

รหัสโครงการ SUT7-703-55-12-44



## รายงานการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว: กรณีศึกษาบรรจุภัณฑ์สำหรับผลผลิตทางการเกษตร  
(Utilization of Rice Straw: A Case Study of Packaging for Agricultural Products)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว: กรณีศึกษาบรรจุภัณฑ์สำหรับผลผลิตทางการเกษตร

(Utilization of Rice Straw: A Case Study of Packaging for Agricultural Products)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร.วีรัชย์ อางหาญ

ดร. กระจวี ตรีอำนาจ

นายชนากร แนวกลาง

นายเกียรติศักดิ์ ใจโต

นางสาวเบญจวรรณ วานมนตรี

นางสาวนาฏชนก ปรางปรุ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2555 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจหาญ ผู้อำนวยการเทคโนโลยีและหัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวลที่อำนวยความสะดวกเรื่องการใช้สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์วีระกุล มีกลางแสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่อนุเคราะห์เครื่องสั่นสะเทือนจำลองในการทดสอบและขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่ได้ช่วยกันทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี







## Abstract

The objective of this research was to evaluate cushioning material from rice straw in order to prevent mechanical damage of fruit. The three types of mechanical damage, i.e. impact, compression and vibration, were tested with Fuji apple fruits size no. 80 and 100 in this study. The eight types of protection, i.e. non protection, foam net, and rice straw cushioning material thickness of 2, 3, 4 mm. (type strip cutting and type no cutting) were test with ballistic pendulum technique for evaluate potential of protection of rice straw cushioning from five level of impact energy. The result indicated that the cushioning material from rice straw at the thickness of 4 mm. with strip cutting is the best protective material for apple fruits. The highest bruise resistant of apple size 80 and 100 are 656.53 and 380.64 mm<sup>3</sup>/joule respectively. For the compression testing, the universal testing machine (UTM) was use to compress the apple fruits with the eight types of protection like the ballistic pendulum technique. The compression speed of 2.5 mm/min was applied to apple fruit until rupture point. The energy absorption in each condition was evaluated from the force – deformation graph. The result of this test indicated that rice straw cushioning material at the thickness of 4 mm. without strip cutting has highest energy absorption of 8.61 for apple size 100 and that rice straw cushioning material at the thickness of 4 mm. with cutting has highest energy absorption of 12.76 joule for apple size 80. For vibration testing, comparison of rice straw cushion packaging and traditional packaging (polystyrene foam packaging) was investigated with the vibration simulator base on ASTM D999 method A2 standard at frequency of vibration of 4 Hz for 1 hour. Fruit damage (bruise abrasion crack i.e.) in terms of total damage was evaluated. The results showed that apple size 80 had total damage of 17.50 and 22.92 percent for traditional and rice straw cushioning packaging, respectively. Apple size 100 had total damage of 11.33 and 14.67 percent for traditional and rice straw cushioning packaging, respectively.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	
2.1 ฟางข้าว (rice straw) .....	3
2.2 ความเสียหายเชิงกลของผลิตผลเกษตร .....	4
2.3 วิธีการทดสอบความเสียหายเชิงกล .....	9
2.4 การบรรจุหีบห่อผลิตผลทางการเกษตรสำหรับการจำหน่าย.....	14
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.2 วิธีการ .....	25
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ	
4.1 วัสดุกันกระแทกจากกระดาษฟางข้าว .....	32
4.2 การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ล.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	48
เอกสารอ้างอิง .....	49
ภาคผนวก	
เอกสารเผยแพร่งานวิจัย.....	52
ประวัติผู้วิจัย .....	65

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์จากการวัด 20 ครั้งของผลแอปเปิลผลเดียว .....	7
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์การวัดแอปเปิล 19 ผล ที่ถูกปล่อยตกลงพื้นแข็งจากความสูง 25 ซม. ....	7
ตารางที่ 2.3 คำนวณหาปริมาตรรอยชำของผลแอปเปิล .....	8
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของผลแอปเปิล.....	32
ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม.....	33
ตารางที่ 4.3 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี.....	34
ตารางที่ 4.4 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วย กระดวยฟางข้าวหนา 2 mm.....	35
ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วย กระดวยฟางข้าวหนา 4 mm .....	36
ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วย กระดวยฟางข้าวหนา 6 mm .....	37
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาตรรอยชำจากการทดสอบด้วยวิธีการตกกระทบ .....	39
ตารางที่ 4.8 ระดับพลังงานที่เริ่มเกิดรอยชำ .....	42
ตารางที่ 4.9 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรชำกับพลังงานกระแทกของแอปเปิล เมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ.....	43
ตารางที่ 4.10 ความเสียหายของแอปเปิลเบอร์ภายใต้สภาวะถั้้นสะท้อนจำลอง.....	46

