราฟดังภาพที่ 10 เพื่อคำนวณหาค่าระหว่าง พลังงานและความน่าจะเป็นของความซ้ำ โดยคำนวณจาก สมการที่ 1 ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำ =1 หมายถึง ตำแหน่งของมะพร้าวอ่อนที่ถูกทดสอบซ้ำทุกจุดทุกผล จุดเริ่มเกิดความซ้ำหมายถึง พลังงานกระทำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้มะพร้าวอ่อนทุกผลที่ทำการทดสอบเกิดความซ้ำ

2.2. ให้การมะพร้าวอ่อนแบบกดเกือบสถิตย์ (Quasi-Static compression)

2.2.1. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำและพลังงานกด เลยจุดขีดแบ่งเกิดรอยซ้ำ (Beyond Threshold)

สุ่มเลือกผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมที่มีขนาดสม่ำเสมอเก็บใหม่อีกชุดหนึ่งจากสวน อ.บ้านแพ้ว จ.นครปฐมจำนวนยี่สิบ 16 ผล (เนื้อหนึ่งชั้น, เนื้อหนึ่งชั้นครึ่ง, และเนื้อสองชั้น รวม 48 ผล) มะพร้าวอ่อนแต่ละลูกถูกวางบนกะบะทรายขึ้น หัวทดสอบทั้งสี่หัวทดสอบ (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14, 19, 25, และ 32 มม. , ภาพที่ 12) จะถูกติดตั้งบนเครื่อง UTM ทีละหัว กดส่วนกลางของลูกมะพร้าวด้วยหัวทดสอบซึ่งติดตั้งบนเครื่อง UTM จนเกิดการเปลี่ยนรูป 8 ระดับ ตั้งแต่ 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตรต่อนาที (ASAE Standard , 1998) ในหัวทดสอบแต่ละขนาดจะทำการกดมะพร้าวผลละ 5 จุกรอบผล จำนวน 4 ผล ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการผ่าเพื่อตรวจสอบรอยซ้ำที่เกิดขึ้น แล้วบันทึกผลปริมาตรความซ้ำ (สมการที่ 1) ทำการเลือกขนาดหัวทดสอบขนาดเดียวกับการทดสอบให้การมะพร้าวอ่อนแบบกระทำกระแทก (Impact test)

คำนวณพลังงานการกดจาก

$$E_c = \int F dD_f \quad (3)$$

โดยที่ E_c = พลังงานการกด (J)

F = แรงกดสูงสุด (N)

D_f = ระยะการเปลี่ยนรูปซึ่งสัมพันธ์กับแรงกด (m)

2.2.2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำและพลังงานกดขณะก่อนจุดขีดแบ่งเกิดรอยซ้ำ (Below Threshold)

สุ่มเลือกผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมที่มีขนาดสม่ำเสมอเก็บใหม่อีกชุดหนึ่งจากสวน อ.บ้านแพ้ว จ.นครปฐม หัวทดสอบที่ถูกเลือกจากข้อ 2.2.2 ก. จะถูกติดตั้งบนเครื่อง UTM โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับ 2.2.2 ก. กดส่วนกลางของลูกมะพร้าวด้วยหัวทดสอบซึ่งติดตั้งบนเครื่อง UTM จนเกิดการเปลี่ยนรูป 1 มิลลิเมตร 5 จุกรอบผล จำนวน 4 ผล และเพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิเมตรจนสามารถเห็นความซ้ำทุกจุด ทุกผล

ทำการเขียนกราฟดังภาพที่ 10 เพื่อคำนวณหาค่าระหว่าง พลังงานและความน่าจะเป็นของความซ้ำ โดยคำนวณจาก สมการที่ 1 ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำ =1 หมายถึง ตำแหน่งของมะพร้าวอ่อนที่ถูกทดสอบซ้ำทุกจุดทุกผล จุดเริ่มเกิดความซ้ำหมายถึง พลังงานกระทำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้มะพร้าวอ่อนทุกจุด ทุกผลที่ทำการทดสอบเกิดความซ้ำ

ผลและวิจารณ์

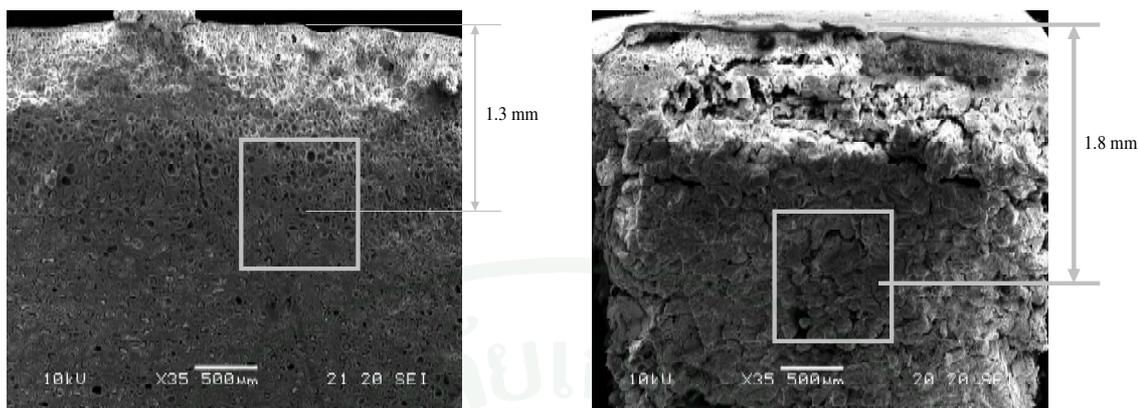
สมบัติเชิงกลของเปลือกมังคุดแข็งภายใต้ภาวะเชิงกล

ผลมังคุดปกติเมื่อได้แรงกระทำลักษณะต่างๆ เช่น การตกกระทบ การบีบ ผลมังคุดจะตอบสนองต่อแรงดังกล่าวโดยจะมีลักษณะของเนื้อเปลือกแข็งขึ้นหรือสามารถบอกได้ว่าเนื้อเปลือกเกิดความเสียหายนั่นเอง

1. กลไกการเกิดการแข็งของเปลือกมังคุด

ผลไม้ส่วนใหญ่ชนิดเช่น แอปเปิ้ล, มะม่วง, มะละกอฯ เมื่อได้รับการกระทำกับผลไม้อาจมีอาการชำรุดขึ้น ซึ่งสามารถทราบได้จากอาการความแน่นเนื้อลดลงหรือนิ่มเพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่มังคุดกลับมีลักษณะตรงกันข้ามคือเมื่อมังคุดได้รับการกระทำ มังคุดจะมีการตอบสนองต่อแรงที่มากกว่านั้น โดยเฉพาะแรงที่มากกว่าแล้วมิได้ทำให้เปลือกมังคุดเกิดบาดแผล เป็นแรงที่มากกว่าที่ไม่ทำให้ผิวมังคุดเกิดรอยแตก แต่เปลือกของมังคุดมีการตอบสนองต่อแรงนั้น โดยสังเกตจากภายนอกได้ยาก โดยทั่วไปจะสามารถสังเกตอาการตอบสนองต่อแรงได้เมื่อมังคุดได้รับแรงไปแล้วสักระยะ ขึ้นอยู่กับระดับแรงที่มากกว่ากับเปลือกมังคุดโดยที่แรงไม่เกินระดับที่ทำให้เปลือกมังคุดเกิดรอยแตก การสังเกตอย่างง่ายว่ามังคุดได้รับแรงกระทำมาหรือไม่คือการบีบเบาๆ ที่เปลือก โดยเปลือกมังคุดจะมีลักษณะแข็งมากขึ้นกว่าเปลือกโดยรอบๆ ที่ไม่ได้รับแรงกระทำ

ในทางสรีรวิทยากล่าวว่า อาการเปลือกแข็งของผลมังคุดเป็นการตอบสนองต่อแรงซึ่งไม่ทำให้เกิดบาดแผลอย่างหนึ่งของผลไม้ (จริงแท้, 2549) ผลไม้เมื่อได้รับการกระทำจะทำให้เกิดความเสียหายที่เซลล์แล้วจะทำให้ น้ำในเซลล์ออกมาเรื่อยๆเซลล์เอง ทำให้เซลล์สูญเสียความแข็งแรงเช่นเดียวกับมังคุด เมื่อได้รับการกระทำจะทำให้ เซลล์แตกและของเหลวภายในเซลล์ออกมาจากเซลล์แต่แตกต่างจากผลไม้อื่นๆ ตรงที่ ของเหลวที่ออกมานี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Ketsa and Atantee, 1998; Bunsiri *et al.*, 2003) ทำให้เกิดลิกนินจนทำให้เปลือกของมังคุดมีอาการแข็ง ดังนั้นอาการเปลือกแข็งของมังคุดถือเป็นอาการชำรุดชนิดหนึ่งของผลไม้อันซึ่งสามารถทราบได้จากภาพเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังภาพที่ 14



ก.

ข.

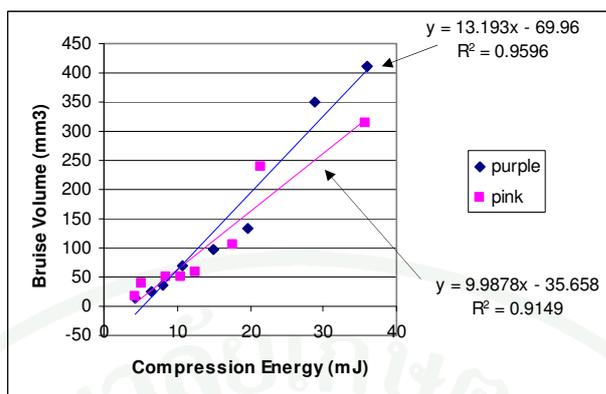
ภาพที่ 14 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ก. เปลือกมังคุดเมื่อได้รับแรงกระทำ
ข. เปลือกมังคุดปกติ

ภาพที่ 14 แสดงเนื้อเยื่อของเปลือกของมังคุดที่ได้รับ ความเสียหาย (ภาพที่ 14ก.) โดยมังคุดที่ได้รับแรงกระทำ 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระแทกแตก เปลือกมังคุดที่ได้รับแรงกระทำจากการกระแทกมีลักษณะความแข็งเพิ่มขึ้นและมีการสะสมลิกนินระหว่างเซลล์ (Ketsa and Atantee, 1998) ดังนั้นเนื้อเยื่อของเปลือกของมังคุดจะมีการสะสมลิกนินระหว่างเซลล์และยังสามารถเห็นเซลล์เป็นวงกลม ในขณะที่เปลือกของผลปกติไม่มีการสะสมดังกล่าว (ภาพที่ 14ข.)

2. วิธีการตรวจสอบอาการแข็งของเปลือกของมังคุด

นำผลมังคุดจากสวน โดยทำการเลือกผลที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ทำการคัดเลือกผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงสิ่งกลอื่น ๆ แล้วทำการทดลองโดยให้ภาระกับมังคุด ในแบบการให้ภาระกดเกือบสถิตย์ด้วยเครื่อง UTM และภาระแบบกระทำกระแทกเครื่องมือวัดสมบัติการกระแทก หลังจากนั้นทำการผ่าเพื่อตรวจสอบรอยชำที่ที่เกิดขึ้น แล้วทำการวิเคราะห์

2.1 การกดเกือบสถิตย์ (Quasi-static compression)



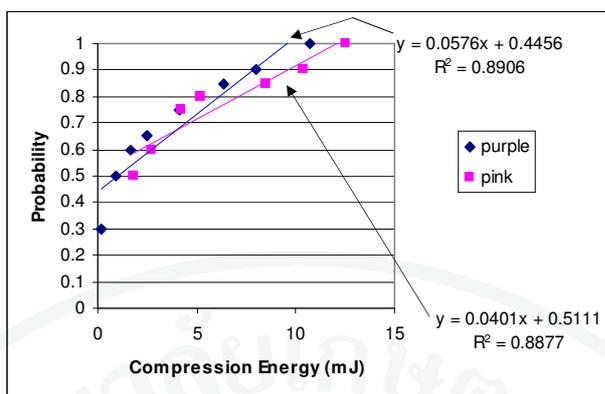
ภาพที่ 15 ปริมาตรความช้ำกับพลังงานแบบกดเกือบสถิตย์

ปริมาตรความช้ำและพลังงานการกดเกือบสถิตย์ มีความสัมพันธ์กันเป็นลักษณะเส้นตรงดังภาพที่ 11 มังคุดทั้งสองระดับมีความมีสมการดังนี้

มังคุดสีม่วงดำ Bruise volume = 13.19 * (พลังงานการกด) - 69.96

มังคุดสีชมพู Bruise volume = 9.99 * (พลังงานการกด) - 35.66

จากสมการเห็นได้ว่า ความชันของมังคุดสีม่วงดำ (13.19) มีความชันมากกว่ามังคุดสีชมพู (9.99) แสดงให้เห็นว่ามังคุดสีม่วงดำ มีความไวต่อพลังงานการกดมากกว่ามังคุดสีชมพู หรือเมื่อมังคุดสีม่วงดำได้รับพลังงานในระดับที่เท่ากับมังคุดสีชมพู มังคุดสีม่วงดำมีการเกิดปริมาตรความช้ำได้มากกว่ามังคุดสีชมพู



ภาพที่ 16 ความน่าจะเป็นของการเกิดการงอกและพลังงานแบบกดเกือบสถิติ

ภาพที่ 16 แสดงความน่าจะเป็นของการเกิดการงอก (P) และพลังงานแบบกดเกือบสถิติของมั่งคุดทั้งสองระดับสี โดยมั่งคุดทั้งสองมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{มั่งคุดสีม่วงดำ} \quad P = 0.058 * (\text{พลังงานการกด}) + 0.446$$

$$\text{มั่งคุดสีชมพู} \quad P = 0.040 * (\text{พลังงานการกด}) + 0.511$$

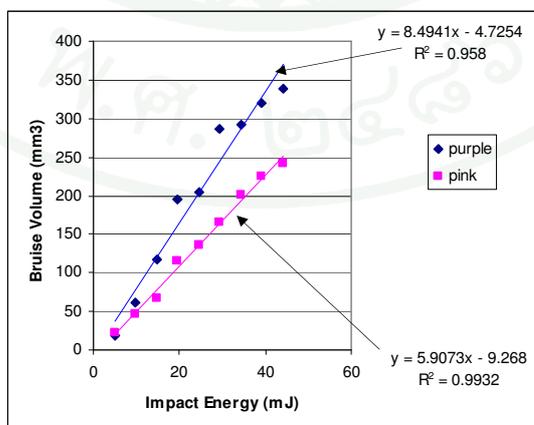
จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดการงอกและพลังงานการกดเกือบสถิติแสดงให้เห็นว่า มั่งคุดสีม่วงดำมีโอกาสเกิดการงอกได้มากกว่ามั่งคุดสีชมพูเห็นได้จากความชันของมั่งคุดสีม่วงดำที่มีค่ามากกว่ามั่งคุดสีชมพู และยังได้ทราบอีกว่า ระดับพลังงานสูงสุดที่จะให้เกิดความน่าจะเป็นในการเกิดความงอกทุกจุด ทุกผล และปริมาณที่ระดับพลังงานดังกล่าวได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดทั้งสองระดับ เมื่อได้รับการกดเกือบสติดัย

Compression		
Maturity	Bruise Volume	Threshold Energy
	(mm ³)	(mJ)
Purple	70.8	10.7
	(40.3)	(1.5)
Pink	57.9	12.6
	(25.6)	(1.3)

จากตารางแสดงปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดทั้งสองระดับ จากการรับการกดเกือบสติดัย โดยในมังคุดสีม่วงดำมีปริมาณความชื้น 70.8 ลูกบาศก์มิลลิเมตรเมื่อได้รับพลังงานขีดแบ่งที่ 10.7 มิลลิจูล และในมังคุดสีชมพูให้ค่าปริมาณที่น้อยกว่าและมีพลังงานขีดแบ่งที่มากกว่าของมังคุดสีม่วงดำคือ ปริมาณความชื้น 57.9 ลูกบาศก์มิลลิเมตรเมื่อได้รับพลังงานขีดแบ่ง 12.6 มิลลิจูล แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่น้อยกว่าของมังคุดสีม่วงดำในการเกิดความน่าจะเป็นในการชำทุกผล ซึ่งในมังคุดสีม่วงดำใช้พลังงานที่ทำให้เกิดความชื้นน้อยกว่าและยังให้ปริมาณความชื้นของเปลือกผลมังคุดมากกว่าของมังคุดสีชมพู บ่งบอกถึงมังคุดสีม่วงดำมีการทนทานต่อระดับพลังงานการกดได้น้อยกว่ามังคุดสีชมพู

2.2 การกระทำกระแทก (Impact Loading)



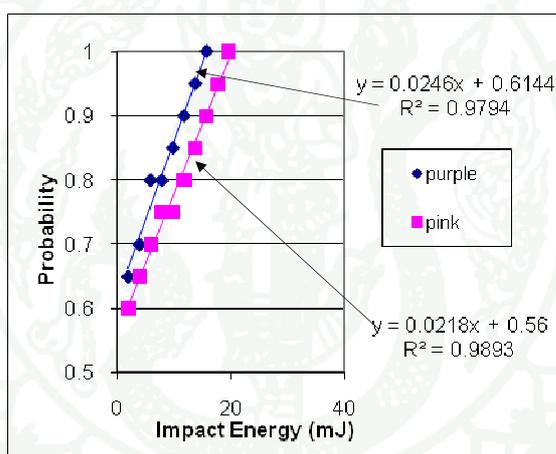
ภาพที่ 17 ปริมาณความชื้นกับพลังงานแบบกระทำกระแทก

ปริมาณความชื้นและพลังงานการกระทำกระทบ มีความสัมพันธ์กันเป็นลักษณะเส้นตรงดังภาพที่ 17 มังคุดทั้งสองระดับมีความมีสมการดังนี้

มังคุดสีม่วงดำ Bruise volume = 8.49 * (พลังงานการกระทำกระทบ) - 4.73

มังคุดสีชมพู Bruise volume = 5.91 * (พลังงานการกระทำกระทบ) - 9.27

จากสมการเห็นได้ว่า ความชันของมังคุดสีม่วงดำ (8.49) มีความชันมากกว่ามังคุดสีชมพู (5.91) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการให้พลังงานการกระทำกระทบ คือแสดงให้เห็นว่ามังคุดสีม่วงดำ มีความไวต่อพลังงานการกดยมากกว่ามังคุดสีชมพู



ภาพที่ 18 ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำและพลังงานแบบกระทำกระทบ

ภาพที่ 18 แสดงความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ (P) และพลังงานแบบกระทำกระทบของมังคุดทั้งสองระดับสี โดยมังคุดทั้งสองมีความสัมพันธ์ดังสมการ

มังคุดสีม่วงดำ P = 0.025 * (พลังงานการกระทำกระทบ) + 0.609

มังคุดสีชมพู P = 0.022 * (พลังงานการกระทำกระทบ) + 0.560

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดการชำและพลังงานการกดเกือบสติดัยแสดงให้เห็นว่า มังคุดสีม่วงดำมีโอกาสเกิดการชำได้มากกว่ามังคุดสีชมพูเห็นได้จาก

ความชื้นของมัจจุคสีม่วงดำที่มีค่ามากกว่ามัจจุคสีชมพู และยังได้ทราบอีกว่า ระดับพลังงานสูงสุดที่จะให้เกิดความน่าจะเป็นในการเกิดความชื้นทุกผล และปริมาตรที่ระดับพลังงานดังกล่าวตั้งในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาตรความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมัจจุคทั้งสองระดับ เมื่อได้รับการกระทำกระทบ

Maturity	Impact	
	Bruise Volume (mm ³)	Threshold Energy (mJ)
Purple	116.3 (56.9)	15.7
Pink	115.0 (54.0)	19.6

จากตารางที่ 2 แสดงปริมาตรความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมัจจุคทั้งสองระดับ จากการรับการกระทำกระทบ โดยในมัจจุคสีม่วงดำมีปริมาตรความชื้น 116.3 ลูกบาศก์มิลลิเมตรเมื่อได้รับ พลังงานขีดแบ่งที่ 15.7 มิลลิจูล และในมัจจุคสีชมพูให้ค่าปริมาตรที่น้อยกว่าไม่มากนักและมีพลังงานขีดแบ่งที่มากกว่าของมัจจุคสีม่วงดำคือ ปริมาตรความชื้น 115.0 ลูกบาศก์มิลลิเมตรเมื่อได้รับพลังงานขีดแบ่ง 19.6 มิลลิจูล ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับลักษณะที่เกิดขึ้นกับการให้พลังงานแบบกดเกือบสติดัตย์คือมัจจุคสีชมพูต้องใช้พลังงานขีดแบ่งมากกว่ามัจจุคสีม่วงดำเพื่อสามารถทำให้เกิดมัจจุคชื้นทุกผล

การให้ภาระลักษณะกระทำกระทบในมัจจุคสีม่วงดำมีพลังงานขีดแบ่งมากกว่าการให้ภาระแบบกดเกือบสติดัตย์ประมาณ 46.73% ในมัจจุคสีชมพู มีพลังงานขีดแบ่งมากกว่าการให้ภาระแบบกดเกือบสติดัตย์ประมาณ 55.55% มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันคือมัจจุคทั้งสองระดับต้องใช้พลังงานขีดแบ่งในการให้ภาระแบบกระทำกระทบมากกว่าการให้ภาระแบบกดเกือบสติดัตย์จึงจะสามารถทำให้เกิดปริมาตรความชื้นทุกผล แต่เมื่อทำการสรุปผลเปรียบเทียบลักษณะการกระทำกับมัจจุคในลักษณะอัตราส่วนระหว่างปริมาตรความชื้นทุกผลที่เกิดขึ้นและพลังงานขีดแบ่งของมัจจุคสีม่วงดำและสีชมพูได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนระหว่างปริมาตรความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดสีม่วงและสีชมพู เมื่อได้รับการกดเกือบสติดิย์และกระทำกระแทก

Maturity	Compression (mm ³ /mJ)	Impact (mm ³ /mJ)
Purple	6.6 (3.7)	7.4 (3.6)
Pink	4.5 (2.3)	5.9 (2.8)

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ของมังคุดสีม่วงและสีชมพู เมื่อได้รับการกดเกือบสติดิย์และกระทำกระแทก โดยมังคุดสีม่วงดำมีค่า 6.6 และ 7.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อมิลลิจูลเมื่อได้รับพลังงานในลักษณะการกดเกือบสติดิย์และพลังงานแบบกระทำกระแทกตามลำดับ ในมังคุดสีชมพูมีค่าอัตราส่วนที่ต่ำกว่าคือมีค่า 4.5 และ 5.9 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อมิลลิจูลเมื่อได้รับพลังงานในลักษณะการกดเกือบสติดิย์และพลังงานแบบกระทำกระแทกตามลำดับ

ถึงแม้ว่า อัตราส่วนของปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพลังงานของการกระทำกระแทกจะมากกว่า การกระทำแบบกดเกือบสติดิย์ก็ตาม หรือเมื่อให้ภาระกับมังคุดในทั้งแบบกดเกือบสติดิย์และแบบกระทำกระแทกที่ 1 มิลลิจูล จะทำให้เกิดปริมาตรความชื้นในการให้ภาระแบบกระทำกระแทกมากกว่า ปริมาตรความชื้นที่เกิดจากการให้ภาระแบบกดเกือบสติดิย์ ดูเหมือนว่าควรหลีกเลี่ยงการให้ภาระแบบกระทำกระแทกเพราะเกิดปริมาตรมากกว่าไม่ว่าจะเป็นมังคุดระดับสีม่วงดำหรือระดับสีชมพู หรือดูเหมือนว่าการให้ภาระกับมังคุดในลักษณะแบบกดเกือบสติดิย์จะเกิดปริมาตรความชื้นน้อยกว่าหรือปลอดภัยในการขนส่ง บรรจุหรือการจัดการอื่นๆ หรือแม้แต่กระทั่งผู้ซื้อเอง เช่นการบีบมังคุดของผู้ซื้อโดยทั่วไปเพื่อคัดเลือกคุณภาพ ดูเหมือนไม่สามารถทำให้เกิดปริมาตรชื้นได้ เพราะเป็นการให้ภาระกับมังคุดคล้ายลักษณะกดเกือบสติดิย์ หรือเกิดปริมาตรชื้นที่น้อยกว่าการกระทำกระแทก แต่จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พลังงานขีดแบ่งของมังคุดระดับสีม่วงดำ เมื่อภาระการกดเกือบสติดิย์มีค่าพลังงานขีดแบ่งต่ำกว่าของ ภาระแบบกระทำกระแทกถึงประมาณ 31.9% ซึ่งหมายความว่าโอกาสที่จะทำให้มังคุดมีโอกาสเกิดปริมาตรความชื้นนั้นง่ายกว่าการให้ภาระแบบกระทำกระแทกถึงแม้จะปริมาตรน้อยกว่า

การกระทำในลักษณะกระแทก เห็นได้ว่ามังคุดสีม่วงดำสามารถเกิดปริมาตรความชื้นได้มากกว่ามังคุดสีชมพู เมื่อให้ภาระเท่ากัน หรือมังคุดสีม่วงดำสามารถต้านทานต่อพลังงานได้น้อยกว่ามังคุดสีชมพู และเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับลักษณะการกระทำแบบเกือบสถิตย์ คือมังคุดสีชมพูมีค่าอัตราส่วนน้อยกว่าเมื่อให้ระดับพลังงานที่เท่ากัน เป็นการเน้นย้ำถึงมังคุดสีชมพูสามารถทนต่อการเกิดความชื้นได้มากกว่ามังคุดสีม่วงดำ

3. ทดสอบปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำให้เกิดอาการมังคุดเปลือกแข็ง

คัดเลือกมังคุดผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงเชิงกลอื่นๆ แบ่งเป็นสองวัยคือวัยสีชมพูและวัยสีม่วงดำจากระดับสีของมังคุด 7 ระดับวัยละ 720 ผล ทำการกดผลมังคุดด้วยแผ่นแบนแข็ง (Rigid flat plate) ของ Universal Testing Machine Instron 5569 (UTM) ลงบนแก้มผล ด้วยความเร็ว 15 mm/min (ASAE standard, 1998) เพื่อหาแรงกดแตก ทดสอบจำนวน 20 ช้ำ และกระแทกผลมังคุดด้วย อุปกรณ์วัดสมบัติการกระแทกของ บัณฑิตและอุดมศักดิ์ (2547) โดยหัวกระแทกทำจากลูกปืนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ในการทดสอบกับมังคุดวัยสีชมพูจะใช้หัวกระแทกโดยมีน้ำหนักของหัวกระแทก 50 กรัม และในการทดสอบกับมังคุดวัยสีม่วงดำจะใช้หัวกระแทกโดยมีน้ำหนักของหัวกระแทก 40 กรัม นำผลมังคุดที่ได้จากการกระทำเบื้องต้นทำการเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 0, 4 และ 8 วันตามลำดับ

3.1 ทดสอบมังคุดโดยใช้แผ่นแบนแข็ง (Rigid Flat Plate)

ทำการจำลองการกระทำกับผลมังคุดโดยใช้แผ่นแบนแข็งกดแบบเกือบสถิตย์กับมังคุดแล้วหาดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อจากผลมังคุดที่ได้แรงกระทำและทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ

3.1.1 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลมังคุด

ตารางที่ 4 ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm/s}^3$) ของผลม้งคุดระยะมะม่วงดำที่ได้รับการระกดเกือบ สติลย์ที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of compression to rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	0.350 ^{ab*} (0.078)	0.349 ^{ab} (0.099)	0.330 ^a (0.096)	0.372 ^{abc} (0.174)	0.397 ^{abcd} (0.141)	0.402 ^{abcd} (0.166)
4	0.399 ^{abcd} (0.077)	0.426 ^{abcde} (0.148)	0.428 ^{abcde} (0.093)	0.480 ^{cdef} (0.170)	0.467 ^{bcde} (0.132)	0.630 ^{gh} (0.154)
8	0.413 ^{abcd} (0.090)	0.498 ^{def} (0.120)	0.515 ^{def} (0.278)	0.543 ^{fgh} (0.249)	0.583 ^{fg} (0.257)	0.705 ^h (0.221)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 4 แสดงค่าของดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะมะม่วงดำที่ได้รับการระกดแบบแผ่นแบนแข็งที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับดัชนีความแน่นเนื้อ เมื่อวันที่ 4 หลังจากม้งคุดได้รับการระกด สำหรับม้งคุดวัยสีม่วงดำที่ได้รับการระกดกระทำ ค่าดัชนีความแน่นเนื้อสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเปลือกโดยดัชนีความแน่นเนื้อมีแนวโน้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับผลม้งคุดไม่ถูกระกดกระทำสอดคล้องกับการรายงานของ Bunsiri *et al.* (2003) สำหรับวันเก็บรักษาที่ 8 ที่วันเก็บรักษาหนึ่งๆ ดัชนีความแน่นเนื้อ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการระกด และที่ระดับการระกดเดียวกันวันเก็บรักษานานขึ้นดัชนีความแน่นเนื้อจะสูงขึ้น โดยการเก็บรักษาตามธรรมชาติอุณหภูมิห้อง ผลม้งคุดไม่ได้ถูกระกดกระทำ จะแข็งขึ้น $\cong 18\%$ จากเดิมเมื่อเก็บไว้ 8 วัน แต่จะแข็งเป็น 1.4 และ 1.6 เท่าเมื่อถูกระกดกระทำที่ 20 และ 80% ของการระกดทำงานแตกหลังเก็บไปแล้ว 8 วัน

ตารางที่ 5 ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm/s}^3$) ของผลม้งคุดระยะชมพูที่ได้รับการระกคเกือบ สติตย์ที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of compression to rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	0.362 ^{a*} (0.069)	0.387 ^{ab} (0.194)	0.366 ^a (0.184)	0.400 ^{abc} (0.200)	0.422 ^{abc} (0.165)	0.435 ^{abc} (0.213)
4	0.419 ^{abc} (0.087)	0.421 ^{abc} (0.119)	0.433 ^{abc} (0.123)	0.427 ^{abc} (0.138)	0.445 ^{abc} (0.188)	0.500 ^{abc} (0.282)
8	0.443 ^{abc} (0.105)	0.465 ^{abc} (0.142)	0.517 ^{bc} (0.226)	0.526 ^c (0.156)	0.637 ^d (0.214)	0.698 ^d (0.201)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 5 แสดงค่าของดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพูที่ได้รับการระกคแบบแผ่นแบนแข็งที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับดัชนีความแน่นเนื้อ ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพูมีแนวโน้มในทางเดียวกับผลม้งคุดระยะสีม่วงดำ ม้งคุดวัยสีชมพูในวันเก็บรักษาที่ 4 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดที่ได้รับการและไม่ได้ รับการระกค ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8 ผลม้งคุดที่เก็บรักษาตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องจะแข็งขึ้น $\cong 22\%$ จากเดิม ที่การระกค 80% สูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อที่ การระกค 60% และสูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อตัวควบคุม ดัชนีความแน่นเนื้อที่การระกค 20% ไม่แตกต่างกับตัวควบคุมเมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8

3.1.2 ความแน่นเนื้อของผลม้งคุด

ตารางที่ 6 ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการระกดเกือบสัปดาห์ที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of compression to rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	4.828 ^{a*} (1.386)	4.649 ^a (3.764)	4.851 ^a (2.269)	4.615 ^a (2.180)	5.443 ^{ab} (2.147)	5.497 ^{ab} (2.732)
4	5.404 ^{ab} (2.109)	5.555 ^{ab} (1.952)	5.807 ^{ab} (2.036)	5.810 ^{ab} (1.409)	5.888 ^{ab} (2.397)	7.696 ^{cd} (1.408)
8	5.510 ^{ab} (1.480)	5.842 ^{ab} (1.648)	7.215 ^{bcd} (4.128)	7.251 ^{bcd} (4.124)	7.490 ^{bcd} (3.086)	8.883 ^d (1.650)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 6 แสดงค่าของความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการระกดแบบแผ่นแบนแข็งที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับความแน่นเนื้อ เมื่อวันที่ 4 หลังจากม้งคุดได้รับการระกด สำหรับม้งคุดวัยสีม่วงดำที่ได้รับการระกดกระทำ ค่าความแน่นเนื้อสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเปลือกโดยความแน่นเนื้อมีแนวโน้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับผลม้งคุดไม่ถูกระกดกระทำสอดคล้องกับดัชนีความแน่นเนื้อและการรายงานของ Bunsiri *et al.* (2003) สำหรับวันเก็บรักษาที่ 8 ที่วันเก็บรักษาหนึ่งๆ ความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการระกด และที่ระดับการระกดเดียวกันวันเก็บรักษานานขึ้นความแน่นเนื้อจะสูงขึ้น โดยการเก็บรักษาตามธรรมชาติอุณหภูมิห้อง ผลม้งคุดไม่ถูกระกดกระทำจะเพิ่มขึ้น $\cong 14\%$ จากเดิมเมื่อเก็บไว้ 8 วัน แต่จะแข็งเป็น 1.2 และ 1.6 เท่าเมื่อถูกระกดกระทำที่ 20 และ 80% ของการระกดทำงานแตกหลังเก็บไปแล้ว 8 วัน

ตารางที่ 7 ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลม้งคุดระยะชมพู่ที่ได้รับการกดเกือบสติดั้ยที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of compression to rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	4.813 ^{a*} (0.893)	4.912 ^a (2.522)	4.976 ^{ab} (3.119)	5.218 ^{ab} (3.011)	5.772 ^{ab} (2.632)	6.261 ^{ab} (2.264)
4	5.524 ^{ab} (1.807)	5.399 ^{ab} (1.594)	5.606 ^{ab} (2.213)	5.685 ^{ab} (2.615)	5.690 ^{ab} (3.023)	6.786 ^{bc} (1.912)
8	5.678 ^{ab} (1.893)	5.540 ^{ab} (2.839)	6.010 ^{ab} (1.838)	6.321 ^{ab} (3.235)	8.031 ^{cd} (2.141)	8.809 ^d (2.479)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the $\alpha = 0.05$ level.

ตารางที่ 7 แสดงค่าของความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพู่ที่ได้รับการกดแบบแผ่นแบนแข็งที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับความแน่นเนื้อ ความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพู่มีแนวโน้มในทางเดียวกับผลม้งคุดระยะสีม่วงดำ ม้งคุดวัยสีชมพูในวันเก็บรักษาที่ 4 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดที่ได้รับและไม่ได้รับการกดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8 ผลม้งคุดที่เก็บรักษาตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องจะเพิ่มขึ้น $\cong 17\%$ จากเดิม ที่การกด 80% สูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อที่การกด 60% และสูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อตัวควบคุม ดัชนีความแน่นเนื้อที่การกด 20% ไม่แตกต่างกับตัวควบคุมเมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8

3.2 ทดสอบผลม้งคุดโดยใช้เครื่องสมบัติการกระแทก

ทำการจำลองการกระทำกับผลม้งคุดโดยเครื่องสมบัติการกระแทกกับม้งคุดแล้วทำการหาดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อจากผลม้งคุดที่ได้แรงกระทำและทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ

3.2.1 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุด

ตารางที่ 8 ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9$ mm/s³) ของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการระบบ
กระทำกระทะแตกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of impact force to impact rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	0.322 ^{a*}	0.541 ^{abcd}	0.559 ^{bcd}	0.570 ^{bcd}	0.623 ^{cd}	0.736 ^{de}
	(0.102)	(0.160)	(0.186)	(0.255)	(0.216)	(0.223)
4	0.328 ^a	0.511 ^{abc}	0.707 ^{cd}	0.902 ^{ef}	0.926 ^{ef}	0.955 ^f
	(0.089)	(0.210)	(0.318)	(0.361)	(0.417)	(0.523)
8	0.372 ^{ab}	0.554 ^{bcd}	0.989 ^f	0.979 ^f	0.990 ^f	0.995 ^f
	(0.112)	(0.273)	(0.348)	(0.327)	(0.246)	(0.304)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 8 แสดงค่าของดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการระบบกระทำกระทะแตกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับดัชนีความแน่นเนื้อ เมื่อวันที่ 4 หลังจากม้งคุดได้รับการกระด สำหรับม้งคุดวัยสีม่วงดำที่ได้รับการกระทำ ค่าดัชนีความแน่นเนื้อสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเปลือกโดยดัชนีความแน่นเนื้อจะมีแนวโน้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับผลม้งคุดไม่ถูกกระทำกระดกระทำสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาก สำหรับวันเก็บรักษาที่ 8 ที่วันเก็บรักษาหนึ่งๆ ดัชนีความแน่นเนื้อจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการกระด และที่ระดับการกระดเดียวกันวันเก็บรักษานานขึ้นดัชนีความแน่นเนื้อจะสูงขึ้น โดยการเก็บรักษาตามธรรมชาติอุณหภูมิห้อง ผลม้งคุดไม่ได้ถูกกระทำกระดจะแข็งขึ้น \cong 15% จากเดิมเมื่อเก็บไว้ 8 วัน แต่จะแข็งเป็น 1.7 และ 3.1 เท่าเมื่อถูกกระทำกระดกระทำที่ 20 และ 80% ของการกระทำจนแตกหลังเก็บแล้ว 8 วัน

ตารางที่ 9 ค่าของดัชนีความแน่นเนื้อ ($\times 10^9 \text{ mm/s}^3$) ของผลม้งคุดระยะชมพู่ที่ได้รับการระบบ
กระทำกระทะแตกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of impact force to impact rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	0.314 ^{a*} (0.084)	0.421 ^{ab} (0.126)	0.466 ^{ab} (0.188)	0.590 ^{bc} (0.162)	0.757 ^{cd} (0.371)	0.702 ^{cd} (0.288)
4	0.321 ^a (0.064)	0.485 ^{ab} (0.168)	0.530 ^b (0.259)	0.796 ^d (0.320)	0.763 ^d (0.365)	0.825 ^{dc} (0.290)
8	0.373 ^a (0.096)	0.553 ^{bc} (0.154)	0.786 ^d (0.263)	0.855 ^{dc} (0.337)	0.970 ^c (0.312)	0.986 ^c (0.312)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 9 แสดงค่าของดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพู่ที่ได้รับการกระทำระบบกระทะแตกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับดัชนีความแน่นเนื้อ ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพู่มีแนวโน้มในทางเดียวกับผลม้งคุดระยะสีม่วงดำ ม้งคุดวัยสีชมพูในวันเก็บรักษาที่ 4 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดที่ได้รับการและไม่ได้รับการกระทำ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8 ผลม้งคุดที่เก็บรักษาตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องจะเพิ่มขึ้น $\cong 18\%$ จากเดิม ที่การกระทำ 80% สูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อที่การกระทำ 60% และสูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อตัวควบคุม ดัชนีความแน่นเนื้อที่การกระทำ 20% แตกต่างกับตัวควบคุมเมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8

3.2.2 ความแน่นเนื้อของผลม้งคุด

ตารางที่ 10 ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการแบบกระทำ
กระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of impact force to impact rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	4.109 ^{a*}	7.877 ^b	8.126 ^b	8.256 ^b	8.273 ^b	8.869 ^{bc}
	(1.693)	(3.197)	(3.142)	(2.809)	(3.076)	(4.097)
4	4.426 ^a	9.778 ^{bcd}	10.435 ^{bcde}	12.021 ^{de}	12.297 ^{de}	12.901 ^e
	(2.363)	(4.441)	(4.254)	(3.132)	(4.003)	(3.869)
8	4.728 ^a	11.008 ^{cde}	16.714 ^f	17.345 ^f	17.484 ^f	17.503 ^f
	(2.237)	(4.547)	(4.148)	(4.439)	(6.066)	(6.066)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 10 แสดงค่าของความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะม่วงดำที่ได้รับการกระทำแบบกระทำกระแทกที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับความแน่นเนื้อ เมื่อวันที่ 4 หลังจากม้งคุดได้รับการกระทำ สำหรับม้งคุดวัยสีม่วงดำที่ได้รับการกระทำ ค่าความแน่นเนื้อสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเปลือกโดยความแน่นเนื้อมีแนวโน้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับผลม้งคุดไม่ถูกกระทำสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา สำหรับวันเก็บรักษาที่ 8 ที่วันเก็บรักษาหนึ่งๆ ความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการกระทำ และที่ระดับการกระทำเดียวกันวันเก็บรักษานานขึ้นความแน่นเนื้อจะสูงขึ้น โดยการเก็บรักษาตามธรรมชาติอุณหภูมิห้อง ผลม้งคุดไม่ได้ถูกกระทำจะเพิ่มขึ้น $\cong 15\%$ จากเดิมเมื่อเก็บไว้ 8 วัน แต่จะแข็งเป็น 2.7 และ 4.3 เท่าเมื่อถูกกระทำกระทำที่ 20 และ 80% ของการกระทำจนแตกหลังเก็บแล้ว 8 วัน

ตารางที่ 11 ค่าของความแน่นเนื้อ (N/mm) ของผลม้งคุดระยะชมพูที่ได้รับภาวะแบบกระทำ
กระทำที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา

days	Ratio of impact force to impact rupture force					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	3.600 ^{a*}	5.414 ^{ab}	7.156 ^{bcd}	7.106 ^{bcd}	7.220 ^{bcd}	8.407 ^d
	(1.014)	(1.850)	(1.951)	(2.340)	(1.963)	(3.008)
4	3.705 ^a	7.695 ^{cd}	8.398 ^d	11.317 ^e	12.173 ^{ef}	12.473 ^{ef}
	(1.924)	(2.905)	(2.721)	(4.465)	(4.026)	(3.840)
8	4.213 ^a	9.082 ^d	9.175 ^d	12.120 ^e	13.301 ^{ef}	14.196 ^f
	(3.495)	(2.089)	(4.047)	(4.362)	(3.972)	(3.228)

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

ตารางที่ 11 แสดงค่าของความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพูที่ได้รับภาวะกดแบบกระทำกระทำที่ระดับต่างๆ และวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ กับความแน่นเนื้อ ความแน่นเนื้อของผลม้งคุดระยะชมพูมีแนวโน้มในทางเดียวกับผลม้งคุดระยะสีม่วงดำ ม้งคุดวัยสีชมพูในวันเก็บรักษาที่ 4 ดัชนีความแน่นเนื้อของผลม้งคุดที่ได้รับและไม่ได้รับภาวะกดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 8 ผลม้งคุดที่เก็บรักษาตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องจะแข็งขึ้น $\cong 17\%$ จากเดิม ที่ภาวะกด 80% สูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อที่ภาวะกด 60% และสูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อตัวควบคุม ดัชนีความแน่นเนื้อที่ภาวะกด 20% แตกต่างกับตัวควบคุมเมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 4

ดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อม้งคุดได้รับภาวะทั้งแบบกดเกือบสถิตย์ด้วยแผ่นแบนแข็ง และการให้ภาวะแบบกระทำกระทำ โดยแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อรับภาวะมากขึ้น และเพิ่มขึ้นเมื่อวันเก็บรักษานานขึ้นสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Bunsiri *et al.*, 2003) ถึงแม้ม้งคุดซึ่งถูกเก็บตามธรรมชาติอุณหภูมิห้องจนถึงวันที่ 8 ของการเก็บรักษา จะมีค่าดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความต่างทางสถิติ แต่ดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับภาวะเกิดจากอาการเปลือกแข็งเนื่องจากการตอบสนองต่อการกระทบกระเทือนทางกลโดยไม่เกิดบาดแผลในพืช (จริงแท้, 2549) โดยการสะสมของลิกนิน (Ketsa and Atantee, 1998) ภายในเซลล์ของเปลือกซึ่งได้รับความเสียหาย พินดาและบัณฑิต (2549) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยมีความชันในส่วนต้นของกราฟระหว่างแรงและการเปลี่ยน

รูปเท่านั้นหรือค่าความแน่นเนื้อที่สามารถนำมาใช้เพื่อบอกความแตกต่างระหว่างมังคุดดีและมังคุดเปลือกแข็งได้ ซึ่งสอดคล้องกับการใช้ดัชนีความแน่นเนื้อ ก็สามารถบ่งบอกได้ถึงอาการแข็งที่เกิดขึ้นของความแข็งของเปลือกที่เพิ่มขึ้นได้ทั้งได้รับการและไม่ได้รับการ และยังเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายอีกด้วย

4. การนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้

Bollen (1993) and Pang *et al.* (1994) อ้างว่าการกระแทกระหว่างผลไม้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายในการระบบเกี่ยวกับวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ความเร็วสูงสุดที่กระทบกันระหว่างผลไม้เป็นค่าที่สามารถช่วยในการออกแบบการคัดแยกขนส่ง บรรจุเกี่ยวกับผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะมังคุด สมมติผลมังคุดมีคุณลักษณะสมบัติยืดหยุ่น

$$D \text{ (Chen } et al., 1996) = \left[\frac{5 V^2}{4 n n_1} \right]^{2/5} \quad (5)$$

$$n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$$

$$n = \frac{4 E}{3 (1 - \mu^2)} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/2}$$

ที่ซึ่ง	D	=	การเปลี่ยนรูปมากที่สุดของทรงกลม (mm)
	V	=	ความเร็วก่อนชนของทรงกลม (m/s ²)
	m ₁	=	มวลของทรงกลมหนึ่ง (kg)
	m ₂	=	มวลของทรงกลมหนึ่ง (kg)
	E	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของทรงกลม (Pa)
	μ	=	Poisson's ratio ของทรงกลม
	R ₁	=	รัศมีความโค้งของทรงกลม (m)
	R ₂	=	รัศมีความโค้งของทรงกลม (m)

เมื่อหัวกระแทกขนาด 13 กรัมกระแทกกับม้งคูดสีม่วงดำ เช่นเดียวกับการกระแทกของทรงกลมยืดหยุ่น 2 ลูกชนกัน จากตารางที่ 1 ระดับพลังงานขีดแบ่งสำหรับม้งคูดสีม่วงดำคือ 15.7 มิลลิจูล ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงคือ

$$\text{ความสูง} = \frac{\text{พลังงาน}}{\text{มวล} \times \text{ความเร่ง (g)}}$$

$$\text{ความสูง} = \frac{0.0157}{0.013 \times 9.807 \text{ (g)}}$$

$$= 0.123 \text{ เมตร หรือ } 123 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นความเร็วสุดท้ายก่อนกระทบจึงมีค่า

$$\begin{aligned} \text{ความเร็ว} &= \sqrt{2gh} \\ &= \sqrt{2 \times 9.807 \times 0.123} \\ &= 1.55 \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

เมื่อทำการพิจารณา ให้เป็นการชนกันระหว่างหัวกระแทกและม้งคูด

เมื่อ หัวกระแทกหนัก	0.013 กิโลกรัม
รัศมีความโค้งของหัวกระแทก	0.003 เมตร
ม้งคูดหนัก	0.080 กิโลกรัม
รัศมีความโค้งของม้งคูด	0.025 เมตร
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของม้งคูด	9,920 ปาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง	0.25

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 5 จะได้ดังนี้

$$n_1 = (0.013+0.080) / (0.013 \times 0.080) = 89.42 \text{ kg}^{-1}$$

$$n_2 = \frac{4}{3} \times \frac{9920}{1-(0.25)^2} \left[\frac{0.003 \times 0.025}{0.003+0.025} \right]^{1/2} = 730.18 \text{ kg}/(\text{s}^2 \text{ m}^{1/2})$$

$$D = \left(\frac{5}{4} \frac{1.50^2}{(730.18)(89.42)} \right)^{2/5} = 0.0184 \text{ m}$$

ในกรณีที่ผลมั่งคุดเกิดการชนกันเองระหว่างมั่งคุดด้วยกัน โดยมีขนาดผลเท่ากัน และการชนกันไม่เกิน bioyield point จึงได้สมการใหม่ดังนี้

$$n_1 = \frac{2}{m_2} = \frac{2}{0.080} ; n_2 = \frac{4}{3} \times \frac{9920}{1-(0.25)^2} \left[\frac{R_2}{2} \right]^{1/2} = 1.41 \times 10^4 \left[\frac{0.025}{2} \right]^{1/2}$$

$$n_1 \cong 89.42 \text{ kg}^{-1} ; n_2 = 730.18 \text{ kg}/(\text{s}^2 \text{ m}^{1/2})$$

จากสมการที่ 5

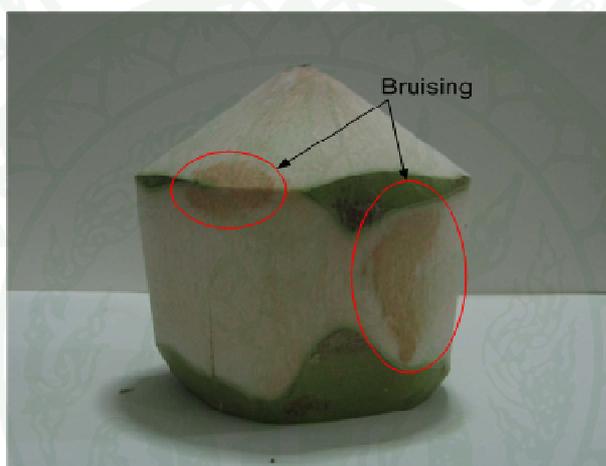
$$D = 0.0184 = \left(\frac{5}{4} \frac{V^2}{(89.42)(730.18)} \right)^{2/5}$$

$$V \cong 1.55 \text{ m/s}$$

ดังนั้นมั่งคุดจะต้องมีความเร็วไม่เกิน 1.55 เมตรต่อวินาที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยชำ หรือ หลีกเสี่ยงการเกิดการเปลือกแข็งในมั่งคุดสีม่วงดำ

การชำและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กันของผลมะพร้าวอ่อน ภายใต้ภาระเชิงกล

มะพร้าวอ่อนตามตลาด โดยทั่วไปสามารถพบเห็นรอยชำ (ภาพที่ 19) ได้บ่อยทั้งแบบขายส่ง และขายปลีก รอยชำที่พบจะมีรูปร่างไม่แน่นอน บางรอยปรากฏอยู่บนผิว บางรอยเกิดรอยชำมาก จนกินเข้าไปถึงส่วนที่เป็นกะลา มะพร้าวอ่อนเมื่อเกิดรอยชำแล้วไม่สามารถจุ่มสารฟอกขาวเพื่อลบ รอยชำได้ จำเป็นต้องปอกออกอย่างเดียว ดังนั้นวิธีการป้องกัน จึงดูเป็นทางเดียวที่จะทำให้มะพร้าว อ่อนยังคงมีคุณภาพในการจำหน่าย