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การทดสอบการกระแทกแบบต่าง ๆ.....	9
รูปที่ 2.2 การทดสอบแบบ Drop test.....	10
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์หาค่าความแน่นเนื้อ.....	11
รูปที่ 2.4 การทดสอบการกระแทกแบบ simple pendulum .....	12
รูปที่ 2.5 การทดสอบโดยใช้ Compound Pendulum.....	12
รูปที่ 2.6 การทดสอบโดยใช้ Impact ram.....	13
รูปที่ 2.7 การทดสอบโดยใช้ Ballistic Pendulum.....	14
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการกระแทก .....	25
รูปที่ 3.2 เครื่องจำลองการสั่นสะเทือน .....	25
รูปที่ 3.3 เครื่องสับย่อย.....	25
รูปที่ 3.4 ชุดขึ้นรูปถาดบรรจุภัณฑ์.....	25
รูปที่ 3.5 ลักษณะการซ้ำของผลแอปเปิลจากการกระแทก .....	27
รูปที่ 3.6 ลักษณะของกระดากฟางข้าวและแนวคัตรีว .....	28
รูปที่ 3.7 ลักษณะรอยซ้ำที่เกิดจากการกระแทก.....	29
รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมวิเคราะห์พลังงานของ Ballistic Pendulum.....	29
รูปที่ 3.9 ลักษณะของถาดเยื่อกระดากฟางข้าว .....	30
รูปที่ 3.10 การทดสอบภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนจำลอง .....	31
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงและปริมาตรรอยซ้ำเฉลี่ย .....	38
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงและพลังงานกระแทกเฉลี่ย .....	39
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยซ้ำเฉลี่ย ของแอปเปิลเบอร์ 80.....	40
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยซ้ำเฉลี่ย ของแอปเปิลเบอร์ 100.....	41
รูปที่ 4.5 พลังงานดูดกลืนเมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ ของแอปเปิลเบอร์ 80.....	44
รูปที่ 4.6 พลังงานดูดกลืนเมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆของแอปเปิลเบอร์ 100.....	45
รูปที่ 4.7 ความเสียหายของผลแอปเปิลจากการทดสอบด้วยเครื่องสั่นสะเทือนจำลอง.....	46