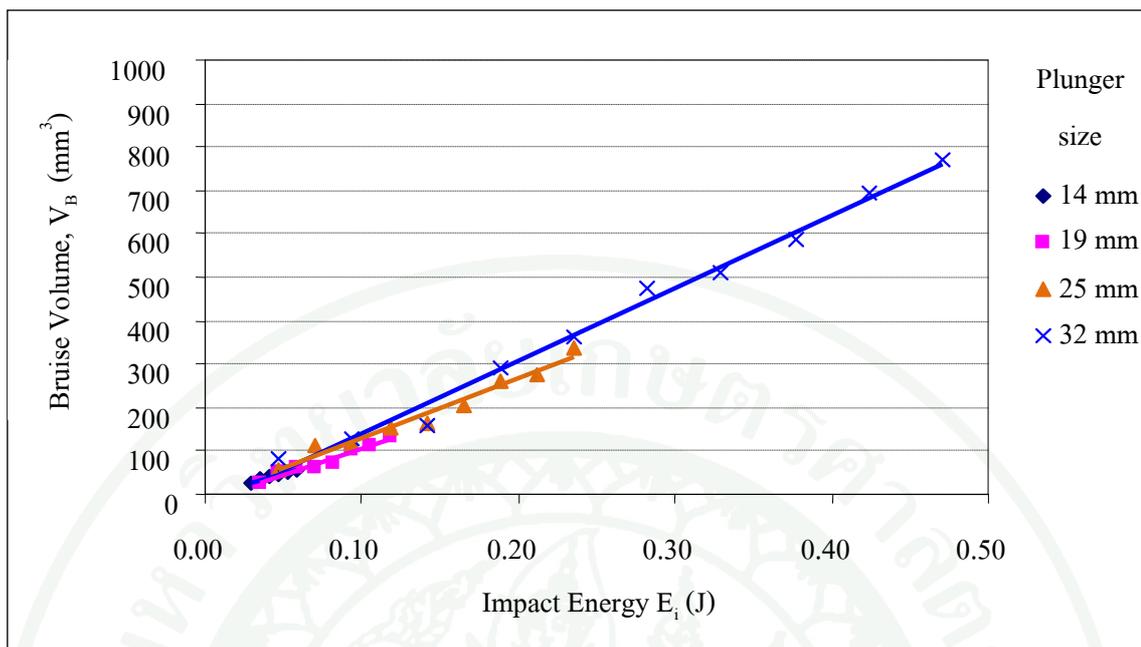


ภาพที่ 19 ลักษณะรอยชำของผลมะพร้าวอ่อน

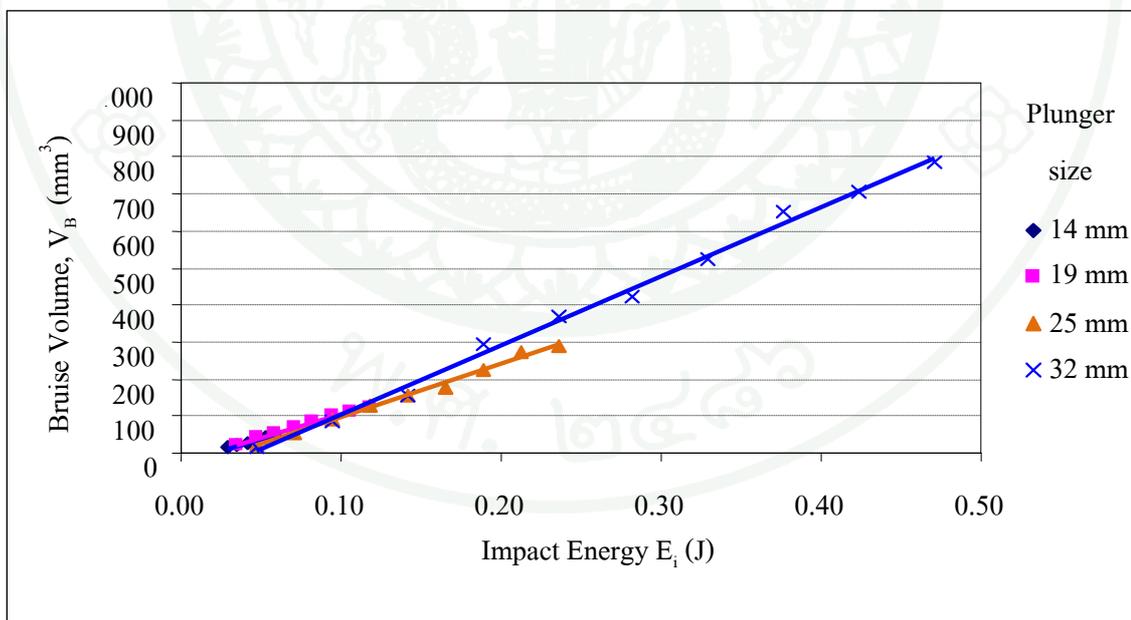
1. มะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระแบบกระทำกระทบ (Impact test)

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรชำและพลังงานกระทำแตกเฉยจุดขีดแบ่งเกิดรอยชำ (Beyond Threshold)

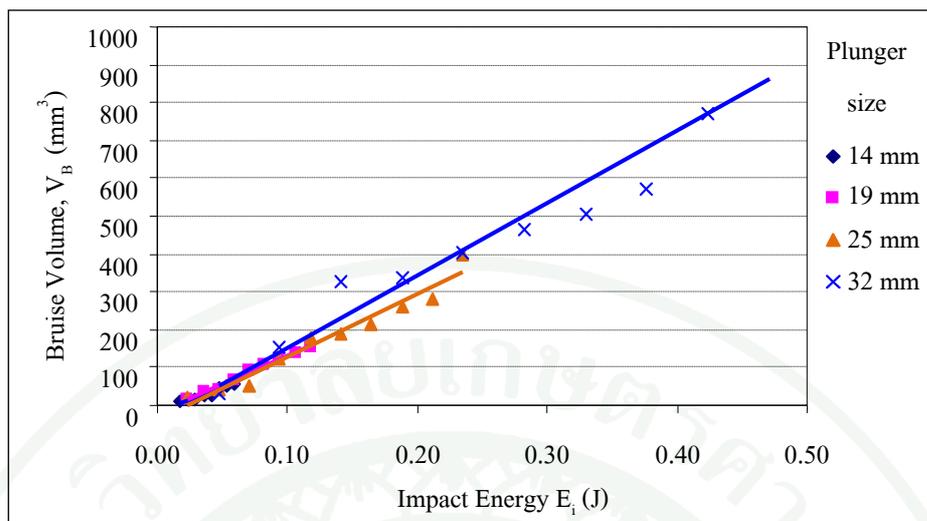
เมื่อนำค่าปริมาตรชำ (V_B) กับพลังงานกระทำแตก (E) ของหัวทดสอบทั้ง 4 ขนาด มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ (ภาพที่ 20-22) พบว่าปริมาตรชำเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อพลังงานกระทำแตกสูงขึ้น



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระแทกของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นเมื่อกระแทกด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระแทกของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นครึ่งเมื่อกระแทกด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ใช้ในการกระแทกของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้นเมื่อกระแทกด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ

ตารางที่ 12 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรซ้ำ (V_B) กับพลังงานกระแทก (E_i) ที่ใช้ในการกระแทกของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อทดสอบด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ

Maturity	Plunger size (mm)	Regression line	R^2
Immature	14	$V_B = 998.6E_i - 3.5$	0.97
	19	$V_B = 1193.9E_i - 14.3$	0.96
	25	$V_B = 1375.1E_i - 7.7$	0.96
	32	$V_B = 1677.6E_i - 29.2$	0.99
Mature	14	$V_B = 1172E_i - 21.5$	0.98
	19	$V_B = 1259E_i - 20.4$	0.99
	25	$V_B = 1460.6E_i - 48.9$	0.97
	32	$V_B = 1869.6E_i - 82.7$	0.99
Overmature	14	$V_B = 1215.6E_i - 15.9$	0.95
	19	$V_B = 1503.4E_i - 20.9$	0.99
	25	$V_B = 1660.8E_i - 39.9$	0.92
	32	$V_B = 1924.5E_i - 14.8$	0.96

ตารางที่ 12 แสดงค่าสมการรีเกรสชั่นเส้นตรงของมะพร้าวอ่อนที่กระทบด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ ปริมาณเนื้อช้ำแปรผันตรงกับพลังงานกระทบอย่างดีในทุกหัวทดสอบ ที่สมการในหัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรมีความชันสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของหัวทดสอบขนาดอื่นๆ และในทุกวัยของมะพร้าวอ่อน เมื่อพิจารณาปริมาณช้ำเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามขนาดหัวทดสอบและระยะการเจริญเติบโต (ตารางที่ 13) พบว่าที่หัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ปริมาณช้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญเติบโต โดยที่หัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14, 19 และ 25 มิลลิเมตร มีความสอดคล้องกันของปริมาณความช้ำกับหัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรทุกระยะการเจริญเติบโต เมื่อพิจารณาปริมาณช้ำของมะพร้าวในแต่ละระยะการเจริญเติบโต ในหัวทดสอบเดียวกัน พบว่า มะพร้าวอ่อนระยะสองชั้นเกิดปริมาณช้ำสูงที่สุดทั้ง 4 หัวทดสอบ รองลงมาคือ หนึ่งชั้นครึ่งและหนึ่งชั้นตามลำดับ หัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรจะให้ค่าปริมาณช้ำสูงกว่าหัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14, 19 และ 25 มิลลิเมตร จึงทำการเลือกหัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถทำให้มะพร้าวอ่อนเกิดรอยช้ำได้ง่ายและชัดเจน ไปทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช้ำกับพลังงานกระทบ ณ จุดก่อนขีดแบ่งเกิดรอยช้ำ (Below Threshold) ต่อไป

ตารางที่ 13 ค่าความไวต่อการช้ำ (bruise susceptibility, mm^3/J) ของมะพร้าวอ่อนต่อการกระทำกระทบ

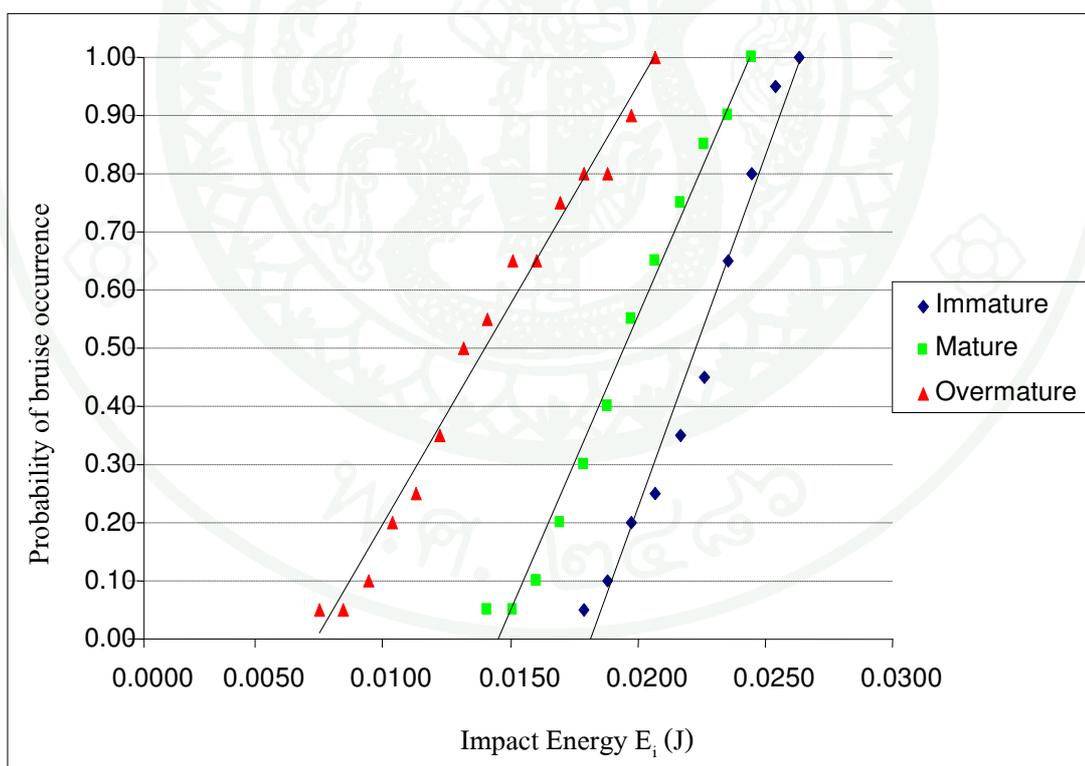
Maturity	Spherical impactor size (mm)			
	14	19	25	32
Immature	967.9 ^{a*} (537.8)	1,106.7 ^{ab} (770.1)	1,178.8 ^{abc} (473.7)	1,552.4 ^{def} (550.1)
	1,187.4 ^{abc} (718.1)	1,280.6 ^{abcd} (677.3)	1,365.2 ^{bcde} (423.5)	1,663.3 ^{ef} (641.8)
Overmature	1,307.6 ^{bcd} (733.2)	1,473.7 ^{cdef} (1,069.2)	1,554.3 ^{def} (795.6)	1,716.0 ^f (832.1)

Standard deviation is shown in the parenthesis.

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซ้ำและพลังงานกระแทกขณะก่อนจุดขีดแบ่งเกิดรอยซ้ำ (Below Threshold)

ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ความน่าจะเป็น (Probability) = 1 ของมะพร้าวอ่อนที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ และมีสมการดังตารางที่ 14 พบว่าค่าพลังงานขีดแบ่ง (Threshold Energy) ที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำของมะพร้าวมีความแตกต่างกัน โดยมะพร้าวเนื้อหนึ่งชั้นจะสามารถรับพลังงานได้มากที่สุดรองลงมาคือ เนื้อหนึ่งชั้นครึ่งและ สองชั้นตามลำดับ โดยมะพร้าวอ่อนมีค่าพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำ (Probability = 1) และปริมาณซ้ำ (ตารางที่ 15) ดังนี้มะพร้าวเนื้อหนึ่งชั้นมีค่าพลังงานที่ทำให้เกิดรอยซ้ำสูงที่สุด 0.264 จูล มีค่าปริมาณซ้ำเท่ากับ 422.8 ± 47.9 ลูกบาศก์มิลลิเมตร, มะพร้าวเนื้อชั้นครึ่งมีค่าพลังงาน 0.245 จูล มีค่าปริมาณซ้ำเท่ากับ 345.5 ± 47.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมะพร้าวเนื้อสองชั้นมีค่าพลังงาน 0.207 จูล มีค่าปริมาณซ้ำเท่ากับ 307.9 ± 48.0 ลูกบาศก์มิลลิเมตร



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกระแทก

ตารางที่ 14 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ (P) กับพลังงานกระแทก (E_i)

Maturity	Regression line	R^2
Immature	$P = 121 E_i - 2.2$	0.97
Mature	$P = 101.4 E_i - 1.5$	0.99
Overmature	$P = 75.5 E_i - 0.6$	0.98

ตารางที่ 15 ปริมาตรความชำและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) (ที่ $P^{**}=1.0$) ของมะพร้าวอ่อน เมื่อได้รับการกระทำกระแทก (32 mm impactor)

Maturity	Bruise volume * (mm^3)	Threshold energy * (J)
Immature	422.8 ^b (47.9)	0.264
Mature	345.5 ^a (47.1)	0.245
Overmature	307.9 ^a (48.0)	0.207

Standard deviation is shown in the parenthesis.

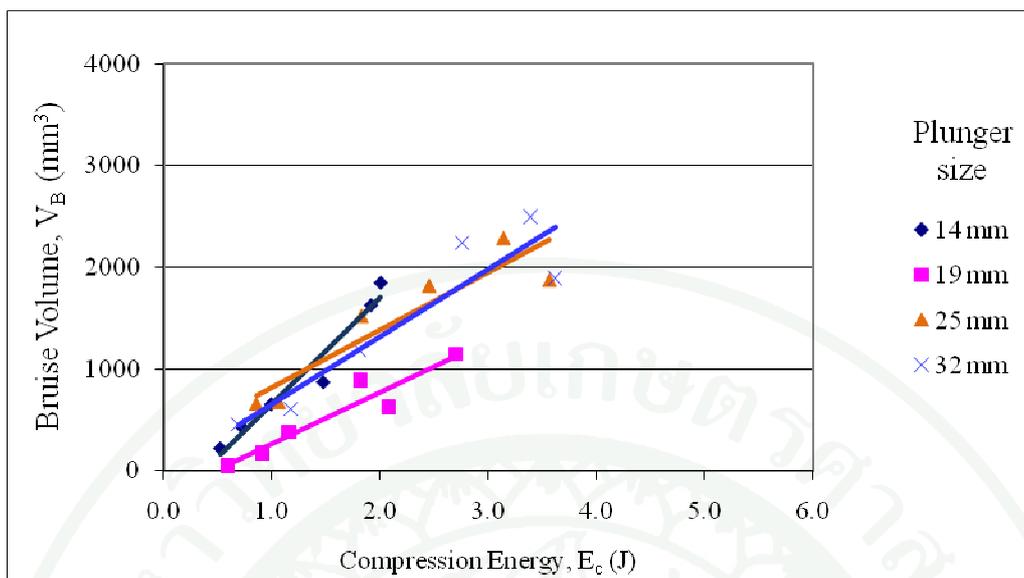
* Mean values with the same letter are not significantly different at the $\alpha = 0.05$ level.

** Probability of bruise occurrence = number of non-zero bruises / number of replications of the same treatment.

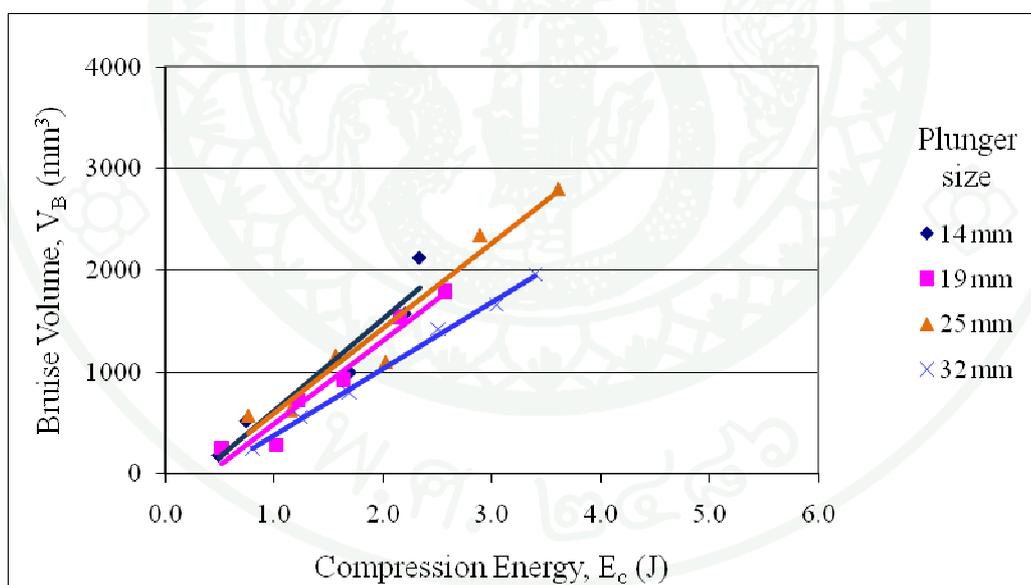
2. มะพร้าวอ่อนเมื่อรับภาระแบบกดเกือบสถิตย์ (Quasi-Static compression)

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรชำและพลังงานกดเลยจุดขีดแบ่งเกิดรอยชำ (Beyond Threshold)

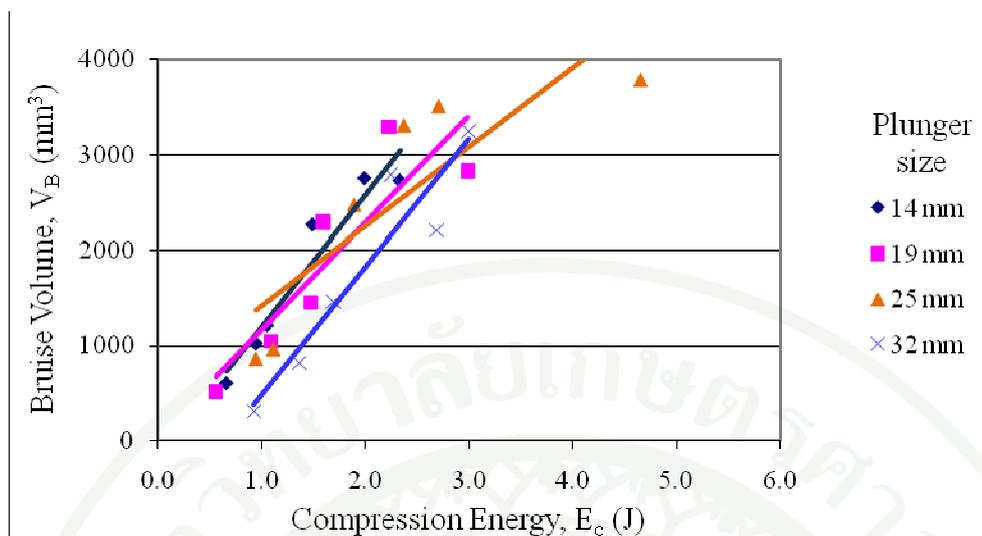
เมื่อนำค่าปริมาตรชำ (V_B) กับพลังงานกด (E_c) ของหัวทดสอบทั้ง 4 ขนาด มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ (ภาพที่ 24-26) พบว่าปริมาตรชำเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อพลังงานกดสูงขึ้น



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อหนึ่งชั้นครึ่งเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกดที่ใช้ในการกดของผลมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้นเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ

ตารางที่ 16 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรซ้ำ (V_B) กับพลังงานกด (E_c) ที่ใช้ในการกดเกือบสัณฐานของผลมะพร้าวอ่อนเมื่อกดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ

Maturity	Plunger size (mm)	Regression line	R^2
Immature	14	$V_B = 1043.6E_c - 391.2$	0.95
	19	$V_B = 508.4E_c - 239.8$	0.91
	25	$V_B = 563.85E_c + 260.19$	0.85
	32	$V_B = 661.7E_c - 2.1$	0.95
Mature	14	$V_B = 865.7E_c - 270.3$	0.88
	19	$V_B = 822.3E_c - 333.4$	0.95
	25	$V_B = 840.2E_c - 250.0$	0.95
	32	$V_B = 651.9E_c - 271.0$	0.99
Overmature	14	$V_B = 1379.0E_c - 183.7$	0.93
	19	$V_B = 1119.9E_c - 3.2$	0.82
	25	$V_B = 816.7E_c + 573.6$	0.77
	32	$V_B = 1346.4E_c - 867.9$	0.89

ตารางที่ 16 แสดงค่าสมการรีเกรสชันเส้นตรงของมะพร้าวอ่อนที่กดด้วยหัวทดสอบขนาดต่างๆ ปริมาตรเนื้อช้ำแปรผันตรงกับพลังงานกดอย่างดี โดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.7 ทุกสมการรีเกรสชันเส้นตรง เลือกหัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรเหมือนในการทดสอบกระทำกระแทก ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช้ำกับพลังงานกด ณ จุดก่อนขีดแบ่งเกิดรอยช้ำ (Below Threshold) ต่อไป เมื่อพิจารณาปริมาตรช้ำเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามขนาดหัวทดสอบและระยะการเจริญเติบโตต่อหน่วยพลังงานที่ทำให้ภาวะ (ตารางที่ 17) พบว่า ปริมาตรช้ำของหัวทดสอบแต่ละขนาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของมะพร้าวอ่อนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 17 ค่าความไวต่อการช้ำ (bruise susceptibility, mm^3/J) ของมะพร้าวอ่อนต่อการกดเกือบ สติลิตซ์

Maturity	Spherical plunger size (mm)			
	14	19	25	32
Immature	799.2 ^{c*} (294.8)	404.2 ^a (183.6)	675.8 ^{bc} (263.4)	702.0 ^{bc} (276.4)
	739.4 ^{bc} (234.6)	660.8 ^{bc} (220.4)	713.5 ^{bc} (204.8)	571.0 ^{ab} (214.8)
Overmature	1,454.0 ^f (673.4)	1,253.4 ^c (376.7)	1,172.7 ^{de} (540.8)	1,035.6 ^d (314.2)

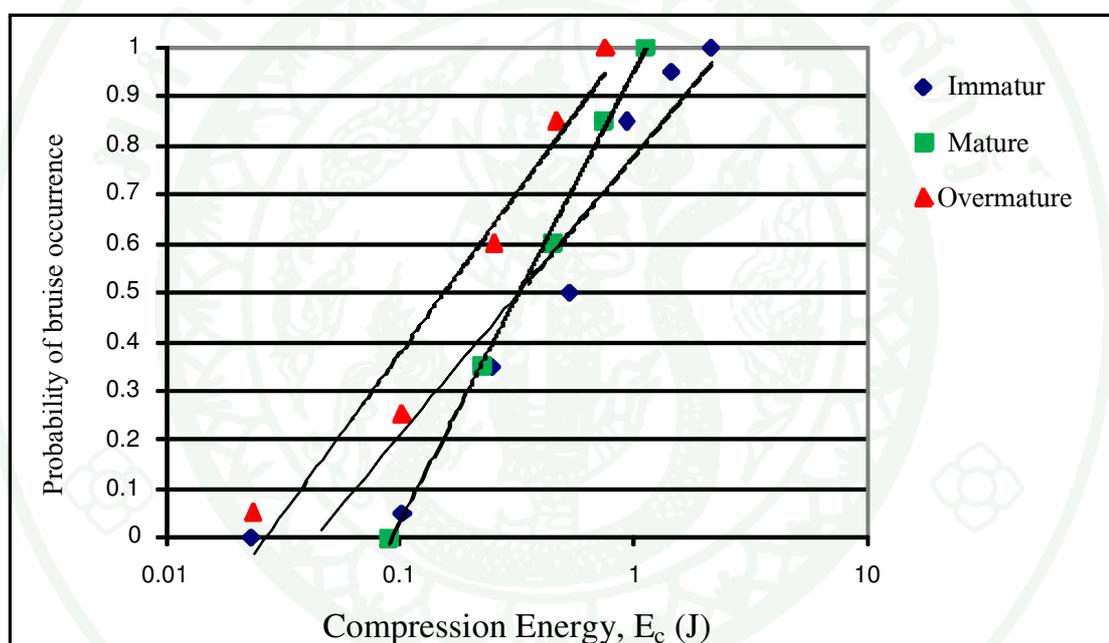
Standard deviation is shown in the parenthesis.