## คำอธิบายสัญลักษณ์

BV	คือปริมาตรรอยขีด (mm <sup>3</sup> )
d	คือความลึกรอยขีด (mm)
w	คือความกว้างรอยขีด (mm)
w <sub>1</sub>	คือความกว้างรอยขีดตามแกนหลัก (mm)
w <sub>2</sub>	คือความกว้างรอยขีดขวางแกนรอง (mm)
E	คือพลังงานตกกระแทก (J)
m	คือมวลของผลแอปเปิล (kg)
g	คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s <sup>2</sup> )
h	คือระยะความสูงที่ผลแอปเปิลตก (m)
IE	คือพลังงานกระแทก (J)
AE	คือพลังงานดูดกลืน (J)
RE	คือพลังงานคืนกลับ (J)
TF	คือเปอร์เซ็นต์ความเสียหายรวม (%)
NF	คือจำนวนผลแอปเปิลที่เกิดความเสียหาย (ผล)
NP	คือจำนวนผลแอปเปิลทั้งหมดในบรรจุภัณฑ์ (ผล)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุดและเป็นสินค้าเกษตรที่มีมูลค่าการส่งออกสูงสุดเช่นกัน ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตข้าวเป็นอันดับ 6 และเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก จากข้อมูลในปี 2549 มีปริมาณผลผลิตถึง 26.8 ล้านตันต่อปี (ข้าวเปลือก) จากพื้นที่เพาะปลูก 66.4 ล้านไร่ (ศูนย์พัฒนาความรู้การซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า, 2549) ซึ่งพบว่าจะมีฟางข้าวที่เป็นผลพลอยได้จากการเพาะปลูกถึง 10.8 ล้านตันต่อปี (Bhattacharya S.C et.al., 1989) พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ของประเทศสามารถทำนาได้ต่อเนื่องถึงปีละ 2 ครั้ง ซึ่งภายหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตด้วยรถเกี่ยวขนาด (Combine harvester) แล้วจะเหลือฟางข้าวที่ปล่อยทิ้งลงสู่แปลงนา ฟางข้าวนี้ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ทันก่อนฤดูการเพาะปลูกใหม่ เกษตรกรส่วนใหญ่จึงนิยมกำจัดฟางข้าวด้วยการเผาทำลาย เนื่องจากฟางข้าวนี้เป็นอุปสรรคในการไถเตรียมแปลงเพาะปลูก โดยเฉพาะ ในฤดูฝนที่ชาวนาไม่สามารถเผาทำลายฟางข้าวได้ ฟางข้าวในแปลงจะติดสะสมกับใบผานไถขณะไถเตรียมแปลงเนื่องจากผานไม่สามารถตัดสับฟางข้าวได้ นอกจากนี้การเผาทำลายฟางข้าวยังก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดินอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวปัจจุบันจึงได้มีการรณรงค์การไม่เผาฟางข้าวจากหน่วยงานของรัฐขึ้น เนื่องจากฟางข้าวมีประโยชน์ในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่ดินได้เมื่อย่อยสลาย และสามารถใช้เป็นวัสดุคลุมดินหรือใช้รักษาความชื้นในการเพาะเห็ดได้ดี นอกจากนี้ประโยชน์ที่สำคัญประการหนึ่งของฟางข้าวคือการมีคุณสมบัติเป็นพืชเส้นใย (Fiber) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เช่น การทำกระดาษหัตถกรรม หรือกระดาษฟางเป็นต้น คณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวความคิดที่จะนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาปรับปรุงคุณสมบัติและองค์ประกอบเพื่อพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพดีเพียงพอ สำหรับผลิตทางการเกษตรที่ต้องการการป้องกันความเสียหาย (ความชื้น แดด เสี่ยงสภาพ) อันเนื่องมาจากความเสียหายเชิงกลในขั้นตอนจากการขนส่ง และการวางจำหน่ายในระบบค้าปลีก เพื่อทดแทนการใช้พลาสติกและกระดาษ เนื่องจากวัสดุทั้งสองประเภทดังกล่าวนี้ มีศักยภาพที่ดีในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า และมีคุณค่าในการหมุนเวียนใช้ (Recycle) ซึ่งหากเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่มีมูลค่าต่ำ นับว่ามีความเหมาะสมในการใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตทดแทนได้ดีกว่า อีกทั้งบรรจุภัณฑ์นี้สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่จำเป็นต้องหมุนเวียนใช้ และไม่ก่อให้เกิดปัญหาขยะกำจัดยาก หรือเกิดมลภาวะอื่นเช่นกัน นอกจากนี้ในด้านความปลอดภัยของอาหารพบว่า วัสดุกันกระแทกและบรรจุภัณฑ์จากฟาง

ข้าวนี้ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนทางกายภาพ, ทางเคมีและทางชีวภาพ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติเอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลเกษตรที่ทำจากฟางข้าว
2. เพื่อทดสอบคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากฟางข้าว และ ความสามารถในการป้องกันความเสียหายเชิงกล สำหรับการบรรจุผลิตผลเกษตร
3. เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ในการใช้วัสดุกันกระแทกและบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากฟางข้าว เพื่อทดแทนการใช้พลาสติกและกระดาษ โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติและ ประสิทธิภาพของวัสดุดังกล่าว

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อกระดาษจากฟางข้าว ทดสอบคุณสมบัติทางกลเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลทางการเกษตร
2. พัฒนาบรรจุภัณฑ์จากฟางข้าวที่ได้จากเชื้อฟางข้าว หรือกระดาษฟางข้าวเพื่อใช้กับวัสดุทดลองผลิตผลทางการเกษตรอย่างน้อย 1 ชนิด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ในกระบวนการผลิตกระดาษจากฟางข้าวและการนำฟางข้าวมาเป็นวัสดุกันกระแทก
2. ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาฟางข้าว

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 ฟางข้าว (rice straw)

ฟางข้าวเป็นผลพลอยได้จากการทำนา ซึ่งในปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยปลูกข้าวประมาณ 61 ล้านไร่ มีฟางข้าวรวมทั้งส่วนที่เป็นตอซังไม่น้อยกว่า 40 ล้านตัน นาในแต่ละไร่จะให้ฟางมากน้อยแตกต่างกันไป (นิธยาและคณะ, 2551) ขึ้นกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน และลักษณะประจำพันธุ์ของพันธุ์ข้าวซึ่งมีทั้งพันธุ์ต้นเตี้ย และพันธุ์ต้นสูง รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น น้ำ อากาศ และอุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นต้น แต่โดยทั่วไปจากการสำรวจนาหนึ่งไร่จะมีฟางประมาณ 0.32-1.6 ตันต่อ 1 ฤดูปลูก สำหรับองค์ประกอบของธาตุอาหารในฟางจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดิน น้ำ ปริมาณปุ๋ยที่ใส่ รวมทั้งพันธุ์และฤดูกาลแต่โดยเฉลี่ยฟางข้าวจะมีในโตรเจน 0.75% ฟอสฟอรัส 0.15% โปแตสเซียม 0.25% ซิลิกา 11.0% แมกนีเซียม 0.25% และกำมะถัน 0.80% เมื่อเผาฟางข้าวแล้วจะได้สารระเหย 74.4% ถ่านคงตัว 18.3% เถ้า 7.3% และค่าความร้อน 4,300 kCal/kg ซึ่งการเผาฟางข้าวเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนในปัจจุบันหน่วยงานภาครัฐได้พยายามรณรงค์ให้ลดการเผาตอซังและฟางข้าว พร้อมทั้งได้แนะนำส่งเสริมให้มีการนำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น โดยกิตติศักดิ์ (2544) ได้ศึกษาการกระบวนการผลิตแผ่นฉนวนความร้อนที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบและใช้กาวสังเคราะห์ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน เกรด EU-617 ทำหน้าที่เป็นสารยึดติด ซึ่งพบว่าแผ่นฉนวนความร้อนจัดเป็นฉนวนความร้อนที่ดีประเภทหนึ่งพิจารณาจากการนำความร้อนที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0564 และ 0.0957 W/m.K ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความหนาและปริมาณกาวสังเคราะห์ลดลง เนื่องจากในยุคปัจจุบันมีแนวโน้มในการใช้พลังทดแทนมากขึ้น การนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของพลังงานชีวมวลจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการจัดการฟางข้าวถึงแม้ว่าฟางข้าวจะมีค่าพลังงานความร้อนไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับพืชชีวมวลที่เป็นไม้เนื้อแข็ง (ศิริพรรณและสุกาน, 2547) และการศึกษาศักยภาพในการเชิงปริมาณของฟางข้าวในแต่ละภาค ตลอดจนเทคโนโลยีในการเก็บรวบรวมฟางข้าวและเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าสำหรับวิเคราะห์ความคุ้มค่า ด้วยข้อจำกัดด้านการขนส่งจึงกำหนดขนาดโรงไฟฟ้าเป็น 3 ขนาด คือ 9.9 MW 20 MW และ 30 MW ปรากฏว่าขนาด 30 MW ให้ความคุ้มค่ามากที่สุด (อำนาจ, 2547) นอกจากนี้ยังได้มีการวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าของฟางข้าวโดยการนำเอาฟางข้าวมาผลิตเป็นกระดาษที่เรียกว่ากระดาษฟางข้าว เพื่อใช้ในงานด้านหัตถกรรมและสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งจากรายงานการวิจัยของ ธนพรรณและคณะ (2545) พบว่ากระดาษฟางข้าวที่ได้จากการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2% และ 4% โดยปริมาตร ทั้งแบบฟอกขาวและไม่ฟอกขาว เมื่อนำไปทำสิ่งประดิษฐ์ด้านหัตถกรรม คือ ดอกไม้ประดิษฐ์ ของที่ระลึก/ของชำร่วย และเปเปอร์มาเช่ พบว่าได้ผลการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับดีมาก ในด้านคุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษซึ่งประกอบด้วย



น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา ความชื้น ความขาวสว่าง ความต้านแรงดันทะลุ ความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับมาตรฐานของกระดาษเขียน กระดาษพิมพ์ กระดาษถุงชั้นเดียว และกระดาษประเภทเคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากกระดาษฟางขาวมีลักษณะที่เหมือนกับกระดาษสา ซึ่งเหมาะกับงานประดิษฐ์มากกว่างานด้านเอกสาร