* Mean values with the same letter are not significantly different at the $\alpha = 0.05$ level.

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช้ำและพลังงานกดขณะก่อนจุดขีดแบ่งเกิดรอยช้ำ (Below Threshold)

ภาพที่ 27 แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการช้ำกับพลังงานกดที่ความน่าจะเป็น (Probability) = 1 ของมะพร้าวอ่อนที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ และมีสมการดังตารางที่ 18 ค่าพลังงานขีดแบ่ง (Threshold Energy) ของมะพร้าวมีความแตกต่างกัน โดยมะพร้าวเนื้อหนึ่งชั้นจะสามารถรับพลังงานได้มากที่สุด รองลงมาคือ เนื้อหนึ่งชั้นครึ่งและสองชั้นตามลำดับ โดยมะพร้าวอ่อนมีค่าพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการช้ำ (Probability = 1) และ

ปริมาตรซ้ำ (ตารางที่ 19) ดังนั้นมะพร้าวเนื้อหนึ่งชั้นมีค่าพลังงานที่ทำให้เกิดรอยซ้ำสูงสุด 2.17 ± 0.28 จูล มีค่าปริมาตรซ้ำเท่ากับ 2073.8 ± 382.2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร, มะพร้าวเนื้อชั้นครึ่งมีค่าพลังงาน 1.13 ± 0.19 จูล มีค่าปริมาตรซ้ำเท่ากับ 1435.9 ± 329.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมะพร้าวเนื้อสองชั้นมีค่าพลังงาน 0.76 ± 0.19 จูล มีค่าปริมาตรซ้ำเท่ากับ 1090.5 ± 414.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการทดสอบการกดมะพร้าว (ชนรัตน์, 2550) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างมาก ยิ่งอายุของมะพร้าวเพิ่มขึ้นกามมะพร้าวที่มีโพรงคล้ายฟองน้ำจะยุบตัวลงทำให้แรงในการกดส่วนหนึ่งเสียไปกับการทำให้กามมะพร้าวยุบตัว และเส้นใยของมะพร้าวมีความเหนียวเพิ่มขึ้นตามอายุ จึงเกิดรอยซ้ำน้อยลง



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกด

ตารางที่ 18 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำ (P) กับพลังงานกดเกือบสติกซ์ (E_c)

Maturity	Regression line	R^2
Immature	$P = 0.2489\ln(E_c) + 0.7753$	0.92
Mature	$P = 0.399\ln(E_c) + 0.9493$	0.99
Overmature	$P = 0.2841\ln(E_c) + 1.0275$	0.95

ตารางที่ 19 แสดงปริมาณความชื้นและพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) (ที่ $P^{**}=1.0$) ของมะพร้าวอ่อน เมื่อได้รับการกดเกือบสถิตย์ (32 mm impactor)

Maturity	Bruise volume * (mm ³)	Threshold energy * (J)
Immature	2073.8 ^c	2.17 ^c
	(382.2)	(0.28)
Mature	1435.9 ^b	1.13 ^b
	(329.4)	(0.19)
Overmature	1090.5 ^a	0.76 ^a
	(414.4)	(0.19)

Standard deviation is shown in the parenthesis.

* Mean values with the same letter are not significantly different at the alpha = 0.05 level.

** Probability of bruise occurrence = number of non-zero bruises / number of replications of the same treatment.

3. การนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้

Bollen (1993) and Pang *et al.* (1994) อ้างว่าการกระทบระหว่างผลไม้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายในการระบบเกี่ยวกับวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ความเร็วสูงสุดที่กระทบกับระหว่างผลไม้เป็นค่าที่สามารถช่วยในการออกแบบการคัดแยก ขนส่ง บรรจุเกี่ยวกับผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉาะมะพร้าวอ่อน สมมติผลมะพร้าวอ่อนมีคุณลักษณะสมบัติยืดหยุ่น ทราบจาก Chen *et al.* (1996) ว่า

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V^2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)^{1/5} \left[\frac{E_1 E_2}{E_2 (1 - \mu_1^2) + E_1 (1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^{3/5} \quad (6)$$

ที่ซึ่ง σ_{\max} = ความเค้นสูงสุด (Pa)

V = ความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุทรงกลมก่อนชน (m/s²)

m_1 = มวลของทรงกลมหนึ่ง (kg)

m_2 = มวลของทรงกลมอีกอันหนึ่ง (kg)

- E_1 = โมดูลัสยืดหยุ่นของทรงกลมหนึ่ง (Pa)
 E_2 = โมดูลัสยืดหยุ่นของทรงกลมอีกอันหนึ่ง (Pa)
 μ_1 = Poisson's ratio ของทรงกลมหนึ่ง
 μ_2 = Poisson's ratio ของทรงกลมอีกอันหนึ่ง
 R_1 = รัศมีความโค้งของทรงกลมหนึ่ง (m)
 R_2 = รัศมีความโค้งของทรงกลมอีกอันหนึ่ง (m)

เมื่อหัวกระแทกขนาด 96 กรัมกระทำกับมะพร้าวอ่อน เช่นเดียวกับการกระทำของทรงกลมยืดหยุ่น 2 ลูกชนกัน จากตารางที่ 1 ระดับพลังงาน threshold สำหรับมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้นคือ 207 มิลลิจูล ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงคือ $0.207 \text{ J} / (\text{น้ำหนักหัวกระแทก} \times g) = 0.207 \text{ J} / (0.096 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m s}^{-2}) = 0.22 \text{ m}$. ความเร็วก่อนชนจึงมีค่า $(2 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.22 \text{ m})^{1/2} = 2.078 \text{ m/s}$ เมื่อทำการพิจารณาให้ ตัวห้อยเลข 1 คือหัวกระแทก และตัวห้อยเลข 2 คือ มะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้น โดย $m_1 = 0.096 \text{ kg}$, $m_2 = 1.563 \text{ kg}$, และเมื่อ $R_1 \ll R_2$ ดังนั้นสมการที่ 6 จึงได้ว่า

$$\sigma_{\max 1} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V_1^2 m_1 \right)^{1/5} \left[\frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{1}{R_1} \right)^{3/5} \quad (7)$$

เมื่อทำการพิจารณา ให้เป็นการชนกันระหว่างมะพร้าวอ่อนเนื้อสองชั้น (ตัวห้อยเลข 1) และพื้นแบนแข็ง (ตัวห้อยเลข 2) โดยพิจารณาที่การเปลี่ยนรูปของมะพร้าวอ่อนอยู่ใน bioyield limit ดังนั้นสมการที่ 6 จึงได้ว่า

$$\sigma_{\max 2} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V_2^2 m_2 \right)^{1/5} \left[\frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{1}{R_2} \right)^{3/5} \quad (8)$$

ในการชนกันจะเกิดค่าความเค้นมากที่สุดที่เหมือนกันบนพื้นผิวที่สัมผัส ดังนั้นกล่าวได้ว่า $\sigma_{\max 1} = \sigma_{\max 2}$ จึงได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_{\max 2}} = \left(\frac{V_1^2 m_1}{V_2^2 m_2} \right)^{1/5} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{3/5} \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_{\max 2}} = \left(\frac{2.078^2}{V_2^2} \frac{0.096}{1.563} \right)^{1/5} \left(\frac{0.08}{0.016} \right)^{3/5}$$

$$\frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_{\max 2}} = \left(\frac{4.318}{V_2^2} 0.0614 \right)^{1/5} (5.1923)^{3/5}$$

$$V_2 \cong 5.75 \text{ m s}^{-1}$$

ดังนั้นมะพร้าวอ่อนจะต้องมีความเร็วไม่เกิน 5.75 เมตรต่อวินาที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอย
ชำ หรือหลีกเลี่ยงการเกิดการชำในมะพร้าว

สรุปผลการทดลอง

1. มังคุดตอบสนองต่อภาวะเชิงกล โดยแสดงอาการเปลือกแข็ง ภาพจาก Scanning Electron Microscope แสดงถึงเซลล์เมื่อได้รับการจะสามารถเห็นเป็นวงกลมเนื่องจากการสะสมลิกนิน เปรียบเทียบกับเซลล์ปกติไม่มีการสะสมลิกนิน

2. มังคุดจะมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรความชื้นและพลังงานขีดแบ่งที่สูงเมื่อรับภาระแบบกระทำกระทำซึ่งมีค่ามากกว่ามังคุดที่รับภาระแบบกดเกือบสถิตย์ มังคุดสีม่วงดำเกิดอาการเปลือกแข็งได้ง่ายกว่ามังคุดสีชมพูเนื่องจากค่าพลังงานขีดแบ่งต่ำกว่าเมื่อได้รับการทั้งแบบกดเกือบสถิตย์และกระทำกระทำ

3. สมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็งได้แก่ความแน่นเนื้อและดัชนีความแน่นเนื้อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5% กับระยะการระกด ระยะการเจริญเติบโต และจำนวนวันเก็บรักษา ดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมังคุดได้รับการทั้งแบบกดเกือบสถิตย์ และการให้ภาระแบบกระทำกระทำ โดยแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อรับภาระมากขึ้น และเพิ่มขึ้นเมื่อวันเก็บรักษานานขึ้น มังคุดสีชมพูมีแนวโน้มเป็นมังคุดเปลือกแข็งได้น้อยกว่ามังคุดม่วงดำ อาการเปลือกของมังคุดซึ่งเกิดอาการแข็งขึ้นจึงเรียกได้ว่าอาการ “ซ้ำ” สามารถหลีกเลี่ยงการซ้ำของเปลือกมังคุดโดยมังคุดไม่ควรกระทำกระทำกันที่ความเร็วเกิน 1.55 เมตรต่อวินาที

4. การศึกษาการซ้ำและสมบัติเชิงกลของมะพร้าวอ่อน ทดสอบกับมะพร้าวอ่อน 3 ระยะการเจริญเติบโตคือ ระยะหนึ่งชั้น หนึ่งชั้นครึ่ง และสองชั้น ทดสอบภายใต้หัวทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร การทดสอบภายใต้การกระทำกระทำพบว่ามะพร้าวอ่อนระยะหนึ่งชั้น มีความไวต่อการเกิดรอยซ้ำต่ำที่สุด การกดเกือบสถิตพบว่า การทดสอบโดยการกดมะพร้าวอ่อนระยะหนึ่งชั้นครึ่งมีความไวต่อการเกิดรอยซ้ำต่ำที่สุด

5. เมื่อพิจารณาจากค่าพลังงานขีดแบ่ง (threshold energy) ที่มะพร้าวอ่อนสองชั้น เมื่อได้รับการกระทำกดเกือบสถิตย์เปรียบเทียบกับกระทำกระทำ แสดงให้เห็นว่ามะพร้าวอ่อนสามารถรับแรงกดได้มากกว่าแรงกระทำกระทำ สามารถหลีกเลี่ยงการซ้ำของเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยผลมะพร้าวอ่อนไม่ควรกระทำกระทำกันที่ความเร็วเกิน 5.75 เมตรต่อวินาที

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **ฐานความรู้ด้านพืช (DOA Plant Knowledge Base): มะพร้าว.**

แหล่งที่มา: www.doa.go.th, 8 สิงหาคม 2548.

กรมวิชาการเกษตร. 2550. **ดัชนีการเก็บเกี่ยว: ฐานความรู้ด้านพืช.** แหล่งที่มา:

http://www.doa.go.th/pl_data/MANSTEEN/4tech/tec03.html, 20 กันยายน 2550.

กรมศุลกากร. 2554. **สถิติการส่งออก.** แหล่งที่มา:

<http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex2550.jsp>, 13 มีนาคม 2554.

กลุ่มเกษตรสัญจร. 2531. **มะพร้าวน้ำหอม. ครั้งที่ 1.** สหมิตร, กรุงเทพฯ.

จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2549. **ชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช.** โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและ
ฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม. 453 หน้า.

ชนรัตน์ ศรีรุ่งเรือง. 2550. **การชำเชิงกลของผลมะพร้าวอ่อน.** วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรม
เกษตร คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.
123 น.

นพพร สายัมพล. 2542. **พืชเศรษฐกิจ: มะพร้าว.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น. 233 - 249.

บัณฑิต จริโมภาส. 2545. **สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร.** ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 160 น.

_____ และอุดมศักดิ์ กิจทวี. 2547. **การรับรู้ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงภายใต้การ
กระทำกระแทก.** วิศวกรรมสาร มก. 18(52). 19-26.

พนิดา บุษปฤกษ์ และ บัณฑิต จริโมภาส. 2549. สมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็ง. การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม.

พานิชย์ ยศปัญญา. 2544. มะพร้าวพืชสารพัดประโยชน์. บริษัท พืชเกษตร ฟรันที้ดิง เซ็นเตอร์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

มานิชญ์ กุลพฤษี. 2534. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางชีวเคมีบางประการของเปลือกมังคุดที่แข็งตัวเนื่องจากการตกกระทบหลังการเก็บเกี่ยว. ปัญหาพิเศษปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รำไพ อินแก้วพะเนา และ จินตนา ศรีขาว. 2536. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของแรงกระแทกต่อคุณภาพของมังคุด. โครงการปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมเกียรติ เสริมศักดิ์. 2543. การปลูกมังคุด. พิมพ์ครั้งที่ 1. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สมโภชน์ น้อยจินดา. 2535. ผลของสภาพบรรยากาศตัดแปลงที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลมังคุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ วรรณศิริ. 2541. มังคุด. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, นนทบุรี.

สมศักดิ์ อดัญชี. 2538. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวเคมีบางประการของเปลือกผลมังคุดที่แข็งตัวเนื่องจากการตกกระทบหลังการเก็บเกี่ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สายชล เกตุษา และ สมศักดิ์ อดัญชี. 2539. การศึกษากลไกการแข็งตัวของเปลือกผลมังคุดหลังการตกกระทบ. รายงานการวิจัย. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2548. การแข็งของเปลือกผลมังคุดหลังการตกกระทบ. วารสาร
ราชบัณฑิตยสถาน. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3 ก.ค.-ก.ย..

_____. 2549. ความเสียหายของผักและผลไม้เนื่องจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ.
วารสารราชบัณฑิตยสถาน. ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 เม.ย.-มิ.ย..

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2554. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. แหล่งที่มา:
http://www.oae.go.th/main.php?filename=agri_production, 13 มีนาคม 2554.

สำนักงานสินค้ามาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. มาตรฐานสินค้าเกษตรและ
อาหารแห่งชาติ: มังคุด 2-2546. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

หนึ่งฤทัย แพร่สีทอง. 2542. การลงทุนทำสวนมะพร้าวน้ำหอมอย่างมืออาชีพ. มิตรเกษตร
การตลาดและโฆษณา. กรุงเทพฯ, 74 น.

อาภาภรณ์ มีนาพันธ์. 2537. การสร้างเอทิลีนของเปลือกผลมังคุดที่แข็งตัวเนื่องจากการตกกระทบ.
ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. **Postharvest Biology and
Technology**. 15: 207-225.

ASAE Standards. 1998. Compression test of food materials of convex shape. ASAE S368.3
MAR95. 554-559.

Bajema, R.W., G.M. Hyde and A.L. Baritelle. 1998. Temperature and strain rate effect on the
dynamic failure properties of potato tuber tissue. **Transactions of the ASAE**. 41: 733-
740.

Bollen, A.F., H.X. Nguyen and B.T. Dela Rue. 1999. Comparison of methods for estimating
the bruise volume of apples. **J. agric. Eng Res**. 74: 325-330.

- _____. 1993. Apple-apple impact evaluation using an instrumented sphere. **Agricultural Engineering Journal**. 2 (1&2): 1-14.
- Bourne, M.C. 1967. Deformation testing of foods I. a precise technique for performing the deformation test. **J. Food. Sci.** 32: 601-605.
- _____. 1982. Concept and Measurement: **Food Texture and Viscosity**. Academic Press, San Diego.
- Bunsiri, Apita., Ketsa, Saichol., Robert E. Paull.. 2003. Phenolic metabolism and lignin synthesis in damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. **Postharvest Biology and Technology**. 29: 61-71.
- Chen, P. and Z. Sun. 1981. Impact Parameters Related to Bruise Injury in Apples. **ASAE Paper No. 81-3041**.
- _____, M. Ruiz-Altisent, and P. Barreiro. 1996. Effects of impact mass on firmness sensing of fruits. **Transactions of the ASAE**. 39(3): 1019-1023.
- _____. 2001. Application of elastic theory to high-speed impact sensing of fruits. **Proceeding of the IFAC/CIGR Workshop on Control Applications in Post-harvest and Processing Technology**. October 3-5, 2001. Tokyo, Japan. 21-26.
- Dangcham, S., Bowen, J., Ferguson, I.B., and Ketsa, S.. 2008. Effect of temperature and low oxygen on pericarp hardening of mangosteen fruit stored at low temperature. **Postharvest Biology and Technology**. 50: 37-44.
- Delwiche, M.J., H. Arevalo and J. Mehlschau. 1996. Second generation impact force response fruit firmness sorter. **Transactions of the ASAE**. 39(3): 1025-1033.

- _____, T, Shaoqi and J.J. Mehlschau. 1989. An impact force response fruit firmness sorter. **Transactions of the ASAE**. 32(1): 321-326.
- _____, Tim, McDonald and S.V. Bowers. 1987. Determination of Peach Firmness by Analysis of Impact Forces. **Transactions of the ASAE**. 30(1): 249-254.
- Diehl, K. C. and G. P. Ordonez. 1982. Normal strain failure due to contact stresses. **ASAE Paper No. 82-3558**. ASAE, St. Joseph, MI. 18 p.
- Finney, E.E. Jr. 1969. Defining and measuring attributes of texture in fruits and vegetables. **Agricultural Engineering**. 50(8): 462-465.
- Harker, F.R., J.H. Maindonald, and P.J. Jackson. 1996. Penetrometer measurement of apple and kiwifruit firmness: operator and instrument differences. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.** 121(5): 927-936
- Holt, J. E. and D. Shoorl. 1977. Bruising and energy dissipation in apples. **J. Text. Studies**. 15: 377-394.
- Jarimopas, B. 1984. Failure of apples under dynamic loadings. **Unpublished D. Sc. Dissertation**. Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Technion City Haifa, Israel, 157 p.
- _____, Pushpariksha, P., Singh, SP., Singh, J.. 2008. Mechanical and Light Properties of Mangosteen Fruit as Related to Postharvest Quality. **Journal of Testing and Evaluation**. Mar, 2008. 36(2).
- _____, Toomsaengtong, S., Inprasit, C.. 2007. Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine. **Journal of Food Engineering**. 79:745-751.

- Ketsa, S.. and Atantee, S.. 1998. Phenolic, lignin, peroxidase activity and increased firmness of damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. **Postharvest Biology and Technology**. 14 : 117-124.
- Manago, M. 1991. Ripening of kiwifruit, storage quality of fruit ripened after harvest and nondestructive firmness measurement of fruit. **Proceedings of Japan Soc. Hort. Sci. (Autumn Annual Meeting)**. 606-607 (in Japanese).
- McGlone, V.A., R.B. Joran and P.N. Schaare. 1997. Mass and drop-height influence on kiwifruit firmness by impact force. **Transactions of the ASAE**. 40(5):1421-1428.
- Meredith, F.I., R.G. Leffler and C.E. Lyon. 1990. Detection of firmness in peaches by impact force response. **Transactions of the ASAE**. 33(1):186-188.
- Mohsenin, N.N. 1986. **Physical properties of plant and animal materials**. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Nahir, D.,Z. Schmilovitch and B. Ronen. 1986. Tomato grading by impact force response. **ASAE Paper No. 86-3028**. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Pang, D.W., Studman, C.J., and Banks, N.H.. 1994. Apple bruising thresholds for an instrumented sphere. **Trans. ASAE**. 37 (3), 893-897.
- Peleg, K. 1985. **Produce Handling, Packaging and Distribution**. The AVI Publishing Company Inc., Westport Connecticut.
- Pushpariksha, P., Singh, P., Jarimopas, B. and Janhirun, A.. 2006. Post-harvest Losses and Performance Comparison of Wholesale Packing of Mangosteen fruit Under Simulated Vibration. **In the Proceedings of 15th IAPRI World conference on packing: technical session**. Oct 3-5, Tokyo, 285-289.

Reyes. M.U., R.E. Paull, M.R. Williamson and L.D. Gautz. 1996. Ripeness determination of solo' papaya (*Carica papaya* L.) by impact force. **Applied Engineering in Agriculture**. 12(6): 703-708.

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

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

Zapp, H.R., S.H. Ehlert, G.K. Brown, P.R. Armstrong and S.S. Sober. 1990. Advanced instrumented sphere(IS) for impact measurements. **Transactions of the ASAE**. 33(3): 995-960.



ภาคผนวก



การเผยแพร่ผลงาน

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

Hard rind property of fresh mangosteen fruit subjected to compressive loading

Udomsak KITTHAWEE^{*1}, Bundit JARIMOPAS¹, Siwalak PATHAVEERAT¹

Abstract

Mangosteen is one of the topmost export fruit of Thailand. Local and foreign consumers are in favor of it. Mangosteen was recently exported to the amount 22 mUSD. However, the mangosteen still suffers quality problems on translucency and hard rind which heavily corrodes the income.

This research was to determine the hard rind properties of fresh mangosteen fruit subjected to compressive loading. Methodology included i) the preparation of intact mangosteen fruit to be hard rind samples, ii) testing and evaluation of the hard rind samples, and iii) the comparative analysis of the Scanning Electron Microscope on hard rind and intact mangosteen tissue. The parameters describing degree of hard rind are firmness (ratio between peak force and deformation) and a firmness index (ratio between maximum acceleration and corresponding time) The preparation of 720 uniform, hard rind mangosteen was obtained by compressing a rigid flat plate installed to the Universal Testing Machine, Instron 5569. The testing of the prepared hard rind samples was conditioned by three control factors: a) compressive loading (0, 20, 40, 60, 80 and 100 % of rupture force), b) maturity stage (pink, dark purple), and c) storage day (2, 6 and 10 days after testing day). Analysis was performed using ANOVA and DMRT.

Results showed that compressive loading, maturity and storage time significantly affected firmness and firmness index at $p < 0.05$. The picture from the Scanning Electron Microscope displayed the tissues of hard rind mangosteen consisting of broken cells while that of intact fruit consisting of normal cells. Firmness of compressed dark purple mangosteen was different for a certain storage day and compressive loading. Firmness index and firmness of the dark purple mangosteen were higher than the pink one. The pink mangosteen tended to be hard rind less than the dark purple fruit. Firmness and firmness index similarly demonstrated estimate of correct hard rind threshold.

[Keywords] Mangosteen, hardened pericarp, mechanical properties

I Introduction

Mangosteens (*Garcinia mangostana* L.) are one of the most popular tropical fruits in Thailand. In 2008, the main planting areas cover 396,325 rai (63,412 hectares) of land in the eastern and southern regions of the country and annual production averages 173,511 metric tons. Mangosteen fruits are mainly consumed fresh locally and exported as fresh and frozen fruits to many countries. The quantity in 2008 is about 46,300 metric tons which cost was 775 million baht (22 mUSD) (OAE, 2008).

Most mangosteen fruit reaches the consumer with some degree of mechanical injury caused by compression or impact damage resulting in hardening of pericarp (Tongdee and Suwanagul, 1989; Ketsa and Atantee, 1998; Pushpakiksha et al., 2006). Jarimopas et al. (2008) surveyed postharvest damage of fresh mangosteens from Chantaburi and Chumphon provinces and found that damaged included fruit

cracking, hard rinds and other external and internal defects. Fruits that had hard rind were 1.9 %. Although the fresh fruit was seemingly not much, amount of hard rind fruit was increased rapidly when reached on market. Total amount of hardened pericarp mangosteen fruit was randomly investigated from supermarket, open-market and on-truck vendors in Bangkok and metropolitan area. Hard rind mangosteen was found that 33.4% (Pushpakiksha and Jarimopas, 2006). Even though pericarp hardening does not affect the eating quality of mangosteen fruits, consumers are prone to reject mangosteen fruits with pericarp hardening. (Ketsa, 2005)

The hard rind defect was responsible of mechanical impact with no wound in plant (Siriphanich, 2006). The response was rely on height (impact force), storage time after impact, maturity and oxygen around the fruit (Bunsiri et al., 2003). The impacted mangosteen would be hard rind

* Corresponding author, Tel.: 08-1625-1056; E-mail address: microant@hotmail.com

¹ Department of Agricultural Engineering, Kasetsart University Kamphengsan Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

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

which was combined of lignin at pericarp(Ketsa and Atantee, 1998). Lignin content was intercellular of cell wall and increased strength of cell wall. More lignin content inclined, more cell wall was hardening.(Ketsa, 2005). Pushpariksha and Jarimopas(2006) studied mechanical properties by slope of graph with force and deformation which differed from good and hard rind intact fruit. However, there were other mechanical properties for detection the damage in comparison of perceptivity and sensitivity. The objective of this research was to determine the hard rind properties of fresh mangosteen fruit subjected to compressive loading.