## 2.2 ความเสียหายเชิงกลของผลิตภัณฑ์

ความเสียหายเชิงกล คือ ความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์เมื่อมันเกิดการเปลี่ยนรูปที่มากเกินไป จากแรงกระทำให้ผ่านช่องว่างที่ตรึงอยู่กับที่ หรือแรงกระแทก(Mohsenin, 1986) สาเหตุของความเสียหายเชิงกล มีสองประการ คือ แรงภายนอก ภายใต้อุณหภูมิ หรือสภาวะพลวัต และแรงภายใน ซึ่งความเสียหายจากแรงภายในอาจจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ชีวะ ตัวอย่างได้แก่ การแตกด้วยแรงเค้น (Stress cracks) การแตกที่ผิวของมะม่วง ผลมะเขือเทศ มันเทศ เซอร์รี่หวาน

สำหรับพวกผักและผลไม้ คนแปรรูปจะต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับต้นทุนที่สูงขึ้นเนื่องจากความสูญเสียเนื้อผักและผลไม้ที่ต้องถูกเหวี่ยงทิ้งไป แรงงานที่ต้องเพิ่มเข้ามาเพื่อเอาเนื้อที่ซ้าออกไป ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นโดยอ้อม อันเกิดจากกระบวนการผลิตต้องทำงานช้าลงและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต้องลดลง

### 2.2.1 ลักษณะของความเสียหายเชิงกล

1) การแตก แรงเค้นมากที่สุดทางทฤษฎีที่เป็นที่ต้องการที่จะดึงอะตอมออกจากกันมีค่าสูงมาก และผลโดยตรงของการเพิ่มภาระกับวัสดุ คือ การทำให้เกิดพลังงานความเครียดที่เก็บสะสมไว้ในวัตถุเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะแยกวัสดุออกเป็น 2 ชั้น ต้องการพลังงาน และการล้มเหลวถูกกำหนดโดยว่ามีพลังงานเก็บสะสมไว้ในวัตถุเพียงพอหรือไม่ ปริมาณพลังงานที่ต้องการจะทำให้เกิดการแตกขวางภาคตัดขวางหนึ่งๆ เป็นตัวกำหนดความเหนียว (toughness) ของวัสดุซึ่งคุณสมบัติตัวนี้แตกต่างที่เดียวกับความแข็งแรงดึงของวัสดุ Gordon (1978) แสดงให้เห็นว่ารอยร้าวสามารถมีอยู่ในวัสดุอันหนึ่งโดยไม่นำไปสู่การแตกแยกที่สมบูรณ์ ทรานโดที่มันยังมีขนาดสั้นกว่าขนาดหนึ่งที่กำหนดให้ความยาวของรอยร้าววิกฤติ  $L_g$  กำหนดให้  $L_g = (2WE/\pi S^2)$  เป็นเมตร ที่ซึ่ง  $W$  = งานของการแตก (พลังงานที่ต้องการทำให้เป็น  $J/m^2$ )  $E$  = โมดูลัส ย้ง ( $N/m^2$ ) และ  $S$  = แรงเค้นปกติที่ห่างไกลจากปลายรอยร้าว ( $N/m^2$ ) รอยร้าวจะไม่แพร่ขยายออกไปในส่วนของที่เหลือของวัสดุจนกว่ามันจะมีขนาดถึงความยาววิกฤติ Andrews (1980) เสนอทฤษฎีใหม่ของกลศาสตร์ของการแตก (Generalized Fracture Mechanics หรือ GFM) ซึ่งเอาพลังงานที่เป็นที่ต้องการที่จะเอาชนะแรง Cohesion และกระบวนการสูญเสียพลังงานในของแข็งทั้งก่อน (ฮิสเตอร์ซิส) มาร่วมด้วย ในกรณีนี้งานของการแตก

W สามารถแทนได้ด้วย J (อัตราปลดปล่อยพลังงานวิกฤต) ความแข็งแรงของวัสดุสามารถอนุมานได้จากสมการรอยร้าววิกฤติ

2) การเฉือน หรือการเลื่อน (Slip) ในผลิตภัณฑ์พืชสวนถูกกำหนดโดยการแตกหรือการแยกของเซลล์ไปตามพื้นผิวที่กำหนดให้ เนื้อเยื่อบนแต่ละด้านของรอยแตกไม่เสียหาย ผักผลไม้ไม่มีโครงสร้างเซลล์เป็นแบบ Amorphous ถ้าจำลองโครงสร้างนี้โดยการจัดเรียงเซลล์เป็นระเบียบชิดกันและมีที่ว่างระหว่างเซลล์ตามที่ Nilsson et al. (1958) ได้ทำกับเนื้อเยื่อมันฝรั่ง และ Holt and Schoolt (1977) ได้แนะนำสำหรับเนื้อเยื่อแอปเปิลจะเห็นได้ชัดว่า ไม่มีทิศทางที่กำหนดได้สำหรับการเลื่อนการล้มเหลว ด้วยการเลื่อนจะเกิดขึ้นบนระนาบของแรงเฉือนมากที่สุด  $\tau_{max} = \sigma_1/2$  โดย  $\sigma_1 =$  แรงเค้นปกติ  $\tau_{max}$  ทำมุม  $45^\circ$  กับแนวภาระตามแนวแกนเดียว  $\tau_{max}$  จะเป็นค่ามากที่สุดระหว่าง  $(\sigma_1/\sigma_2)/2$  เมื่อ  $(\sigma_2/\sigma_3)/2$  หรือ  $(\sigma_3/\sigma_1)/2$  เมื่อ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  เป็นแรงเค้นประธาน และ  $\tau_{max}$  เป็นรัศมีใหญ่ที่สุดของวงกลม Mohr  $\tau_{max}$  ได้ชื่อว่าเป็นความแข็งแรงเฉือนของวัสดุ

3) การชำ คือ การระเบิดของเซลล์ ในผลไม้บางชนิด การระเบิดของเซลล์เกิดขึ้นทันที หลังจากการกดอัด แบบยืดหยุ่นครั้งแรก ทำให้เกิดแนวคิดจุดชีวคราก (Bio-yield point) (Mohsenin, 1986) มีความเหมือนกันระหว่างการระเบิดของเซลล์ในผลิตภัณฑ์กับการครากในโลหะคือทั้งสองเป็นกลไกการใช้พลังงาน (Energy dissipative mechanism) สำหรับโลหะพื้นที่ได้กราฟแรงเค้น-ความเครียด แทนพลังงานที่ถูกดูดกลืน พฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อการชำ แล้วพฤติกรรมจะถูกกำหนดได้ด้วยการจำลองในรูปแบบของการคราก เมื่อพิจารณาตอนเริ่มต้นชำ แต่เมื่อผลิตภัณฑ์ชำแล้วพฤติกรรมจะถูกกำหนดได้ด้วยตัวเลขความต้านทานการชำ (Bruise resistance figure = ปริมาณชำของวัสดุต่อหน่วยพลังงานดูดกลืน)

### 2.2.2 ลักษณะความรุนแรงทางกายภาพที่พบระหว่างการขนส่ง ผัก ผลไม้

ซึ่งมีผลกับคุณภาพของผัก ผลไม้ แบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. การกดทับ (Pressure Damage) การกดทับที่มีต่อบรรจุภัณฑ์ซึ่งไม่แข็งแรงพอ จะทำให้ผัก ผลไม้บอบช้ำได้ง่าย การกดทับเกิดเนื่องจาก การบรรจุผักผลไม้มากเกินไปและการจัดวางไม่เหมาะสม มีการเรียงซ้อนกันหลายชั้นทำให้ สินค้าที่อยู่ข้างล่างได้รับความเสียหาย

2. การกระทบ (Impact Damage) ระหว่างการขนส่งกล่อง ผัก ผลไม้ อาจถูกโยนหรือกระทบกับกล่องผลไม้กล่องอื่น หรือตกกระทบพื้น สาเหตุเหล่านี้จะส่งผลให้ผักและผลไม้เกิดการเน่าเสียได้

3. การสั่นสะเทือน (Vibration Damage) ความเสียหายของผัก ผลไม้ จากการขนส่งที่เรียกว่า การชำของลูกกลิ้ง (Roller Bruising) เป็นปัจจัยที่สำคัญหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผักผลไม้สดและแปรรูป สาเหตุของความเสียหายมาจากความล้า (Fatigue) เนื่องจากแรงของการ

สั้นสะท้อนซ้ำแล้วซ้ำเล่าต่อผลไม้ส่งผลให้เซลล์ภายใต้ผิวผลไม้แตกปัจจัยที่กำหนดความรุนแรงของความเสียหายมี 2 ประการคือ