Materials and Methods

Mangosteens fruit were obtained from a commercial orchard in Chantaburi Province, Eastern Thailand. Pink and dark purple fruit were carefully harvested to minimize possible mechanical damage and transported to the laboratory within 1 day of harvest at Kasetsart University KampeangSaen campus. Each stage was used 360 fruits. Fruit were then selected for uniformity of color and size(National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2003). Method of analysis consisted of the firmness and firmness index. A full factorial design was used to analyze. Then the comparative analysis of the Scanning Electron Microscope on hard rind and intact mangosteen tissue at Scientific Equipment Center on Kasetsart University Research and Development Institute.

1. The preparation of intact mangosteen fruit to be hard rind samples

Compress mangosteen with the rigid flat plate(Universal Testing Machine Instron 5569(UTM) on the surface with 15 mm/min(ASAE Standards, 1998) to test the hardness mangosteen. Mangosteen was divided into 2 stages of maturity and 6 categories in each stage of maturities. Each category consisted of 60 mangosteens.

- a) compressive loading at 100 % of rupture force (55 Newton and 40 Newton for pink and dark purple stage respectively)

- b) compressive loading at 80 % of rupture force
 c) compressive loading at 60 % of rupture force
 d) compressive loading at 40 % of rupture force
 e) compressive loading at 20 % of rupture force
 f) none compressive loading (control treatment)

2. The testing and evaluation of the hard rind

- a) Quasi-Static compression based on ASAE S368.3 and used 6 mm for diameter as well as Universal Testing Machine. Compression load was applied at loading rate of 15 mm/min to mangosteen which was compressed. Force deformation response data were used to equation

$$\text{Firmness} = F/D$$

When F = compressive force(7 N, 50 % of rupture force)

D = deformation with equivalent on compressive force

- b) Impact testing by impact property equipment(Jarimopas and Kitthawee, 2004) was applied to compressive mangosteen. This comprises a sectional cylindrical steel rod(about 10 grams) with a 6 mm diameter spherical tip and 2 cm height. After impact, peak acceleration of impactor(A) and impact time(t) were measured, recorded and analyzed. Firmness index could be calculated as follows:

$$\text{Firmness index} = A/t$$

3. The comparative analysis of the Scanning Electron Microscope(SEM)

- a) Hard rind mangosteen
 b) Intact mangosteen

IV Results and Discussion

With a Quasi-Static compressing at 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 level of rupture force was applied to pink and dark purple mangosteen. To store mangosteen for 2, 6 and 10 days after compression. When the fruits was applied by pressing, they could respond the force to become hard rind. Therefore, this characteristic response was damage.

1. Quasi Static testing.

Table 1 indicated that the firmness of mangosteen after receiving loading, observing stages of maturity and the days of storages, influenced on loading at the first day of storages.

		Compression level of rupture force											
		0		0.2		0.4		0.6		0.8		1.0	
days		purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink
2		5.419 [*]	5.287 [*]	5.310 [*]	5.205 [*]	5.442 [*]	5.416 [*]	5.653 [*]	5.438 [*]	5.884 [*]	5.752 [*]	7.008 ^{ab}	6.683 ^{ab}
		(1.925)	(1.407)	(1.597)	(2.126)	(2.448)	(1.876)	(2.103)	(2.180)	(2.855)	(2.475)	(4.816)	(4.307)
6		5.415 [*]	5.565 [*]	5.711 [*]	5.416 [*]	6.276 [*]	5.946 [*]	6.495 ^{ab}	5.917 [*]	6.602 [*]	6.010 [*]	8.058 ^{ab}	7.983 ^{ab}
		(1.753)	(1.998)	(1.802)	(1.912)	(4.012)	(4.824)	(3.736)	(3.263)	(1.781)	(4.226)	(3.428)	(5.390)
10		5.686 [*]	5.689 [*]	6.718 ^{ab}	6.157 [*]	7.559 ^{ab}	7.492 ^{ab}	8.415 ^{ab}	7.934 ^{ab}	9.459 ^{ab}	8.483 ^{ab}	11.041 [*]	10.55 [*]
		(1.975)	(1.463)	(4.033)	(4.870)	(3.956)	(4.318)	(4.259)	(6.713)	(5.363)	(4.883)	(6.374)	(5.592)

Means followed by the same letter in the same column or row are significantly different at P<0.05 by DMRT

Table 1 Firmness of compressed mangosteen which was affected by compressive loading, maturity and storage day

The purple dark mangosteen trend to vary firmness to the loading (Bunsiri et. al.,2003). At the 2nd, 6th and 10th days of storages, the firmness slightly increased at the same level of loading. At the room temperature, no loading impacts on the firmness of mangosteen to 5% within 10 days of storages: yet the firmness increased to 1.2, 1.4, 1.6, 1.7, and 2.0 times after receiving 20, 40, 60, 80 and 100 % of rupture force. The pink mangosteen had no significant difference in loading and no loading. However, the longer storages, 6th and 10th days, the pink mangosteen was not different the firmness from the control subject. 100 % of rupture force had the highest degree of firmness and all of rupture force still was higher figure than control. However, 20% of rupture force had no different firmness from the control for both stages.

2. Impact Testing.

Table 2 show that the loading, stage of maturity and storage days significantly influence on the firmness index at $p < 0.05$.

days	Compression level of rupture force											
	0		0.2		0.4		0.6		0.8		1.0	
	purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink	purple	pink
2	0.403 ^{ab} (0.104)	0.397 ^{ab} (0.077)	0.409 ^{ab} (0.124)	0.384 ^a (0.080)	0.398 ^{ab} (0.110)	0.382 ^a (0.195)	0.415 ^{ab} (0.096)	0.397 ^{ab} (0.143)	0.457 ^{ab} (0.154)	0.438 ^{ab} (0.305)	0.498 ^{ab} (0.237)	0.481 ^{ab} (0.242)
6	0.423 ^{ab} (0.098)	0.401 ^{ab} (0.140)	0.472 ^{ab} (0.123)	0.449 ^{ab} (0.132)	0.501 ^{ab} (0.150)	0.461 ^{ab} (0.081)	0.539 ^{ab} (0.283)	0.498 ^{ab} (0.207)	0.561 ^{ab} (0.166)	0.484 ^{ab} (0.280)	0.635 ^{ab} (0.325)	0.525 ^{ab} (0.378)
10	0.458 ^{ab} (0.120)	0.447 ^{ab} (0.151)	0.565 ^{ab} (0.247)	0.500 ^{ab} (0.307)	0.584 ^{ab} (0.297)	0.550 ^{ab} (0.353)	0.615 ^{ab} (0.362)	0.584 ^{ab} (0.407)	0.683 ^{ab} (0.497)	0.649 ^{ab} (0.294)	0.931 ^a (0.539)	0.759 ^{ab} (0.546)

Means followed by the same letter in the same column or row are significantly different at $P < 0.05$ by DMRT

Table 2 Firmness index of compressed mangosteen which was affected by compressive loading, maturity and storage day

At the 2nd, 6th and 10th days of storages, the firmness slightly increased at the same level of loading. No loading impacts on the firmness of mangosteen to 14% within 10 days of storages. Firmness index was sensitive more than firmness: yet the firmness index increased to 1.4 - 2.3 times after receiving 20 - 100 % of rupture force. The pink mangosteen had no significant difference in loading and no loading. However, the longer storages, 6th and 10th days, the pink mangosteen was not different the firmness from the control subject. Value of firmness index varied from the degree of loading. 100 % of rupture force had the highest degree of firmness and all of rupture force still was higher figure than control. However, 20% of rupture force had no different firmness from the control for both stages. Furthermore, the firmness index at the 6th and 10th days of storages had the same result as the value of the firmness index at the 2nd day.

Firmness and Firmness index testing were same tendency (Jarimopas and Kitthawee,2004). Comparison of the same day as the postharvest and the compression at the same level show that the pink mangosteen trended to be hard rind to

be more difficult than the dark ones because the number of firmness and of firmness index of pink mangosteen was longer than the purple dark mangosteen. On the other hand, the pink mangosteen had much more resistance on the characteristic of hard rind than the dark ones. Therefore, the firmness index trend to be sensitive to check the hard rind better than the firmness. And firmness and firmness index similarly demonstrated estimate of correct hard rind threshold.

3. SEM.

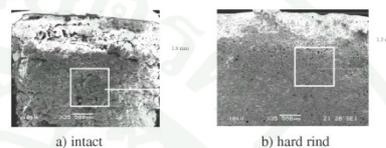


Fig. 1 Scanning electron microscopy images of tissue a) intact fruit b) hard rind fruit

Figure 1. displays the tissue of hard rind mangosteen consisting of broken cells (fig. 1b) that fruit was compressed by 80 % of rupture force. The impact damage of mangosteen pericarp is characterized by increases in firmness and lignin content of the damaged pericarp (fig. 1b) (Ketsa and Atantee, 1998). Then the tissue that had lignin content was still circle form and there was lignin content at between cell wall. While that of intact fruit consisting of normal cells (fig. 1a).

V Summary and Conclusions

The testing of the prepared hard rind samples was under conditioned by compressive loading, maturity and storage time significantly affected firmness and firmness index at $p < 0.05$. The picture from the Scanning Electron Microscope displayed the tissues of hard rind mangosteen consisting of broken cells while that of intact fruit consisting of normal cells. At a certain storage day, firmness of compressed dark purple mangosteen was different for any compressive loading. Firmness index and firmness of the dark purple mangosteen were higher than the pink one. The pink mangosteen tended to

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

be hard rind less than the dark purple fruit. Firmness and firmness index similarly demonstrated estimate of correct hard rind threshold.

Kampangs Sean , Kasetsart University Kampang Sean Campus, Nakhonpathom, Thailand. 453 pages.

Tongdee, S.C., Suwanagul, A., 1989. Postharvest mechanical damage in mangosteens. ASEAN Food J. 4, 151-155.

VI Acknowledgements

The research was financially supported by the Thailand Research Fund Through the Royal Golden Jubilee Ph.D.

Program (Grant No. PHD/0108/2549).

References

- ASAE standards. 1998. Compression test of food materials of convex shape. ASAE S368.3 MAR95, 554-559.
- Bunsiri, Apita., Ketsa, Saichol., Robert E. Paull. 2003. Phenolic metabolism and lignin synthesis in damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. *Postharvest Biology and Technology*. 29 : 61-71.
- Chen, P. and M. Ruiz-Altisent. 1996. A low-mass impact sensor for on-line firmness sensing of fruits. Paper 96F-003. Presented at AgEng96, Madrid, Spain. Sept. 22-26, 1996.
- Jarimopas, B. and Kitthawee, U.. 2004. Firmness Sensing of Mango Subjected to Impact Loading. *Journal of Kasetsart Engineering* 18(52). 19-26.
- Jarimopas, B., Pushpariksha, P., Singh, SP., Singh, J.. 2008. Mechanical and Light Properties of Mangosteen Fruit as Related to Postharvest Quality. *Journal of Testing and Evaluation*. Mar, 2008. 36(2).
- Ketsa, S. 2005. Pericarp Hardening of Mangosteen fruit after impact. *The journal of the royal institute of Thailand*. Vol. 30., No. 3., Jul-Sep.
- Ketsa, S., Atantee, S.. 1998. Phenolic, lignin, peroxidase activity and increased firmness of damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. *Postharvest Biology and Technology*. 14 : 17-124.
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. 2003. Thai Agricultural Commodity and Food Standard : Mangosteens (TACFS 2- 2003). Ministry of Agriculture and Cooperative. Bangkok. Thailand.
- Office of Agricultural Economics. 2008. Mangosteen : Quantity and value of export. Ministry of Agricultural and Cooperatives. Bangkok. Thailand.
- Pushpariksha, P. and Jarimopas, B.. 2006. Mechanical Properties of Hardened Pericarp Mangosteen Fruit. In the 7th Thailand Society of Agricultural Engineering Annual Conference at Mahasarakham University. Thailand. January 23-24, 2006.
- Pushpariksha, P., Singh, P., Jarimopas, B. and Janhirun, A.. 2006. Post-harvest Losses and Performance Comparison of Wholesale Packing of Mangosteen fruit Under Simulated Vibration. In the Proceedings of 15th IAPRI World conference on packing: technical session. Oct 3-5, Tokyo, 285-289.
- Siriphanich, J.. 2006. Postharvest Biology and Plant Senescence. National Agricultural Extension and Training Center of Extension

สมบัติกายภาพ กล เสียง และสรีรศาสตร์ของมะพร้าวอ่อนซึ่งถูกเก็บรักษา
Physical, mechanical, sound and physiological properties of stored young coconut fruit

อุดมศักดิ์ กิจทวี¹ และ บัณฑิต จริโมภาส¹
Udomsak Kitthawee¹ and Bundit Jarimopas¹

Abstract

This research was to determine appropriate physical characteristic, mechanical, physiological and sound properties of young coconut fruit as related to maturity and storage time at room temperature and 5°C for transportation and consumer. Young coconut fruit of three maturities, i.e. immature, mature and overmature, was stored for 14 and 32 days at room temperature and 5°C of cold room, respectively.

Results showed that physical characteristic, mechanical, physiological and sound properties related to storage time. For example, specific gravity was decreased. Rapture force of husk(HFr) was increased. Firmness determined by slope of force-deformation curve of husk(HuskSL) was decreased. Rapture force of shell(SFr) and firmness by force-deformation curve of shell(ShellSL) was increased. Titratable acidity(TA) and total soluble solids(TSS) were decreased. Flesh weight(FW), dry weight(DW), flesh thickness(Flick) and shell thickness(Stick) were increased. Resonance Frequency of fruit body and top were increased with storage time.

Keywords: Young coconut, Storage time, Physical Properties, Physiological Properties

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะหาสมบัติทางกายภาพ กล เสียง สรีรวิทยาและเสียง ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาเจริญเติบโตของมะพร้าวอ่อนและระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ต่างกัน เพื่อใช้สมบัติเหล่านั้นในการคัดคุณภาพที่เหมาะสมต่อการขนส่งและบริโภค โดยนำมะพร้าวอ่อนมา 3 ระยะความสุกแก่ คือ อ่อน พอดี และแก่ มาเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 32 วัน

ผลปรากฏว่า คุณลักษณะทางกายภาพ กล สรีรวิทยา และเสียงของผลมะพร้าวน้ำหอมมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการเก็บรักษาโดยค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลง ค่าแรงกดแตกเปลือก(HFr)มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแน่นเนื้อเปลือก(HuskSL)ลดลง ค่าแรงกดแตกกะลา(SFr)และค่าความแน่นเนื้อกะลา(ShellSL)มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหวาน(TSS), ปริมาณTA ลดลง ค่าน้ำหนักเปลือก(FW), น้ำหนักแห้ง(DW), ความหนาเนื้อ(Flick), และความหนากะลา(Stick)เพิ่มขึ้น ความถี่สั่นพ้องของตัวผลและบริเวณยอดผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นโดยข้อมูลทั้งหมดแสดงความเสื่อมสภาพของผลมะพร้าวอ่อน

คำสำคัญ : มะพร้าวอ่อน, ระยะเวลาการเก็บรักษา, สมบัติกายภาพ, สมบัติสรีรศาสตร์

คำนำ

มะพร้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจพืชหนึ่งของประเทศไทย คนไทยรู้จักใช้เนื้อมะพร้าว ในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาว และหวานในชีวิตประจำวัน ในปี 2549 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะพร้าวอ่อนที่ให้ผลผลิตแล้ว 1.4 ล้านไร่ ผลผลิตรวมประมาณ 1.7 ล้านตัน ราคาที่เกษตรกรขายได้ 4,632 บาทต่อตัน(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) การส่งออกจะส่งในลักษณะมะพร้าวควั่น และมะพร้าวเจียน (กรมวิชาการเกษตร, 2550) สถิติการส่งออกมะพร้าวอ่อนในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยส่งออกมะพร้าวไปต่างประเทศประมาณ 37 ตันมูลค่า 379 ล้านบาท(กรมศุลกากร, 2549) มะพร้าวที่นิยมบริโภคในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ มะพร้าวน้ำหอม และมะพร้าวน้ำหวาน โดยมะพร้าวน้ำหอมจะมีกลิ่นหอมในตัวเองคล้ายใบเตย ส่วนมะพร้าวน้ำหวานจะมีรสหวานเพียงอย่างเดียว (กลุ่มศึกษาเพื่อติดตามและประเมินผลการเจรจาจัดทำเขตการค้าเสรี, 2550)

ระยะเวลาเจริญเติบโตของมะพร้าวอ่อนสัมพันธ์กับคุณภาพของผลผลิต (Jarimopas และ Kusol, 2007) ปกติมะพร้าวอ่อนถูกแบ่งระยะเวลาเจริญเติบโตเป็น 3 ระยะ คือ อ่อน (เนื้อหนึ่งชั้น) กำลังกิน (เนื้อชั้นครึ่ง) และเนื้อสองชั้น (วีรกุล,

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน / ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Kamphaengsaen / Postharvest Technology Innovation Center, Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhon Pathom

2550) ความไม่สามารถเก็บเกี่ยวผลมะพร้าวอ่อนตามระยะการเจริญเติบโต ความไม่สามารถตรวจสอบระยะการเจริญเติบโตที่ระดับพื้ค้ำ ส่วนสร้างปัญหาต่อการผลิตมะพร้าวอ่อนที่ได้คุณภาพมาตรฐาน นอกจากนี้การขนส่ง การเก็บรักษา สำหรับการทำนาย ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลมะพร้าวอ่อนซึ่งประเด็นนี้ยังไม่มีการศึกษาเลย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษสมบัติกายภาพ, กล, เสียง และสรีรศาสตร์ของมะพร้าวอ่อนซึ่งถูกเก็บรักษา

อุปกรณ์และวิธีการ

นำมะพร้าวน้ำหอม 3 ระยะการเจริญเติบโต คือ เนื้อหนึ่ง(a) เนื้อหนึ่งครึ่ง(b) และเนื้อสอง(c) คัดโดยชาวสวนจาก อ. บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร ทำการควั่นแล้วแช่สารฟอกขาว(โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์) นำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง(29±5°C)และหึ่งเย็นที่ระดับความเย็นประมาณ 5 องศาเซลเซียส จำนวน 14 วันและ 32 วันตามลำดับ แล้วทำการทดลองทุก 2 วันและ 4 วันตามลำดับ โดยนำมะพร้าวทั้ง 3 ช่วงมาอย่างละ 15 ผล เพื่อหาสมบัติทางกายภาพ, กล, สรีรวิทยา และเสียง

การศึกษสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย น้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะของผลมะพร้าว SG(Mohsenin, 1996) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก (OHAUS CORPORATION, CD11) SG = น้ำหนักผลมะพร้าวในอากาศ / น้ำหนักของน้ำที่ถูกผลมะพร้าวแทนที่

การศึกษสมบัติกล ประกอบด้วย การทดสอบ Quasi-static Compression ด้วย Universal Testing Machine UTM (Instron 5569) ที่อัตราภาระ 15 มิลลิเมตรนาที (ASAE Standard, 1998) เพื่อหา แรงกดแตกเปลือก (Mesocarp rupture force, HFr) แรงกดกะลาแตก (Endocarp rupture force, SFr) จำนวนความแน่นเนื้อกบที่ความชื้นที่ 50 % ของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของกามะพร้าวอ่อน (Mesocarp force-deformation slope, HuskSL) และความแน่นเนื้อกะลาความชื้นที่ 50 % ของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของกะลามะพร้าวอ่อน (Endocarp force-deformation slope, ShellSL)

การศึกษสมบัติทางสรีรวิทยา ประกอบด้วย ความหวาน (Total Soluble Solid, TSS) หาได้โดยใช้ Digital Refractometer, ปริมาณกรด (Titratable Acidity, TA) ที่ได้จากการไตเตรทน้ำมะพร้าวอ่อนปริมาตร 10 มิลลิตร, น้ำหนักเนื้อสด (FW) น้ำหนักเนื้อแห้ง (DW)(ASAE Standards,1994)จากการชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก (SARTORIUS, PT 6-000V2) ความหนาเนื้อ FTick และความหนาทะลากล Stick ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ $W = V \times N$ โดยที่ W = น้ำหนักของกรดที่มีอยู่ในตัวอย่าง (g/ml), V = ปริมาตรของสารละลาย (ml) และ N = ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH(0.1 N)

การศึกษสมบัติทางเสียง เป็นการหาความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency, f_r) ของผลมะพร้าวอ่อนด้วยเครื่องวัดสมบัติเสียงสะท้อน สัญญาณเสียงที่ได้จะถูกป้อนเข้าโปรแกรม โดยผ่านไมโครโฟนจรับ ขยายและกรองสัญญาณเสียงก่อนเข้าสู่การวัดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) แล้ววิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม FFT(บัตินิต และคณะ, 2547)

ผลและวิจารณ์

จากการวัดสมบัติทางกายภาพ เสิงกล สรีรวิทยา และเสียงของมะพร้าวซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (29±5 °C) โดยทำการทดลอง 3 ช่วงอายุ ช่วงอายุละ 15 ผล ทำซ้ำทุก 2 วัน เป็นเวลา 10 วัน

จาก table 1 แสดงว่าเมื่อทำการเก็บมะพร้าวเป็นระยะเวลานานขึ้น ทำให้ความถ่วงจำเพาะของมะพร้าวน้ำหอมมีค่าลดลงแสดงว่ามะพร้าวมีการสูญเสียน้ำหนักตามระยะเวลาการเก็บ แต่ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย

สมบัติกลของผลมะพร้าวอ่อน ได้แก่ แรงกดทะลุเปลือก (HFr), แรงกดกะลาแตก (SFr), ความชื้นที่ 50 % ของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของเปลือกมะพร้าวอ่อน (HuskSL) และความชื้นที่ 50 % ของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของกะลามะพร้าวอ่อน (ShellSL) พบว่าระยะการเก็บรักษามีอิทธิพลต่อ HFr SFr ShellSL และ HuskSL มีแนวโน้มคล้ายกันทั้ง 3 ช่วงอายุ โดยเมื่อผลมะพร้าวอ่อนถูกเก็บรักษานานขึ้นค่า HFr มีค่าเพิ่มขึ้นและ HuskSL ลดลง เนื่องจากการสูญเสียทำให้เยื่อมีลักษณะเหนียวมากขึ้นทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นและทำให้เพิ่มระยะยวบตัวจากการเหยียดของเยื่อมะพร้าว และค่า SFr และ ShellSL มีค่าเพิ่มขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากโครงสร้าง และส่วนประกอบของกะลาที่ประกอบด้วยชั้นของ fiber ที่มีการพัฒนาต่อแม้เก็บมาจากต้นแล้วก็ตาม จึงทำให้โครงสร้างมีการพัฒนาต่อจนแก่ทำให้มีแรงต้านการกดสูง

ระยะเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลง TSS, TA, FW, DW, FTick และ Stick มะพร้าวอ่อนมีค่า TSS, TA ลดลงค่า FW, DW, FTick, และ Stick เพิ่มขึ้นแสดงว่าน้ำมะพร้าวมีความหวานลดลงและมีกรดลดลงด้วย น่าจะมาจากกากรนำสารบางส่วนในน้ำมะพร้าวไปใช้ในการพัฒนาความหนาเนื้อผล หรือการพัฒนาชั้นภายในผลเป็นต้น

ระยะเวลาเก็บเกี่ยวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่สั่นพ้อง โดยความถี่สั่นพ้องของตัวผลและบริเวณยอดผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้น น่าจะมาจากการพัฒนาของผลที่พัฒนาไปสู่วัยชราทำให้มีเนื้อผลมากขึ้น กระลาแข็งขึ้น ทำให้ผลมีลักษณะเนื้อแน่นมากขึ้นทำให้เสียงมีความถี่สูงขึ้น

จาก table 2 ค่าความถี่เฉพาะมีค่าลดลง ค่า HFr มีค่าเพิ่มขึ้น HuskSL ลดลง ค่า SFr และ ShellSL มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า TSS, TA ลดลง ค่า FW, DW, Flick, และ Stick เพิ่มขึ้น ความถี่สั่นพ้องของตัวผลและบริเวณยอดผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้น คุณลักษณะทางกายภาพ เจริญกล สรีรวิทยา และเสียงของผลมะพร้าวน้ำหนักเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 5 °C มีลักษณะแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน คุณลักษณะทางกายภาพ เจริญกล สรีรวิทยา และเสียงของผลมะพร้าวน้ำหนักเมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถเก็บรักษาได้นานมากกว่า 2 เท่า ผลการทดลองทั้งหมดแสดงถึงความเสื่อมสภาพของผลมะพร้าวอ่อนเองคือเมื่อเก็บนานขึ้นจะทำให้คุณภาพของผลมะพร้าวลดลง ดังนั้นการเก็บรักษาควรเก็บรักษาในระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยเฉพาะการนำข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบในการพิจารณาการขนส่งหรือเก็บรักษาได้โดยคุณภาพของผลมะพร้าวอ่อนไม่เปลี่ยนแปลงเกินไป