- 1) ความเข้มของการสั้นสะท้อน
- 2) ระยะเวลาของการสั้นสะท้อน ความเข้มของการสั้นสะท้อนวัดเป็นความเร่ง (g) ของผลไม้ในชั้นบนๆ ซึ่งเกิดการเสียหายมากที่สุด ความเร่งขึ้นอยู่กับ ความลึกของผลไม้ในภาชนะบรรจุ ความแน่นของการบรรจุ ชนิดของระบบป้องกันสะท้อนในรถบรรทุก ขนาดของการสั้นสะท้อนที่ถูกกระทำจากท้องถนน และลักษณะของการสั้นสะท้อนของผลไม้ชนิดต่างๆ

### 2.2.3 การประเมินรอยซ้ำ (Bruise evaluation)

การประเมินรอยซ้ำของผลแอปเปิล นักวิจัยหลายคนได้อธิบายความเสียหายของผลแอปเปิลเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของพื้นที่ซ้ำโดยพบว่าความลึกและปริมาตรของเนื้อเยื่อแปรเปลี่ยนอย่างมากกับตำแหน่งของรอยซ้ำในบางพันธุ์ และให้ข้อสรุปว่าในการศึกษาการซ้ำของแอปเปิล ควรถูกประเมินโดยเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกจากรูปร่างของรอยซ้ำ

บ่อยครั้งในกรณีการกระแทกไม่รุนแรง การซ้ำเกิดกับเนื้อเยื่อเป็นชั้นบางๆเท่านั้น แม้ว่าเนื้อเยื่อส่วนเหนือชั้นน้ำตาลไม่แตก แต่ก็ใช้ประโยชน์ไม่ได้ และยิ่งเวลาเก็บรักษาผลแอปเปิลนานออกไป บริเวณตั้งแต่รอยซ้ำสีน้ำตาลตรงขึ้นไปถึงผิวผล ถูกจัดเป็นบริเวณซ้ำเสียหายหมดจึงกำหนดปริมาตรรอยซ้ำเป็นปริมาตร  $V$  ซึ่งเป็นส่วนของทรงกลมที่คำนวณได้จากสูตร  $V = \pi d(3q^2 + 4d^2)/24$  เมื่อ  $d$  และ  $q$  เป็นความลึกที่มากที่สุด และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยซ้ำ

ความแม่นยำในการวัดมิติรอยซ้ำและคำนวณปริมาตรรอยซ้ำ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของรอยซ้ำ (Mohsenin, 1986) ตารางที่ 2.1 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนสำหรับความลึก เส้นผ่านศูนย์กลางรอยซ้ำ และปริมาตรซ้ำที่คำนวณได้จากการวัด 20 ครั้งของผลแอปเปิลผลเดี่ยว การวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง 2 กลุ่มของการทดลอง 10 ซ้ำ ของแต่ละแอปเปิลครึ่งผล ที่จริงแล้วค่า CV ที่ได้จากปริมาตรซ้ำเป็นตัวรวมของความแปรปรวนของทั้งความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยซ้ำ อย่างไรก็ตาม ความแปรปรวนที่ได้จากการวัดความลึก (CV = 10.0%) สูงอย่างน่าประหลาดใจ เมื่อพิจารณาการวัดที่กระทำในช่วงเวลาสั้นๆ โดยคนๆเดียว และ Vernier caliper อันเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์จากการวัด 20 ครั้งของผลแอปเปิลผลเดียว



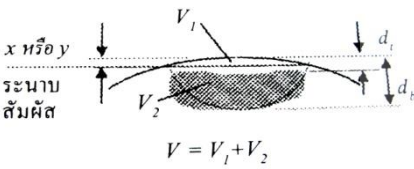
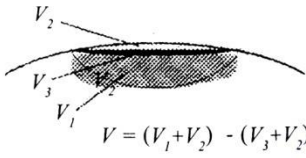
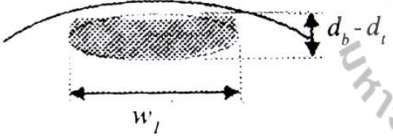
ตัวแปรของรอยชำ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	สัมประสิทธิ์ความ แปรปรวน (CV)
ความลึก (cm)	0.6216	0.0678	10.9%
เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	2.882	0.1365	4.7%
ปริมาตรที่คำนวณได้ (cm <sup>3</sup> )	2.164	0.3548	16.4%

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์การวัดแอปเปิล 19 ผล ที่ถูกปล่อยตกลงพื้นแข็งจากความสูง 25 ซม.