Table 1 physical characteristic, mechanical, physiological and sound properties of young coconut fruit at room temperature(29±5 °C)

maturity	2	4	6	8	10	12	14	
W (g)	a	1150.3±99.8	1157.4±94.8	1133.8±148.7	1217.2±109.6	1205.8±85.9	1104.4±125.2	1067.9±70.2
	b	1151.8±109.2	1048.9±100.3	1113.3±101.9	1122.2±107.6	1095.9±124.6	1010.1±114.3	1011.8±73.3
	c	985.4±78.3	1081.9±126.3	1083.9±83.9	1039.9±84.3	962.9±77.3	984.6±122.6	1045.8±102.1
SG	a	0.91±0.03	0.89±0.02	0.89±0.02	0.86±0.02	0.85±0.04	0.83±0.02	0.82±0.03
	b	0.90±0.02	0.89±0.04	0.89±0.04	0.86±0.03	0.85±0.03	0.84±0.02	0.82±0.02
	c	0.88±0.02	0.89±0.02	0.88±0.02	0.86±0.03	0.85±0.02	0.83±0.03	0.79±0.01
HFr (N)	a	37.0±10.0	37.0±7.8	37.8±7.6	38.5±7.6	38.8±14.3	39.4±14.4	40.6±18.5
	b	38.0±7.9	38.8±5.6	38.9±12.5	43.3±16.2	43.9±8.3	44.7±21.0	46.5±11.2
	c	44.2±15.0	44.5±10.0	45.2±10.1	46.6±10.3	47.8±10.7	48.9±9.8	49.5±11.6
HuskSL	a	5.7±3.5	5.5±4.0	5.2±4.6	5.1±2.1	5.0±2.9	4.9±2.7	4.9±4.8
	b	5.7±3.7	5.4±3.5	5.1±4.2	5.1±2.5	4.9±1.5	4.9±2.5	4.7±2.0
	c	5.4±2.6	5.4±2.4	5.0±2.2	4.9±1.8	4.8±1.2	4.8±1.5	4.6±2.5
SFr (N)	a	110.2±24.9	122.9±46.6	126.7±41.4	128.0±44.2	130.6±46.9	132.6±84.2	133.4±59.9
	b	284.8±114.9	299.7±138.7	304.8±121.3	309.2±134.1	318.8±125.3	320.2±119.4	325.1±140.6
	c	414.4±44.1	421.4±43.4	447.2±59.4	453.5±54.8	459.6±59.1	465.2±54.9	465.1±73.4
ShellSL	a	16.0±6.6	16.7±8.4	18.7±13.1	19.8±17.1	20.5±16.4	21.1±17.9	21.6±18.8
	b	46.1±33.3	50.4±25.0	51.9±34.3	54.4±28.7	54.7±43.1	56.7±45.7	60.7±39.4
	c	78.5±41.7	80.5±38.3	84.5±36.5	87.2±40.9	92.2±26.9	95.3±52.4	98.8±46.3
TSS (°Brix)	a	6.9±0.2	6.5±0.4	6.3±0.4	6.3±0.5	6.1±0.3	5.8±0.3	5.4±0.0
	b	6.9±0.2	6.8±0.2	6.6±0.3	6.5±0.4	6.3±0.3	6.0±0.2	5.8±0.5
	c	7.5±0.4	7.2±0.3	7.0±0.6	7.0±0.4	6.9±0.4	6.5±0.6	6.1±0.6
TA (g/ml)	a	0.12±0.05	0.11±0.03	0.10±0.03	0.10±0.02	0.09±0.02	0.09±0.02	0.09±0.03
	b	0.10±0.03	0.10±0.03	0.10±0.03	0.10±0.02	0.09±0.03	0.09±0.02	0.09±0.07
	c	0.10±0.01	0.10±0.03	0.09±0.03	0.09±0.05	0.09±0.02	0.09±0.02	0.07±0.01
FW (gm)	a	73.2±12.4	79.5±24.1	78.5±12.9	79.6±12.8	84.2±15.9	85.2±15.2	87.3±18.6
	b	89.5±15.2	90.5±9.9	91.6±9.6	90.5±13.1	91.1±20.4	93.5±10.6	95.3±15.6
	c	107.8±17.1	110.5±13.7	108.3±16.6	115.4±18.9	117.4±18.0	122.6±16.3	125.3±15.3
DW (gm)	a	4.6±2.6	4.5±3.8	4.9±3.1	5.3±3.0	5.7±3.0	5.9±2.8	6.0±2.4
	b	11.7±4.2	12.0±4.7	12.1±4.7	12.1±3.6	12.7±7.4	13.1±7.0	13.1±4.9
	c	21.9±6.9	22.5±8.9	22.8±5.4	23.3±10.0	22.9±8.1	23.9±8.4	24.6±10.1
Flick (mm)	a	1.4±0.3	1.5±0.5	1.5±0.6	1.5±0.6	1.5±0.4	1.6±0.6	1.7±0.5
	b	2.9±1.1	3.0±1.1	3.0±1.1	3.1±0.9	3.1±1.1	3.3±0.8	3.4±0.5
	c	3.6±0.9	3.8±1.2	3.9±1.1	3.9±1.1	4.2±1.2	4.2±1.2	4.3±0.7
Stick (mm)	a	2.9±1.1	2.9±1.1	2.9±1.2	2.9±0.5	3.0±0.5	3.0±0.7	3.0±0.6
	b	3.5±0.9	3.8±1.1	3.9±1.2	4.0±1.2	3.8±1.2	4.1±1.1	4.1±1.1
	c	3.8±0.8	3.9±1.3	3.9±1.1	3.9±1.2	4.0±1.1	4.0±1.1	4.1±1.2
body	a	1.1±0.4	1.1±0.5	1.2±0.4	1.2±0.3	1.2±0.4	1.2±0.3	1.2±0.3
	b	1.1±0.5	1.3±0.2	1.3±0.5	1.4±0.6	1.4±0.5	1.4±0.4	1.4±0.5
	c	1.2±0.3	1.3±0.5	1.4±0.5	1.4±0.4	1.4±0.5	1.5±0.5	1.5±0.5
top	a	0.9±0.3	0.9±0.2	1.1±0.3	1.1±0.4	1.1±0.2	1.1±0.4	1.1±0.3
	b	0.9±0.3	1.1±0.2	1.0±0.1	1.1±0.4	1.1±0.5	1.2±0.6	1.2±0.4
	c	1.1±0.1	1.3±0.5	1.3±0.2	1.3±0.2	1.3±0.5	1.3±0.5	1.4±0.6

Table 2 Physical characteristic, mechanical, physiological and sound properties of young coconut fruit stored 5 °C

Maturity	0	4	8	12	16	20	24	28	32
W (g)	a 1226.3+89.0 b 1260.2+102.4 c 1339.9+79.7	a 1283.0+105.9 b 1264.3+98.9 c 1306.8+112.4	a 1290.7+123.7 b 1252.9+107.9 c 1303.9+82.3	a 1212.9+169.4 b 1239.4+97.3 c 1290.3+141.4	a 1223.8+170.7 b 1254.8+95.9 c 1318.0+95.5	a 1311.4+127.3 b 1292.7+80.4 c 1352.4+162.7	a 1215.9+110.9 b 1238.7+80.4 c 1382.8+109.4	a 1156.1+134.0 b 1238.9+104.9 c 1319.1+110.2	a 1185.3+86.7 b 1288.7+107.5 c 1233.3+137.0
SG	a 0.92+0.03 b 0.91+0.05 c 0.89+0.04	a 0.91+0.04 b 0.90+0.09 c 0.89+0.04	a 0.90+0.04 b 0.89+0.05 c 0.89+0.04	a 0.90+0.05 b 0.89+0.03 c 0.88+0.02	a 0.89+0.07 b 0.88+0.04 c 0.88+0.02	a 0.89+0.04 b 0.88+0.01 c 0.87+0.03	a 0.89+0.05 b 0.87+0.01 c 0.87+0.03	a 0.89+0.07 b 0.87+0.06 c 0.87+0.03	a 0.89+0.06 b 0.87+0.03 c 0.87+0.05
HFr (N)	a 35.5+8.5 b 37.5+11.7 c 43.4+8.9	a 36.4+12.1 b 38.5+11.5 c 43.6+13.8	a 37.3+14.7 b 38.5+17.1 c 44.3+18.6	a 37.8+25.3 b 39.1+23.5 c 45.3+21.9	a 38.3+17.3 b 41.3+18.3 c 46.0+18.0	a 38.4+16.1 b 42.9+17.3 c 46.5+17.0	a 38.9+15.7 b 43.6+24.1 c 47.7+18.2	a 39.1+18.3 b 44.6+15.3 c 48.5+16.2	a 40.3+15.1 b 45.2+16.2 c 49.4+22.4
HuskSL	a 5.9+8.8 b 5.9+4.2 c 5.6+4.7	a 5.7+6.6 b 5.7+7.5 c 5.4+3.8	a 5.5+5.2 b 5.5+6.3 c 5.3+4.3	a 5.3+5.8 b 5.1+4.3 c 5.0+4.2	a 5.2+6.5 b 5.1+4.7 c 5.0+3.0	a 5.2+3.8 b 5.0+4.0 c 5.0+6.6	a 5.0+3.8 b 5.0+4.7 c 4.9+2.9	a 4.9+3.3 b 4.9+3.8 c 4.8+3.0	a 4.9+4.1 b 4.8+3.3 c 4.7+4.1
SFr (N)	a 101.0+26.4 b 106.0+36.5 c 121.3+43.3	a 274.6+59.9 b 286.3+121.8 c 293.5+138.2	a 405.2+75.0 b 413.0+103.2 c 420.1+146.9	a 101.0+26.4 b 106.0+36.5 c 121.3+43.3	a 274.6+59.9 b 286.3+121.8 c 293.5+138.2	a 405.2+75.0 b 413.0+103.2 c 420.1+146.9	a 101.0+26.4 b 106.0+36.5 c 121.3+43.3	a 274.6+59.9 b 286.3+121.8 c 293.5+138.2	a 405.2+75.0 b 413.0+103.2 c 420.1+146.9
ShellSL	a 15.6+7.7 b 43.6+53.3 c 72.5+1.3	a 15.8+14.8 b 47.4+34.6 c 76.0+1.0	a 17.5+13.7 b 49.0+66.0 c 81.9+1.2	a 18.0+14.2 b 49.7+44.1 c 85.3+1.1	a 19.5+13.0 b 52.7+37.3 c 86.6+1.0	a 20.0+18.1 b 53.0+42.9 c 88.0+1.0	a 20.6+18.5 b 53.9+53.0 c 92.2+1.1	a 21.1+11.4 b 54.3+47.4 c 94.8+1.0	a 21.7+16.6 b 58.0+39.1 c 96.4+0.9
TSS (°Brix)	a 7.0+0.4 b 7.2+0.6 c 7.5+0.4	a 6.9+0.9 b 7.1+0.9 c 7.3+0.8	a 6.9+0.8 b 7.0+0.8 c 7.3+0.9	a 6.8+0.9 b 6.9+0.8 c 7.1+0.9	a 6.5+0.9 b 6.8+0.9 c 7.0+0.5	a 6.3+0.5 b 6.6+0.5 c 6.8+0.7	a 6.2+0.4 b 6.4+0.4 c 6.6+0.6	a 6.1+0.7 b 6.2+0.5 c 6.5+0.8	a 5.8+0.6 b 6.2+0.6 c 6.3+0.7
TA (g/ml)	a 0.11+0.02 b 0.10+0.02 c 0.09+0.02	a 0.10+0.02 b 0.10+0.01 c 0.09+0.01	a 0.10+0.02 b 0.10+0.02 c 0.08+0.02	a 0.10+0.02 b 0.09+0.03 c 0.08+0.02	a 0.10+0.02 b 0.09+0.02 c 0.08+0.02	a 0.09+0.02 b 0.09+0.02 c 0.08+0.01	a 0.09+0.01 b 0.08+0.02 c 0.08+0.01	a 0.09+0.01 b 0.08+0.02 c 0.08+0.02	a 0.08+0.01 b 0.08+0.01 c 0.08+0.02
FW (gm)	a 76.1+14.8 b 90.7+26.0 c 105.9+18.1	a 77.5+25.7 b 90.8+21.2 c 106.1+19.6	a 80.5+26.0 b 92.8+28.6 c 108.0+22.4	a 81.3+14.4 b 92.5+22.7 c 107.4+25.5	a 81.9+23.7 b 93.2+18.8 c 108.2+19.7	a 81.7+23.9 b 93.4+19.3 c 110.6+23.4	a 86.5+24.7 b 94.3+25.1 c 117.0+18.8	a 87.2+23.8 b 94.1+23.0 c 119.6+20.4	a 89.0+22.4 b 94.5+20.3 c 123.7+21.2
DW (gm)	a 4.7+1.5 b 11.4+4.0 c 19.0+3.4	a 4.8+2.9 b 11.4+3.8 c 20.0+5.1	a 5.0+2.7 b 12.0+5.1 c 20.2+3.9	a 5.1+2.2 b 12.3+3.8 c 20.8+5.4	a 5.2+2.3 b 12.6+3.8 c 21.5+4.0	a 5.4+2.3 b 12.6+3.0 c 21.7+4.2	a 5.6+1.8 b 13.1+5.2 c 21.8+5.3	a 5.9+3.3 b 13.2+5.0 c 22.1+4.0	a 6.3+3.3 b 13.4+4.5 c 24.0+6.8
Ftick (mm)	a 1.6+0.6 b 2.8+0.9 c 3.6+1.0	a 1.6+0.6 b 2.8+1.1 c 3.7+1.0	a 1.6+0.6 b 2.9+1.1 c 3.8+1.0	a 1.6+0.7 b 2.9+0.9 c 4.0+1.1	a 1.7+0.7 b 2.9+0.8 c 4.1+1.2	a 1.7+0.8 b 3.0+1.0 c 4.1+1.2	a 1.7+0.8 b 3.0+1.0 c 4.2+1.1	a 1.7+0.8 b 3.1+0.8 c 4.2+1.2	a 1.7+0.7 b 3.3+0.9 c 4.3+1.0
Stick (mm)	a 2.8+1.1 b 3.4+0.7 c 3.7+0.6	a 2.9+1.1 b 3.5+0.5 c 3.8+0.7	a 3.0+1.1 b 3.5+1.0 c 3.9+0.8	a 3.0+1.1 b 3.5+0.9 c 3.9+0.7	a 3.0+1.2 b 3.5+0.9 c 4.0+0.7	a 3.1+1.2 b 3.7+0.8 c 4.0+0.6	a 3.1+0.5 b 3.7+0.7 c 4.0+0.5	a 3.1+1.2 b 3.8+0.7 c 4.0+0.6	a 3.2+1.1 b 3.9+0.7 c 4.1+0.5
body	a 1.1+0.2 b 1.1+0.2 c 1.2+0.2	a 1.1+0.2 b 1.2+0.2 c 1.3+0.3	a 1.1+0.2 b 1.2+0.2 c 1.3+0.3	a 1.1+0.2 b 1.2+0.2 c 1.3+0.3	a 1.2+0.2 b 1.2+0.3 c 1.3+0.3	a 1.2+0.2 b 1.3+0.3 c 1.3+0.3	a 1.2+0.2 b 1.3+0.3 c 1.4+0.3	a 1.2+0.2 b 1.3+0.2 c 1.4+0.2	a 1.2+0.2 b 1.3+0.3 c 1.4+0.3
top	a 0.9+0.1 b 0.9+0.2 c 1.1+0.2	a 0.9+0.1 b 0.9+0.2 c 1.1+0.3	a 0.9+0.1 b 1.0+0.1 c 1.2+0.3	a 0.9+0.1 b 1.0+0.2 c 1.2+0.3	a 0.9+0.2 b 1.1+0.2 c 1.2+0.3	a 1.0+0.1 b 1.2+0.4 c 1.3+0.4	a 1.0+0.2 b 1.2+0.3 c 1.3+0.3	a 1.0+0.2 b 1.2+0.3 c 1.3+0.3	a 1.0+0.1 b 1.2+0.3 c 1.3+0.4

สรุป

คุณลักษณะทางกายภาพ เจริญผล สรีรวิทยา และเสียงของผลมะพร้าวที่สุกมีค่าสัมพันธ์กับระยะเวลาการเก็บรักษาโดยค่าความถี่เฉพาะมีค่าลดลง ค่า HFr มีค่าเพิ่มขึ้น HuskSL ลดลง ค่า SFr และ ShellSL มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า TSS, TA ลดลง ค่า FW, DW, Ftick, และ Stick เพิ่มขึ้น ความถี่สัมพันธ์ของตัวผลและบริเวณยอดผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงถึงความเสื่อมสภาพของผลมะพร้าวอ่อน ควรพิจารณาคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับขนส่งหรือบริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2550. ดัชนีการเก็บเกี่ยว : ฐานความรู้ด้านพืช. กรมวิชาการเกษตร. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน 2550. เข้าถึงจาก : http://www.doa.go.th/pl_data/MANSTEEN/4tech/tec03.html.
- กรมศุลกากร. 2549. สถิติการนำเข้า-ส่งออก. กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง. กลุ่มศึกษาเพื่อติดตามและประเมินผลการเจรจาจัดทำเขตการค้าเสรี. 2550. ยุทธศาสตร์มะพร้าว. <http://www.ftamonitoring.org/FTA%20RelatedTopics/FTArelated05.asp> 8 กันยายน 2550.
- บัณฑิต จุรินทร์ภาส, ศิวลักษณ์ ปุริวิรัตน์, กระจวี ตริอำนาจ, ยุทธนา งามเกียรติจิตร. 2547. เครื่องทดสอบหาสมบัติเสียงสะท้อนของผลไม้. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์* 53 (18): 36-43
- วิรกุล มีกลางแสง. 2550. สมบัติเชิงกล, เสียง, สรีรวิทยาของผลมะพร้าวอ่อนที่สัมพันธ์กับระยะเวลาเจริญเติบโต. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 116 หน้า
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2550. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2549. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ASAE Standards. 1994. *Moisture measurement-forages*. ASAE S 358.2 DEC 93. American society of Agricultural Engineers. 2950 Niles Road, Michigan, USA. P 471.
1998. *Compression test of food materials of convex shape*. ASAE S368.3 Mar 95. p 554-559.
- Jarimopas, B. & Kusol, P. 2007. A young coconut fruit opening machine. *Biosystems Engineering*. 98(2007): 185-191.
- Mohsenin, N.N. 1996. *Physical Properties of Plant and Animal Material*. Gordon and Breach Publishers Inc. Thailand



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551
31 มกราคม 2551 - 1 กุมภาพันธ์ 2551



การศึกษาเบื้องต้นสมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็ง
Preliminary study on mechanical properties of hard rind mangosteen

อุดมศักดิ์ กิจทวี¹ บัณฑิต จิโรภาส²
Udomsak Kitthawee¹ Buntit Jarinopas²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็งเพื่อการตรวจสอบคุณภาพมังคุดส่งออกวิธีการประกอบด้วยการใช้หัวประแจกลได้แก่ ความแน่นเนื้อ(อัตราส่วนแรงต่อการเปลี่ยนรูป)และดัชนีความแน่นเนื้อ(อัตราส่วนความเร่งสูงสุดต่อเวลากระแทกสัมพัทธ์ที่สมนัยกัน) ประเมินผลมังคุดที่ถูกกดด้วยแผ่นแบบแข็งที่ติดตั้งกับเครื่อง Universal Testing Machine (Instron 5569) โดยใช้ปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัยได้แก่ ก) ภาระกด 3 ระดับ(20, 50, และ 80 % ของแรงงคผลมังคุดแตก ข) ระยะเจริญเติบโตของผลมังคุด 2 ระยะ(สีแดง,ม่วงดำ) ค)จำนวนวันเก็บรักษา(1, 4, 8 วันหลังจากวันทดสอบ) วิเคราะห์การทดลองทางสถิติด้วย ANOVA และ DMRT ผลการทดสอบปรากฏว่า ภาระกด ระยะการเจริญเติบโต และวันเก็บรักษามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5 % กับความแน่นเนื้อและดัชนีความแน่นเนื้อ มีความแตกต่างในดัชนีความแน่นเนื้อของมังคุดที่ถูกกดของทั้งสองระยะการเจริญเติบโตหลังจากการทดสอบวันแรก แต่ความแน่นเนื้อแตกต่างกันเฉพาะในมังคุดสีม่วงดำที่ถูกกดที่ระดับภาระและวันเก็บรักษาเดียวกัน ดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อของมังคุดสีม่วงดำสูงกว่ามังคุดสีแดง มีแนวโน้มเป็นมังคุดเปลือกแข็งได้น้อยกว่ามังคุดม่วงดำ

คำสำคัญ : มังคุด, เปลือกแข็ง, สมบัติเชิงกล

Abstract

The objective of this research was to primarily study the mechanical properties of hard rind mangosteen for quality controlling for export. The method included the mechanical property of firmness(ratio between peak force and deformation) and a firmness index(ratio between maximum acceleration and corresponding time) to evaluate the mangosteen that was compressed by rigid flat plate installed to the Universal Testing Machine(Instron 5569). There were three control factors: a) compressive loading(20, 50 and 80 % of rupture force) b) maturity stage (Reddish, Dark Purple) and c) storage day(1,4 and 8 days after testing day). Analysis was achieved by using ANOVA and DMRT. Results showed that compressive loading, maturity and storage significantly affected firmness and firmness index at $p<0.05$. For the first storage day, firmness index of compressed mangosteen of a certain maturity was different. Firmness of compressed dark purple mangosteen was different for a certain storage day and compressive loading. Firmness index and firmness of the dark purple mangosteen were higher than the reddish one. The reddish mangosteen tended to be hard rind less than the dark purple fruit.

KEYWORDS : Mangosteen, hardened pericarp, mechanical properties

¹ ศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

² Ph.D. Student, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Kamphaengsarn, Kasetsart University, Kamphaengsarn, Nakhon Pathom, 73140

³ ศูนย์วิจัยปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร 10300

⁴ Suan Dusit Scientific Equipment Center, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit Rajabhat University, Bangkok 10300

⁵ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

⁶ Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Kamphaengsarn, Kasetsart University, Kamphaengsarn, Nakhon Pathom, 73140

คำนำ

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) มีถิ่นกำเนิดในประเทศมาเลเซียและมีการปลูกอย่างกว้างขวางในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Bunsiri, 2003) ในปี 2549 ผลผลิตมังคุดรวมทั้งประเทศมีประมาณ 115,672 ตัน มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 111,434 ไร่ แต่มีการส่งออกมังคุดเพียง 14,904 ตันมูลค่า 258 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2550) พนิดาและบิณฑ์จิตต์ (2549) ศึกษาความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวของผลมังคุดที่พบส่วนใหญ่ประกอบด้วย ผลร่วง เปลือกแข็ง ผิวฉ่ำหรือผิวขรุขระ ซึ่งเป็นความเสียหายที่สามารถสังเกตได้จากภายนอก และความเสียหายภายในเช่น เนื้อแก้ว ขางไหล เนื้อน้ำหรือในบางผลมีการผสมของความเสียหายมากกว่า 1 แบบ ผลร่วง เปลือกแข็ง ผิวฉ่ำ ผิวฉ่ำดำหนิภายในซึ่งมีผลร่วงเป็น 1.3 % ของผลผลิต (พนิดา, 2549) มังคุดกลุ่มนี้มีทั้งที่คัดทิ้งและคัดแยกไว้ขายในราคาต่ำประมาณ 3-8 บาทต่อกิโลกรัม โดยมากมังคุดผลร่วงนั้นถือกันว่าเป็นผลที่มีอาการเนื้อแก้วแต่เมื่อผ่าดูพบว่าไม่ได้มีอาการเนื้อแก้วทุกผล บางผลที่เป็นปกติโดยส่วนใหญ่ผลร่วงมีอาการไม่พึงประสงค์ ไม่ว่าจะเนื้อแก้ว ขางไหลหรือเนื้อน้ำ ส่วนน้อยมีอาการปกติ ลักษณะความเสียหายที่มีปริมาณมากที่สุดคือ มังคุดผิวฉ่ำหรือผิวขรุขระซึ่งทำให้มูลค่าของมังคุดลดลงอย่างมาก ถ้าเป็นมังคุดผิวฉ่ำมีผลใหญ่ราคา 30-60 บาทแต่ในผิวฉ่ำผลใหญ่มีราคาเพียง 22-30 บาท

อาการเปลือกแข็งของมังคุดถือเป็นการตอบสนองต่อการกระทบกระเทือนทางกล โดยไม่เกิดบาดแผลในพืช (จริงแท้, 2549) ซึ่งอาการเปลือกแข็งที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับ ความสูง (แรงที่กระทำ), ระยะเวลาหลังได้รับแรงกระทำ, วัยและบรรยากาศรอบๆ ผล (ออกซิเจน) (Bunsiri, 2003) มังคุดเมื่อได้รับการกระทบกระเทือนจะเกิดอาการเปลือกแข็งซึ่งอาการที่เกิดขึ้นเกิดจากการสะสมของลิแกินที่เปลือกของมังคุด (Ketsa, 1998) พนิดา (2549) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยมีความชื้นในส่วนต้นของกราฟระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้เพื่อบอกความแตกต่างระหว่างมังคุดคัดและมังคุดเปลือกแข็งได้ อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรสมบัติเชิงกลอื่นๆที่นำมาทดลองเปรียบเทียบที่ขบวนการไหลและความแม่นยำในการตรวจสอบปัญหา งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็งเพื่อการตรวจสอบคุณภาพมังคุดส่งออก

อุปกรณ์และวิธีการ

ผลมังคุดถูกนำมาจากสวน อ.หลังสวน จ.ชุมพร โดยทำการเลือกผลที่มีขนาดใกล้เคียงกันคือน้ำหนักประมาณ 76-100 กรัม (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) แบ่งเป็นสองวัยคือวัยสีแดงและวัยสีม่วงค่าจากระดับสีของมังคุด 7 ระดับ (กรมวิชาการเกษตร, 2550) วัยละ 240 ผล ทำการคัดเลือกผลที่ไม่ได้รับความเสียหายจากโรคหรือแมลงรวมถึงเชิงกลอื่นๆ ผลมังคุดจะถูกนำส่งจากสวนมาทดสอบที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน โดยวิธีการประกอบด้วย การใช้ตัวแปรเชิงกล ได้แก่ ความแน่นเนื้อและดัชนีความแน่นเนื้อ ประเมินการเกิดความแข็งกับผลมังคุดที่ถูกกดด้วยแผ่นเบนเชิงคิดคั่งกับเครื่อง UTM ซึ่งทำการทดสอบดังนี้

1. กดผลมังคุดด้วยแผ่นแบนแข็ง (Rigid flat plate) ของ Universal Testing Machine Instron 5569 (UTM) ลงบนแก้มผลด้วยความเร็ว 25 mm/min (ASAE Standard, 1998) เพื่อจำลองสถานการณ์ให้เกิดสภาพการแข็งของเปลือก โดยแบ่งมังคุดออกเป็น 2 วัยแต่ละวัยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 60 ผล
 - ก. แรงกด 37 N (80% ของแรงกดแตก)
 - ข. แรงกด 23 N
 - ค. แรงกด 9 N
 - ง. ไม่ได้รับแรงกระทำ (ปัจจัยควบคุม)
2. ทดสอบบีบอัดแบบเกือบสถิต (Quasi-Static compression) ตามมาตรฐาน ASAE S363.3 โดยใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรกับเครื่อง UTM กดผลมังคุดที่ได้จากข้อ ก ด้วยความเร็ว 25 mm/min เพื่อหาค่าความแน่นเนื้อจากสูตร

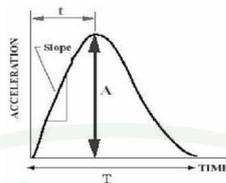
$$\text{ความแน่นเนื้อ} = F/D$$

$$\text{เมื่อ } F = \text{แรงกด (7 N หรือ 50 \% ของแรงกดทะลุ พนิดา (2549))}$$

$$D = \text{การเปลี่ยนรูปที่สมนัยกับแรงกด F (มิลลิเมตร)}$$

3. ทดสอบสมบัติการกระแทก โดยใช้อุปกรณ์วัดสมบัติการกระแทกของบัลลิสติกและอุคมศักดิ์ (2547) ที่ติดตั้งหัวกระแทกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและมีระยะปล่อยตก 2 เซนติเมตร เพื่อหาความเร่งสูงสุด (A), ระยะเวลาถึงความเร่งสูงสุด (t) และคำนวณดัชนีความแน่นเนื้อจาก

$$\text{ดัชนีความแน่นเนื้อ} = A/t$$



4. ผลมั่งคุดเพื่อตรวจสอบลักษณะของบริเวณที่เกิดการแข็ง

ผลและวิจารณ์

จากการให้ภาระเกือบสติดด้วยแรง 3 ระดับคือ 0.2, 0.5, และ 0.8 เท่าของแรงกดแตกกับมั่งคุดวัยสีแดงและมั่งคุดวัยสีม่วงแล้วทำการเก็บรักษาไว้ 1, 4, และ 8 วัน หลังจากให้ภาระ ผลมั่งคุดปกติเมื่อได้แรงกระทำลักษณะต่างๆเช่น การกดกระทำ การบีบ ผลมั่งคุดจะตอบสนองต่อแรงดังกล่าวโดยจะมีลักษณะของเนื้อเปลือกแข็งขึ้นหรือสามารถบอกได้ว่าเนื้อเปลือกเกิดความเสียหายนั่นเอง

1. การทดสอบหาความแน่นเนื้อ

Table 1 Firmness of compressed mangosteen which was affected by compressive loading, maturity and storage day

Storage days	Compression level % of rupture force							
	0		0.2		0.5		0.8	
	reddish	dark	reddish	dark	reddish	dark	reddish	dark
1	3.1743 ^{ab,c}	3.3247 ^{ab,c}	3.1445 ^{ab}	5.0864 ^{c,d,e}	3.1862 ^{ab,c}	5.0438 ^{b,c,d,e}	3.1004 ^a	5.0972 ^{c,d,e}
4	2.8313 ^a	4.0033 ^{ab,c}	2.8286 ^a	6.5639 ^e	3.1413 ^{ab}	8.4085 ^f	4.0646 ^{ab,c}	9.1018 ^f
8	3.4856 ^{ab,c}	4.4208 ^{ab,c,d}	3.7177 ^{ab,c}	8.3293 ^f	4.6767 ^{ab,c,d}	9.4968 ^f	6.0317 ^{d,e}	9.7507 ^f

Means followed by the same letter in the same column or row are significantly different at P<0.05 by DMRT

Table 1 แสดงค่าของความแน่นเนื้อของมั่งคุดที่ได้รับภาระกด ระยะเจริญเติบโตและวันเก็บรักษา มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ p<0.05 กับความแน่นเนื้อ เมื่อวันที่ 1 หลังจากมั่งคุดได้รับการกด สำหรับมั่งคุดวัยสีม่วงค่าที่ได้รับภาระกระทำค่าความแน่นเนื้อสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเปลือกโดยความแน่นเนื้อนี้มีแนวโน้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับผลมั่งคุดไม่ถูกภาระกดกระทำสอดคล้องกับการรายงานของBunsiri(2003) สำหรับวันเก็บรักษาที่ 4 และ 8 ที่วันเก็บรักษาหนึ่งๆ ความแน่นเนื้อนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับภาระกด และที่ระดับภาระกดเดียวกันวันเก็บรักษานานขึ้นความแน่นเนื้อจะสูงขึ้นโดยการเก็บธรรมชาติห้อง ผลมั่งคุดไม่ได้รับการกระทำจะแข็งขึ้น \approx 33%จากเดิมเมื่อเก็บไว้ 8 วัน แต่จะแข็งเป็น 2.5 และ 2.9 เท่าเมื่อถูกภาระกดกระทำที่ 20 และ 80 %ของภาระกระทำจนแตกหลังเก็บไปแล้ว 8 วัน สำหรับมั่งคุดวัยสีแดงในวันเก็บรักษาที่ 1 ความแน่นเนื้อของผลมั่งคุดที่ได้รับและไม่ได้รับการกด ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเก็บรักษานานเป็นวันที่ 4 และ 8 ที่วันเก็บรักษาเดียวกัน มั่งคุดวัยสีแดงจะมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกับตัวควบคุม ที่ภาระกด 80 % สูงกว่าความแน่นเนื้อที่ภาระกด 50 % และสูงกว่าความแน่นเนื้อตัวควบคุม ความแน่นเนื้อที่ภาระกด 20 % ไม่แตกต่างกับตัวควบคุม

2. การทดสอบหาดัชนีความแน่นเนื้อ

Table 1 Firmness index of compressed mangosteen which was affected by compressive loading, maturity and storage day

Storage days	Compression level % of rupture force							
	0		0.2		0.5		0.8	
	reddish	dark	reddish	dark	reddish	dark	reddish	dark
1	0.3877 ^a	0.4215 ^{a,b}	0.4183 ^{a,b}	0.6566 ^b	0.4986 ^{a,b}	0.5839 ^{a,b}	0.5390 ^{a,b}	0.6470 ^b
4	0.4595 ^{a,b}	0.5739 ^{a,b}	0.4507 ^{a,b}	0.8922 ^c	0.5332 ^{a,b}	1.0820 ^{c,d,e}	0.6036 ^{a,b}	1.1988 ^{d,e}
8	0.4286 ^{a,b}	0.6228 ^{a,b}	0.5769 ^{a,b}	1.0035 ^{c,d}	0.6176 ^{a,b}	1.2341 ^e	0.9080 ^c	1.5796 ^e

Means followed by the same letter in the same column or row are significantly different at $P < 0.05$ by DMRT

Table 2 แสดงค่าของดัชนีความแน่นเนื้อของมังคุดที่ได้รับภาระและไม่ได้รับภาระ จะได้ว่าภาระกด ระยะการเจริญเติบโต และจำนวนวันเก็บรักษามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ คอดัชนีความแน่นเนื้อ สำหรับวันเก็บรักษาที่ 1 ดัชนีความแน่นเนื้อของมังคุดวัยสีม่วงดำที่ได้รับภาระกด สูงกว่าผลมังคุดวัยเดียวกันที่เป็นตัวควบคุม แต่ดัชนีความแน่นเนื้อระหว่างกลุ่มที่ได้รับภาระกดไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่กับมังคุดวัยสีแดงดัชนีความแน่นเนื้อของผลที่ถูกภาระกด จะสูงกว่าดัชนีของผลวัยเดียวกันที่เป็นตัวควบคุม ในกลุ่มผลที่ถูกภาระกด ดัชนีจะสูงขึ้นตามภาระกดที่เพิ่มขึ้น สำหรับวันเก็บรักษาที่นานขึ้นเป็น 4 และ 8 วัน เมื่อพิจารณาที่วันเก็บรักษาเดียวกันดัชนีความแน่นเนื้อของมังคุดทั้ง 2 วัยที่ถูกภาระกดมีแนวโน้มสูงกว่าดัชนีความแน่นเนื้อของตัวควบคุมและยิ่งมังคุดถูกภาระกดสูงค่าดัชนีความแน่นเนื้อจะสูงขึ้นไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลมังคุดที่วันเก็บรักษาเดียวกัน และภาระกดเดียวกันมังคุดสีแดงน่าจะเป็นมังคุดเปลือกแข็งได้ยากกว่ามังคุดสีม่วงดำ เพราะว่าดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อของมังคุดสีแดงต่ำกว่า หรือสามารถเข้าใจอีกอย่างหนึ่งได้คือว่ามังคุดสีแดงมีความต้านทานต่อการเป็นเปลือกแข็งสูงกว่ามังคุดม่วงดำ ดัชนีความแน่นเนื้อน่าจะรับรู้ต่อการตรวจจับความแข็งของผลมังคุดดีกว่าความแน่นเนื้อ

สรุป

สมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็งได้แก่ความแน่นเนื้อและดัชนีความแน่นเนื้อมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5 % กับระยะการกด ระยะการเจริญเติบโต และจำนวนวันเก็บรักษา โดยผลมังคุดปกติวัยม่วงดำมีค่าเฉลี่ยของดัชนีความแน่นเนื้อคือ 0.5394, 0.8508, 0.9667 และ 1.1418 เมื่อผลมังคุดได้รับภาระแรงกดคือ ไม่ได้รับภาระ, 0.2, 0.5 และ 0.8 เท่าของแรงกดแตกตามลำดับ ในผลมังคุดวัยสีแดงมีค่าเฉลี่ยของดัชนีความแน่นเนื้อคือ 0.4253, 0.4820, 0.5498 และ 0.6835 เมื่อผลมังคุดได้รับภาระแรงกดคือ ไม่ได้รับภาระ, 0.2, 0.5 และ 0.8 เท่าของแรงกดแตกตามลำดับ มีความแตกต่างในดัชนีความแน่นเนื้อของมังคุดที่ถูกกดของทั้งสองระยะการเจริญเติบโตในวันหนึ่งของจำนวนการเก็บรักษา แต่ความแน่นเนื้อแตกต่างกันเฉพาะในมังคุดสีม่วงดำที่ถูกกด ที่ระดับภาระและวันเก็บรักษาเดียวกัน ดัชนีความแน่นเนื้อและความแน่นเนื้อของมังคุดสีม่วงดำสูงกว่ามังคุดสีแดงและมังคุดสีแดงมีแนวโน้มเป็นมังคุดเปลือกแข็งได้น้อยกว่ามังคุดม่วงดำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

เอกสารอ้างอิง

- กรมศุลกากร. 2549. การส่งออกสินค้าสำคัญของไทยปี 2545-2549. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารโดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมวิชาการเกษตร. 2550. ดัชนีการเก็บเกี่ยว : ความรู้สู่ผู้ค้าปลีก. กรมวิชาการเกษตร. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน 2550. เข้าถึงจาก : http://www.dwa.go.th/pl_data/MANSTEEN/dtech/hcc03.html.
- จริงแท้ ศิริพานิช. 2549. ชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมกรมเกษตรแห่งชาติ มณฑลนครศรีธรรมราช วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม. 453 หน้า.
- มัยจิต จิโรภาสและอุดมศักดิ์ ทิศาภิ. 2547. การรับรู้ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงภายใต้การกระทำภาระกด. วิศวกรรมสาร มก. 18(52). 19-26.
- พนิดา บุญปฤกษ์และมัยจิต จิโรภาส. 2549. ความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวและสมบัติเชิงกลของมังคุด. ว.วิทย์.คอม. 37(2)(พิเศษ). : 242-245.

- . 2549. สมบัติเชิงกลของผลมังคุดเปลือกแข็ง. การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม.
- สำนักงานสินค้ามาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ : มังคุด 2-2546. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- Bunsiri, Apita., Ketsa, Saichol., Robert E. Paull.. 2003. Phenolic metabolism and lignin synthesis in damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. *Postharvest Biology and Technology*. 29 : 61-71.
- Ketsa, S., Atamee, S.. 1998. Phenolic, lignin, peroxidase activity and increased firmness of damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. *Postharvest Biology and Technology*. 14 : 117-124.



*Manuscript

[Click here to view linked References](#)

MECHANICAL BRUISING OF YOUNG COCONUT

2 **Udomsak Kitthawee¹, Siwalak Pathaveerat*¹, Tanarat Srirungruang²**

David Slaughter³

4 ¹ *Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University,*
Kamphaengsaen, Nakohnpathom, Thailand/PHTIC/Center of Excellence in Agricultural and Food Machinery
6 *Kasetsart University.*

8 ² *Department of Mechanical Engineering Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,*
Nakohn Sawan Rajaphat University, Nakohn Sawan, Thailand

10 ³ *Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California, USA*

Abstract

12 One of the most important problems affecting the successful marketing of fresh young
coconut fruit is bruising. Bruising frequently occurs during postharvest operations due to
14 excessive compressive force and impact upon coconuts. A survey showed that the majority
(50 – 100%) of young coconuts in wholesale or retail markets in Thailand was bruised.
16 Bruised areas of < 100 mm² and bruise counts of 4 per fruit were predominant. The
mechanical bruising of young coconut was characterised by browning in the husk tissue
18 under the skin. Bruise volume was linearly correlated with either compression or impact
energy above the bruise threshold limit. Good correlation was observed between the
20 probability of bruise occurrence and compression or impact energy below the bruise
threshold. Based on the minimum energy level required to bruise the fruit, young coconut
22 fruit is much more susceptible to bruising occurrence under impact than under compression.

Keywords : Young coconut, mechanical bruising, threshold, compression, impact

24 * Corresponding author: email: fengslp@ku.ac.th

26

Nomenclature

V_B	Bruise volume, mm^3
w	Bruise width , mm
D	Bruise depth , mm
E_i	Impact energy, J
m	Mass of the spherical impactor, kg
h	Drop height, m
E_c	Compression energy, J
F	Contact compressive force at maximum, N
D_F	Deformation at correspondence with force, m
P	Probability of compression bruise occurrence
E_{xo}	Impact energy over which the bruise occurrence of overmature, J
E_{xm}	Impact energy over which the bruise occurrence of mature, J
E_{xi}	Impact energy over which the bruise occurrence of immature, J
σ_{max}	Maximum stress of the fruit, Pa
V	Relative velocity of approach of impacting spheres, m s^{-1}
m_1	Mass of one impacting sphere, kg
m_2	Mass of the other impacting sphere, kg
E_1	Modulus of elasticity of fruit, Pa
E_2	Modulus of elasticity of the other fruit, Pa
μ_1	Poisson's ratio of fruit
μ_2	Poisson's ratio of the other fruit
R_1	Radius of curvature of one impacting spheres, m
R_2	Radius of curvature the other impacting spheres, m

30 1. Introduction

32 During postharvest handling, packing, transportation and distribution, agricultural
34 products are very frequently subjected to mechanical loadings (Herold et al., 1998).
36 Compressive forces may also be applied to a fruit by other fruit because of excessive bin
38 depth or carton stack height, and by operators forcing overfilled cartons shut or into a tight
40 spots. Impacts impart high forces in an extremely short duration and a potential hazard in
42 many mechanical handling systems such as those used in packing lines. Large impact forces
usually result in bruises that permanently damage and lower the quality of the fruit. Bruise
sensitivity has been reported to increase with storage time (Brown et al., 1993). Impact
damage has been recognised as the most important cause of bruising in fruits; however,
excessive compression also causes bruising (Ruiz-Altisent, 1991). Bruising causes
considerable quality loss and decay during storage (Herold et al., 1998).

44 The bruise pattern in apple follows a curved failure plane (Ruiz-Altisent, 1991;
Jarimopas, 1984). With Asian pear, compression bruising appears as a parabolic region (Chen
46 et al., 1987) whilst with European pears bruising follows a shear failure plane of conical
48 shape (Ruiz-Altisent, 1991). Bruising is typically evaluated using the assumption that volume
of flesh above the failure plane was also bruised (for bruising with tissue browning) and it is
quantified as a function of width and depth of the bruised volume (Mohsenin, 1996;
Jarimopas et al., 2007b; Jarimopas, 1984; Chen and Sun, 1984). Alternatively area (Pang et
al., 1994), or diameter (Sober et al., 1990; Zapp et al., 1990; Siyami et al., 1988) of the
50 visible part of the bruise on the skin has been used to describe the size of bruises in apple.
Several researchers have attempted to correlate bruising levels with mechanical parameters,
52 such as force (Brusewitz et al., 1991), drop height (Bollen, 1993), impact velocity,
acceleration (Zapp et al, 1990; Siyami et al., 1988; Pang et al., 1994) and energy (Bollen et

54 al., 2001; Brusewitz et al., 1991; Jarimopas, 2007a). Some researchers have found that a fruit,
when exposed to small impacts, exhibits no bruising but that noticeable bruising occurs when
56 a certain level of impact energy has been exceeded. Compression energy, either by slow
compression or impact, was shown by several researchers to significantly affect bruising
58 (Mohsenin, 1996; Jarimopas et al., 2007a). Linear correlations have been found between
bruise volume and impact or absorbed energy (Jarimopas, 1984; Schoorl and Holt, 1980;
60 Brusewitz and Bartsch, 1989).

Bajema and Hyde (1998) defined the bruise susceptibility of a fruit as the bruise
62 volume per unit energy found from the slope of the bruise volume-energy graph above the
bruise threshold. The bruise threshold has been expressed as the energy or drop height (with
64 constant mass) that results in a bruise probability of occurrence of one (Bollen, 1993; Bollen
et al., 2001; Jarimopas et al., 2007a). Several researchers used bruise threshold analysis to
66 determine bruising behaviour and to determine the appropriate cushioning for apple (Bollen
et al., 2001; Jarimopas et al., 2007a). Most of the bruises on trimmed young coconut occur
68 during postharvest handling, packing, transportation and distribution before the coconuts are
trimmed, and the bruises continue to grow larger even if trimmed fruits are dipped into a
70 solution to protect browning.

The objectives of this research were to A) quantify the level of bruising of young
72 coconut found in wholesale and retail markets in Thailand, B) determine the postharvest
bruising characteristics of young coconut under impact and quasi-static compression, and C)
74 compare the bruise volume-energy relationship between quasi-static compression loading and
impact loading of fresh young coconut fruit.

76

2. Materials and Methods

78

2.1. Market survey of bruising in young coconut fruit in Thailand

80 A survey was conducted to determine the level of bruising found in trimmed young
coconut at wholesale and retail markets in Thailand. One to two wholesalers at each of three
82 of the largest wholesale fruit markets in Thailand, four retail supermarkets, and 10 local
retailers in Bangkok were selected at random for study. The survey evaluated the percent of
84 bruised fruit and the number of bruises and the total bruised area per fruit at each market site.
Trimmed young coconuts (20 from each wholesaler, and 10 from each retailer) were selected
86 at random for study. The method of Jarimopas and Ruttanadat (2007), where bruised surface
areas on the surface of the trimmed fruit were marked on transparency plates and further
88 estimated by means of the automatic leaf area measurement system, was used to determine
the bruised area of each fruit.

90

2.2 Characterisation of impact bruising in young coconut

92 2.2.1 Bruise volume and impact energy relationship above the bruise threshold

Eighty newly-harvested, flawless, young coconut samples of uniform size at each of
94 three maturity stages (immature, mature, and overmature; 240 fruits total) were selected at
random. Each fruit was subjected to impact loading by dropping a spherical impactor onto
96 the fruit (Fig. 1). The series of four spherical impactors of differing mass and diameter (12 g,
24 g, 48 g, and 96 g, with diameters of 14, 19, 25 and 32 mm, respectively (Fig. 2)) were
98 used to provide a range of impact loading conditions. Ten impact treatments were applied
with each impactor using drop heights in 50 mm increments from 50 to 500 mm. The impact
100 treatment for each drop height and impactor combination was applied five times around the
equator to each of two fruits. Before each impact test, a thin coating of cooking oil was
102 applied to the surface of the impactor to mark the contact point on the sample. After impact
the contact area was marked with a permanent ink pen for bruise measurement. The

104 impacted samples were stored at room temperature for 24 h to allow bruise discoloration to
develop (Pang et al., 1994). Thereafter, the fruit was sectioned parallel to its axis at the
106 marked area for the measurement of bruise width and depth (Fig. 3). The bruise volume, V_B
(mm^3), (Jarimopas et al., 2007a) was determined by

$$108 \quad V_B = \frac{\pi}{8} w^2 D \quad (1)$$

where, w = Bruise width (mm) and; D = Bruise depth (mm)

110 The impact energy E_i (J) could be determined from

$$E_i = mgh \quad (2)$$

112 where m is the mass of the spherical impactor (kg); g is acceleration due to gravity (9.81 m s^{-2})
and h is drop height (m).

114

2.2.2 Impact bruise threshold determination

116 The same impact loading procedure was applied to a second set of newly-harvested
young coconuts using a series of reduced drop heights in order to evaluate the probability of
118 bruise occurrence and determine the bruise threshold (impact level where all fruits are
bruised). For this test, 60 immature, 56 mature, and 76 overmature fruits were tested using
120 drop heights (in 10 mm increments) from 160 to 300 mm, 140 to 270 mm, and 50 to 230 mm,
respectively. Four fruits were tested at each drop height and evaluated using the previously
122 described procedure. The probability of bruise occurrence was determined by the percent of
bruised fruits at each impact loading condition. The relationship between V_B and E_i was also
124 evaluated for bruised fruits.

126 2.3. Characterisation of compression bruising in young coconut

2.3.1 Bruise volume and compression energy relationship above the bruise threshold

128 Sixteen newly-harvested, flawless, young coconut samples of uniform size at each of
 130 three maturity stages (immature, mature, and overmature, 48 fruits total) were selected at
 random. Each fruit was slowly compressed by a spherical indenter using a Universal Testing
 Machine UTM (Instron, 5569, Instron, High Wycombe, UK). The loading rate was set at 15
 132 mm min⁻¹ (ASAE, 1998). Each fruit was placed on moistened sand to minimise the contact
 stress between fruit surface and the supporting sand so that fruit deformation at the support
 134 was minimal (Jarimopas et al., 2007a). The stem axis of the fruit sample was set parallel to
 horizontal plane. Compression tests were conducted with four spherical indenters of 14, 19,
 136 25 and 32 mm diameter. For each indenter, compression was applied at five contact points
 on the fruit surface along the equator. Each compression test was repeated with 4 samples for
 138 the same indenter. After holding the fruit 24 h for bruise development, the previous method
 of bruise measurement was applied. The energy required to compress the fruit (area under
 140 curve of force against deformation) was determined by

$$E_c = \int F dD_F \quad (3)$$

142 where F is contact compressive force (N) and D_F is deformation at corresponding force (m).

2.3.2 Compression bruises threshold determination

144 The same quasi-static compression loading procedure described in section 3.1 was
 applied to another set of newly-harvested young coconuts in order to evaluate the probability
 146 of bruise occurrence at different levels of deformation. Twenty eight newly-harvested,
 flawless, young coconut samples of uniform size at each of three maturity stages (immature,
 148 mature, and overmature, 84 fruits total) were randomly selected. Fruits, in replicates of four
 fruits, were subjected to compression tests starting at a deformation of 1 mm for the first set
 150 and increasing the deformation with each new set of four fruits until bruising occurred. A
 circle was marked in permanent ink at each contact test location. The relationship between

152 the probability of bruise occurrence and the compression energy, E_c (Eq. 3), was analysed to
153 determine the compression bruise threshold.

154

155 3. Results and Discussion

156

157 3.1. Young coconut fruit bruising at wholesale and retail markets

158 3.1.1 Bruised fruit proportion at market

159 Bruising appeared as a brown region of husk tissue of irregular shape (Fig. 4).
160 Bruising might be found on husk surface or propagated into the shell. For the group of 4
161 supermarkets, the proportion of bruised fruits ranged from 50 to 100 %. Regarding the group
162 of wholesalers from the 3 big open markets, the proportion of bruised fruits ranged from 65
163 to 100 %. The proportion of bruised fruits at the local retailers was about 75 %.

164 3.1.2 Bruise numbers and bruise area per fruit

165 The distribution of fruits with one to sixteen bruises per fruit was reported for each
166 market (Fig. 5). There were marked differences among supermarkets in the amount of
167 bruised fruits with high number of bruises per fruit. For example, most of the bruised fruits
168 in supermarket number 4 had only 1 to 2 bruises per fruit, and none had more than 6 bruises,
169 whereas more than 50% of the fruits in supermarkets 2 and 3 had more than 6 bruises per
170 fruit. A similar trend was observed in the group of wholesalers. At wholesale two bruises
171 per fruit was most common occurring in 25 % of the fruit while fruits with 1, 3 or 4 bruises
172 occurred in 12 to 19 % of the fruit. The bruise distribution at local retail markets appears to
173 follow a normal distribution with fruits containing 4 bruises being most common with a
174 frequency of 25 %. The greatest number of bruises per fruit found in the supermarkets, the
wholesalers of open markets, and the retailers were 16, 13 and 10, respectively. The

176 distribution of bruise area in the supermarkets, wholesalers of the open markets and the
retailers were characterised by i) most fruit (ranging from 28.2-38.3%) had bruise areas of <
178 1 cm^2 , ii) the frequency declining exponentially as bruise area increased, and iii) the bruise
area at which the frequency dropped below 1% occurred for bruise area $\geq 900\text{-}1000 \text{ mm}^2$ in
180 wholesale and the retailer markets, while for supermarkets it occurred when the bruise area \geq
 $800\text{-}900 \text{ mm}^2$.

182

3.2. Impact Bruising

184 3.2.1 Bruise volume and impact energy relationship above the bruise threshold

Impact loading using a spherical impactor caused permanent deformation and bruising
186 underneath the contact surface of the fruit (Fig. 3). The bruising pattern appeared as brown
hemisphere pointing inward to the fruit core. For mature young coconut fruit and various
188 impactor sizes, bruise volume varied proportionally with impact energy (Fig. 6). These
proportions occurred in the same pattern for the other maturities. The greater the impact
190 energy applied, the greater the bruise volume became. All $V_B - E_i$ linear regression equations
had high correlations (coefficient of determination $R^2 \geq 0.92$, data not shown). The linear
192 relationship between V_B and E_i agreed with that reported by Shoorl and Holt (1980),
Jarimopas (1984), Brusewitz and Bartsch (1989) and Jarimopas et al. (2007b). Maturity and
194 impactor size affected the $V_B - E_i$ fitted equations. This can be seen from bruise susceptibility
or the slope of each $V_B - E_i$ equation. For a specific impactor size, bruise susceptibility
196 increased with fruit maturity. This is likely a function of the tissue strength decreasing as it
matures (Chen, 1996). For a specific applied impact condition, soft fruit deformed more than
198 firm fruit and, the soft fruit tended to get bruised more. For a specific maturity, the larger the
impactor diameter, the higher the bruise susceptibility of the fruit became. The maturity and

200 impactor size had significant effects on bruise susceptibility at $p < 0.05$ (Table 1). Due to its
better ability to induce bruise, the 32 mm diameter impactor was then selected for use in
202 determining the impact threshold.

3.2.2 Impact bruise threshold determination

204 The linear regression model was fitted between the probability of bruise occurrence P
and the impact energy E_i of a young coconut subjected to a 32 mm diameter impactor (Fig.
206 7). Good correlation between P and E_i ($R^2 \geq 0.97$) was obtained. The linear relationship
between P and E_i agreed with that described by Jarimopas et al. (2007b). The fitted graphs
208 suggest that the applied impact energy which was less than or equal to E_{xo} , E_{xm} , E_{xi} (Fig. 7)
did not bruise young coconut husk of the overmature, mature, and immature fruits,
210 respectively. There was a significant influence of maturity on impact threshold energy level
and threshold bruise volume at $p < 0.05$ (Table 2).

212

3.3. Characterisation of compression bruising in young coconut

3.3.1 Bruise volume vs. compression energy above the bruise threshold

Bruising of the young coconut husk under quasi-static compression displayed the
216 same appearance as that under impact (Fig. 8). A linear relationship between V_B and E_c
confirmed that reported by Mohsenin (1996) and Jarimopas (1984). The fruit maturity and the
218 indenter size significantly affected the bruise susceptibility (bruise volume per unit energy) at
 $p < 0.05$ (Table 3).

3.3.2 Compression bruise threshold determination

220 Probability of compression bruise occurrence P varied nonlinearly with compression
energy E_c ($R^2 \geq 0.9$) for a specific stage of maturity (Fig. 9). The maturity level significantly
222 affected the bruise threshold energy level and the related bruise volume when P was equal to

224 1 (Table 4). The maximum bruise threshold energy level for the immature fruit might be
because the rupture force of young coconut husk was greatest for the immature fruit and
226 declines sequentially for mature and overmature fruit. In comparison with the bruise
threshold energy level under impact and compression, the impact bruise threshold level was
228 much less than that of the compression bruise threshold energy level (about 3.6 - 8.2 times).
Impact bruising occurred at small deformations ($\cong 3.15$ mm) and small contact areas
230 requiring less impact energy. On the other hand, with quasi-static compression, based on the
basic force – deformation curve, bruising took place at large deformations ($\cong 5$ mm) and large
232 contact areas, and the compression energy was much greater. In addition, the resulting larger
bruise volume propagated deeper inside the husk where a large amount of fibre is present
234 (Jarimopas and Ruttanadat, 2007). The fibre may increase the failure strength of the husk.
Therefore the failure of husk tissue requires greater stress and energy levels. With more
236 energy affecting on the failure strength of the husk, the bruise volume of compression is
greater than the bruise volume of impact. The young coconut fruit was much more
238 susceptible to bruising occurrence under impact than compression. This may indicate that the
loading rate affects the viscoelastic (i.e. stress and strain that are dependent on time)
240 threshold of young coconut bruising.

242 3.4. Application of the result

Bollen (1993) and Pang et al. (1994) wrote that fruit-fruit impacts are a significant
244 cause of damage in many postharvest handling systems. In order to design a packing line to
handle fresh young coconuts, it is desired to know the maximum velocity of a fruit in
246 handling process to avoid fruit to fruit bruising. The bruise energy mechanism of young
coconut resembles that of apple, which was hypothesised in many studies to behave

248 elastically. Assuming a young coconut is elastic below the bruise threshold. For elastic
 impact of two elastic spheres, we know from Chen et al. (1996) that

$$250 \quad \sigma_{\max} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V^2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)^{1/5} \left[\frac{E_1 E_2}{E_2 (1 - \mu_1^2) + E_1 (1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^{3/5} \quad (4)$$

where σ_{\max} is maximum stress in the sphere (Pa); V is relative velocity of approach of
 252 impacting spheres (m s^{-1}); m_1 is mass of one impacting sphere (kg); m_2 is mass of the other
 impacting sphere (kg); E_1 is modulus of elasticity of one sphere (Pa); E_2 is modulus of
 254 elasticity of the other sphere (Pa); μ_1 is Poisson's ratio of one sphere; μ_2 is Poisson's ratio of
 the other sphere; R_1 is radius of curvature of one impacting spheres (m) and R_2 is radius of
 256 curvature the other impacting spheres (m)

258 When a 96 g spherical impactor impacts a young coconut fruit, such an impact is
 viewed as the impact of two elastic bodies. Referring to Table 2 the impact bruise threshold
 260 energy level for the overmature fruit is 0.207 J. Thus, the corresponding drop height will be
 $0.207 \text{ J} / (\text{impactor mass} \times g) = 0.207 \text{ J} / (0.096 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m s}^{-2}) = 0.22 \text{ m}$. V will be $(2 \times 9.81$
 262 $\text{m s}^{-2} \times 0.22 \text{ m})^{1/2} = 2.078 \text{ m s}^{-1}$. Considering subscript 1 and 2 refer to impactor and young
 coconut, $m_1 = 0.096 \text{ kg}$, $m_2 = 1.563 \text{ kg}$, Thus $R_1 \ll R_2$ and therefore,

$$264 \quad \sigma_{\max 1} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V_1^2 m_1 \right)^{1/5} \left[\frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{1}{R_1} \right)^{3/5} \quad (5)$$

266 In the case of a young coconut fruit falling to the floor, fruit deformation is considered
 to be at the bioyield limit, so subscript 1 and 2 in the Eq. 4 now refer to the coconut fruit and
 268 flat plate.

$$\sigma_{\max 2} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{15}{16} V_2^2 m_2 \right)^{1/5} \left[\frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)} \right]^{4/5} \left(\frac{1}{R_2} \right)^{3/5} \quad (6)$$

270 The same max stress would occur on young coconut contact surface. Then $\sigma_{max1} = \sigma_{max2}$

$$\frac{\sigma_{max1}}{\sigma_{max2}} = \left(\frac{V_1^2 m_1}{V_2^2 m_2} \right)^{1/5} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{3/5} \quad (7)$$

$$272 \frac{\sigma_{max1}}{\sigma_{max2}} = \left(\frac{2.078^2 \cdot 0.096}{V_2^2 \cdot 1.563} \right)^{1/5} \left(\frac{0.08}{0.016} \right)^{3/5}$$

$$\frac{\sigma_{max1}}{\sigma_{max2}} = \left(\frac{4.318}{V_2^2 \cdot 0.0614} \right)^{1/5} (5.1923)^{3/5}$$

$$274 V_2 \cong 5.75 \text{ m s}^{-1}$$

The velocity limit of a young coconut fruit will be 5.75 m s⁻¹ to avoid impact-bruising
276 damage.

278 4. Conclusions

A survey of postharvest bruising of young coconut fruit at wholesale and retail
280 markets revealed that 50-100% of the fruits were bruised. Bruise areas of < 100 mm² and 4
bruises per fruit were the most common. Bruise volume was linearly correlated with either
282 compression or impact energy levels above the bruise threshold level. Good correlation was
observed between the probability of bruise occurrence and compression or impact energy
284 levels below the bruise threshold. Based on the minimum energy level required to bruise
young coconut, the fruit is much more susceptible to bruising occurrence under impact than
286 under compression.

288 Acknowledgement

All authors would like to dedicate the success of this work to late Professor Budit
290 Jarimopas. The authors gratefully acknowledge the Postgraduate Education and Research

Development Project in Post-harvest Technology, Chiang Mai University, and Kasetsart
 292 University Research and Development Institute, Thailand, for financial support. This research
 was also supported by the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D.
 294 Program (Grant No. PHD/0108/2549) and Suan Dusit Rajabhat University.

References

- 296 ASAE Standard S368.3, 1998. Compression test of food materials of convex shape. ASAE,
 298 St. Joseph, MI, USA.
- Bajema, R.W., Hyde, G.M., 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of
 300 whole fruit and vegetable specimens. *Trans. ASAE*. 41 (5), 1399-1405.
- Bollen, A.F., 1993. Apple-apple impact evaluation using an instrumented sphere. *Agric. Eng.*
 302 *J.* 2 (1&2), 1-14.
- Bollen, A.F., Cox, N.R., Dela Rue, B.T., Painter, D.J., 2001. A descriptor for damage
 304 susceptibility of a population of produce. *J. Agric. Eng. Res.* 78 (4), 391-395.
- Brown, G.K., Schulte, N.L., Timm, E.J., Armstrong, P.R., Marshall, D.E., 1993. Reduce
 306 apple bruise damage. *Tree Fruit Postharvest J.* , 4 (3), 6-10.
- Brusewitz, G.H., Bartsch, J.A., 1989. Impact parameters related to postharvest bruising of
 308 apples. *Trans. ASAE*. 32 (3), 953-957.
- Brusewitz, G.H., McCollum, T.G., Zhang, X., 1991. Impact bruise resistance of peaches.
 310 *Trans. ASAE*. 34(3), 962-965.
- Chen, P., 1996. Quality evaluation technology for agricultural products. Invited paper for
 312 presentation at the International Conference on Agricultural Machinery Engineering,
 Seoul, Korea.
- 314 Chen, P., Ruiz, M., Lu, F., Kader, A.A., 1987. Study of impact and compression damage of
 Asian pears. *Trans. ASAE*. 30 (4), 1193-1197.

- 316 Chen, P., Ruiz-Altisent, M., Barreiro, P., 1996. Effect of impacting mass on firmness sensing
of fruits. *Trans. ASAE*. 39 (3), 1019-1023.
- 318 Chen, P., Sun, Z., 1984. Critical strain failure criterion: Pros and Cons. *Trans. ASAE*. 27 (1),
278-281.
- 320 Herold, B., Oberbarnscheidt, B., Geyer, M., 1998. Mechanical load and its effect on bulb
onions due to harvest and postharvest handling. *J. Agric. Eng. Res.* 71 (4), 373-383.
- 322 Jarimopas, B., 1984. Failure of Apple under Dynamic Loadings. Unpublished D.Sc.
Dissertation, Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Israel Institute of
324 Technology, Israel.
- Jarimopas, B., Ruttanadat, N., 2007. Development of a young coconut fruit trimming
326 machine. *J. Food Eng.* 79, 752-757.
- Jarimopas, B., Singh, S.P., Sayasoonthorn, S., Singh, J., 2007a. Comparison of package
328 cushioning materials to protect postharvest impact damage to apples. *Packaging
Technol. Sci.* 20 (5), 315-324.
- 330 Jarimopas, B., Sirisomboon, P., Sothornvit, R., Terdwongworakul, A., 2007b. The
Development of Engineering Technology to Improve the Production of Tropical Fresh
332 Produce in Developing Countries. In *Focus on Food Engineering Research and
Development*, edited by Vivian N. Pletney. Nova Science Publishers Inc. New York.
- 334 Mohsenin, N.N., 1996. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, 2nd Revised
Edition; Gordon and Breach Science Publishers.
- 336 Pang, D.W., Studman, C.J., Banks, N.H., 1994. Apple bruising thresholds for an
instrumented sphere. *Trans. ASAE*. 37 (3), 893-897.
- 338 Ruiz-Altisent, M., 1991. Damage mechanisms in the handling of fruits. In *Progress in
Agricultural Physics and Engineering*, Matthews J. (ed.), Silsoe Research Institute,
340 C.A.B. International: Oxon, UK, pp. 231-257.

- Schoorl, D., Holt, J.E., 1980. Bruise resistance measurements in apples. *J. Texture Stud.* 11, 389-394.
- Siyami, S., Brown, G.K., Burgess, G.J., Gerrish, J.B., Tennes, B.R., Burton, C.L., Zapp, R.H., 1988. Apple impact bruise prediction models. *Trans. ASAE.* 31 (4), 1038-1046.
- Sober, S.S., Zapp, H.R., Brown, G.K., 1990. Simulated packing line impacts for apple bruise prediction. *Trans. ASAE.* 33 (2), 629-636.
- Zapp, H.R., Ehlert, S.H., Brown, G.K., Armstrong, P.R., Sober, S.S., 1990. Advanced instrumented sphere (IS) for impact measurements. *Trans. ASAE.* 33 (3), 955-960.

Figure

19

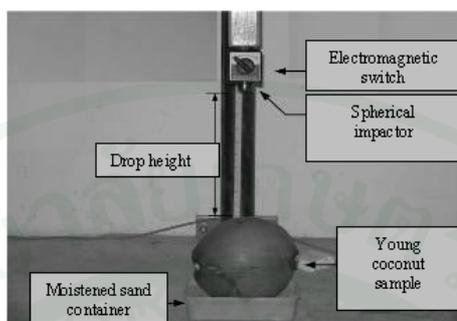


Fig 1 Drop test set-up for impact-bruising measurement

	A	B	C	D
Diameter (mm)	14	19	25	32
Mass (g)	12	24	48	96

Fig 2 Various spherical impactors

20

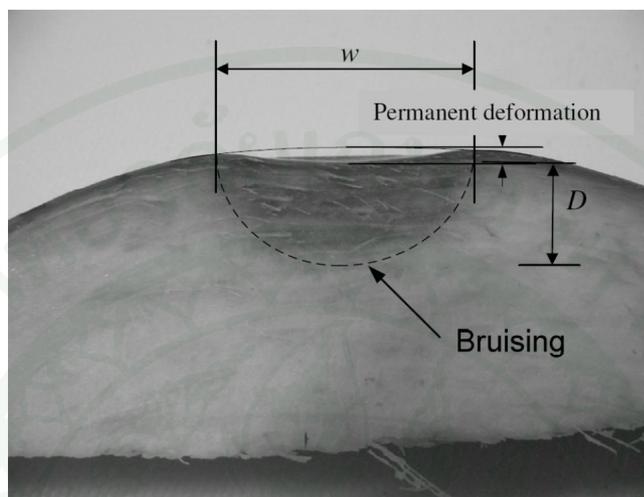


Fig 3 Bruise appearance of young coconut husk due to impact

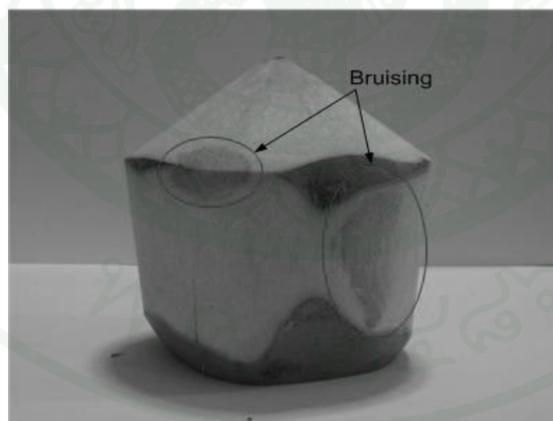


Fig 4 A commercial trimmed young coconut fruit showing bruises on its husk

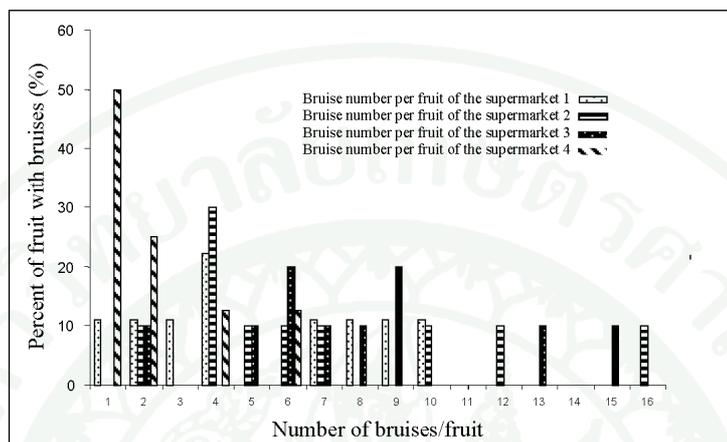


Fig 5 Frequency distribution of bruise number per young coconut fruit in the supermarkets

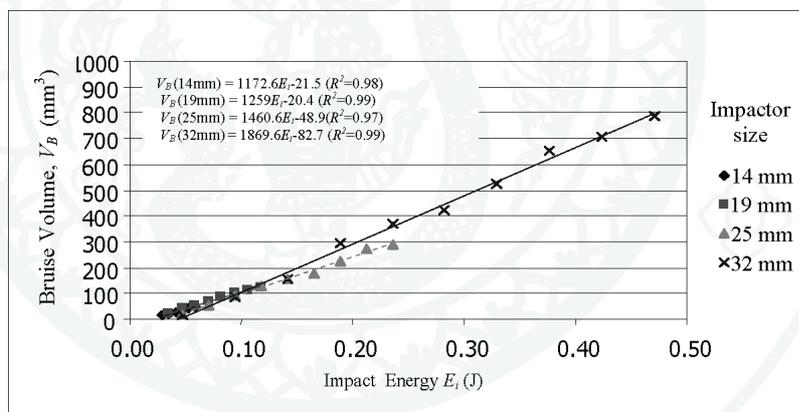


Fig 6 Relationship between bruise volume and impact energy of mature young coconut fruit with various impactor sizes

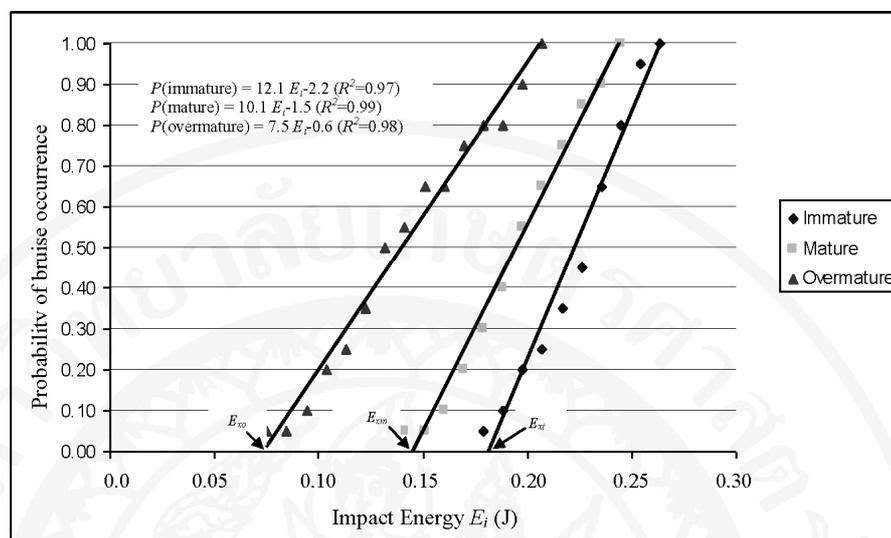


Fig 7 Relationship between probability of bruise occurrence and impact energy generated by 32 mm diameter impactor at different maturity

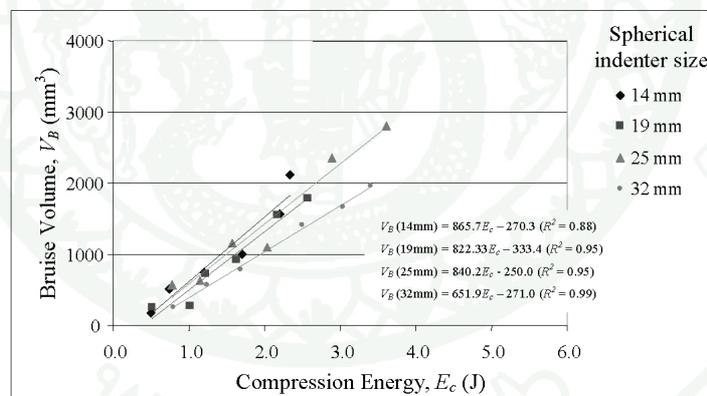


Fig 8 Relationship between bruise volume and compression energy of mature young coconut fruit for different indenter sizes

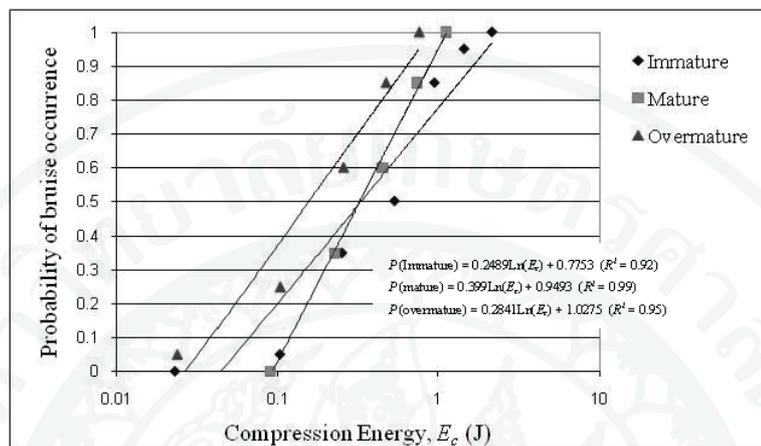


Fig 9 Graphs fitted by nonlinear regression between probability of bruise occurrence and slow compression energy

Table

17

Table 1 Effects of maturity and plunger size on bruise susceptibility ($\text{mm}^3 \text{J}^{-1}$) of young coconut husk for impact test

Maturity	Spherical impactor size (mm)			
	14	19	25	32
Immature	967.9 ± 537.8 a*	1,106.7 ± 770.1 ab	1,178.8 ± 473.7 abc	1,552.4 ± 550.1 def
Mature	1,187.4 ± 718.1 abc	1,280.6 ± 677.3 abcd	1,365.2 ± 423.5 bcde	1,663.3 ± 641.8 ef
Overmature	1,307.6 ± 733.2 bcd	1,473.7 ± 1,069.2 cdef	1,554.3 ± 795.6 def	1,716.0 ± 832.1 f

* Means with different letters are significantly different at $p < 0.05$.**Table 2** Bruise volume and bruise threshold energy (at $P^{**}=1.0$) of young coconut fruit for different maturity stages subjected to impact test (32 mm impactor)

Maturity	Bruise volume* (mm^3)	Threshold energy* (J)
Immature	422.8 ± 47.9 b	0.264 c
Mature	345.5 ± 47.1 a	0.245 b
Overmature	307.9 ± 48.0 a	0.207 a

* Means in the same column with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

** Probability of bruise occurrence = number of non-zero bruises/number of replications of the same treatment.

Table 3 Effects of maturity and plunger size upon bruise susceptibility ($\text{mm}^3 \text{J}^{-1}$) of young coconut husk for slow compression test

Maturity	Spherical plunger size (mm)			
	14	19	25	32
Immature	799.2 ± 294.8 c*	404.2 ± 183.6 a	675.8 ± 263.4 bc	702.0 ± 276.4 bc
Mature	739.5 ± 234.6 bc	660.8 ± 220.4 bc	713.5 ± 204.8 bc	571.0 ± 214.8 ab
Overmature	1,454.0 ± 673.4 f	1,253.4 ± 376.7 e	1,172.7 ± 540.8 de	1,035.6 ± 314.2 d

* Means with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

Table 4 Bruise volume and bruise threshold energy (at $P^{**}=1.0$) of young coconut fruit for different maturity stages subjected to compression test. (32 mm impactor)

Maturity	Bruise volume* (mm ³)	Threshold energy* (J)
Immature	2073.8 ± 382.2 c	2.17 ± 0.28 c
Mature	1435.9 ± 329.4 b	1.13 ± 0.19 b
Overmature	1090.5 ± 414.4 a	0.76 ± 0.19 a

* Means in the same column with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

** Probability of bruise occurrence = number of non-zero bruises / number of replications of the same treatment.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายอุดมศักดิ์ กิจทวี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 กันยายน 2520
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 9