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	สัมประสิทธิ์ความ แปรปรวน (CV)
มวลแอปเปิล (kg)	0.158	0.0083	5.3%
ความแน่นเนื้อ (N) (Magness-Taylor Pressure Tester)	84.35	5.84	7.0%
ความลึกรอยชำ (cm)	1.025	0.112	9.3%
เส้นผ่านศูนย์กลางรอยชำ (cm)	2.989	0.338	11.3%
ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	5.257	1.38	26.3%

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน สำหรับการวัดแอปเปิล 19 ผล ที่ถูกปล่อยตกลงบนพื้นแข็งจากความสูง 25 cm จะเห็นได้ว่า ความแปรปรวนระหว่างผลแอปเปิลแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการวัดแอปเปิลผลเดียว (Moshenin, 1986) สามารถชี้ให้เห็นว่า ความแปรปรวนของการวัดรอยชำเป็นฟังก์ชันหนึ่งของรูปร่าง และคุณลักษณะรอยชำ การวัดปริมาตรซ้ำยากและใช้เวลานาน เพื่อที่จะได้ให้ข้อมูลที่ถูกต้องและใช้เวลาน้อยที่สุด โดยทั่วไป จะทำการสมมติรูปร่างรอยชำและทำการวัดมิติที่สัมพันธ์กับปริมาตรรอยชำ รูปร่างปกติถูกสมมติให้มีกรอบทรงกลมแม้ว่า Pang et al. (1992) ได้ระบุว่ารอยชำของผลแอปเปิลจากการทดลองของเขา ประมาณวงรีที่สามารถวัดหาเส้นผ่านศูนย์กลางหลักและรอง (major and minor diameters) ได้ทั้งก่อนและหลังจากเอาเปลือกออก การศึกษาส่วนใหญ่นิยมสมมติให้เนื้อทั้งหมดระหว่างผิวผลและกรอบรอยชำด้านล่างเสียหาย แต่รอยชำน้อยนักที่จะขยายไปสู่ผิวผล วิธีการประเมินรอยชำต่างๆ ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.3 การวัดปกติจะทำได้กับความลึก  $d_b$  และความกว้าง  $W_1$  คร่อมแกนใหญ่ของรอยชำ (Bollen et al, 1999)

### ตารางที่ 2.3 จำนวนหาปริมาตรรอยชำของผลแอปเปิล

การประมาณปริมาตร	การประมาณปริมาตรรอยชำ	
<b>Bruise thickness</b> ระบายสัมผัส โดยประมาณ 	$V = \frac{\pi(d_b - d_t)}{24} (3w_1^2 + 4(d_b - d_t)^2)$ $V = \frac{\pi(d_b - d_t)}{24} (3w_1w_2 + 4(d_b - d_t)^2)$	วงกลม วงรี
<b>Full depth</b> 	$V = \frac{\pi d_b}{24} (3w_1^2 + 4d_b^2)$ $V = \frac{\pi d_b}{24} (3w_1w_2 + 4d_b^2)$	วงกลม วงรี
<b>Enclosed volume</b>  $V = V_1 + V_2$	$V = \frac{\pi}{24} (3w_1^2 d_b + 4(d_b - x)^3 + 4x^3)$ $V = \frac{\pi}{24} (3w_1w_2 d_b + 4(d_b - y)^3 + 4y^3)$	วงกลม วงรี
<b>Unbruised volume removed</b>  $V = (V_1 + V_2) - (V_3 + V_2)$	$V = \frac{\pi}{24} (3w_1^2 (d_b - d_t) + 4(d_b - x)^3 + 4(d_t - x)^3)$ $V = \frac{\pi}{24} (3w_1w_2 (d_b - d_t) + 4(d_b - y)^3 + 4(d_t - y)^3)$	วงกลม วงรี
<b>Ellipsoid</b> 	$V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{(d_b - d_t)w_1^2}{8} \right)$ $V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{(d_b - d_t)w_1w_2}{8} \right)$	วงกลม วงรี

โดยที่

V = ปริมาตร โดยประมาณ, mm<sup>3</sup>d<sub>t</sub> = ความลึกจากผิวผลไม้ถึงส่วนบนของรอยชำ, mmV<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> = ปริมาตรที่ใช้ในการคำนวณหา V, mm<sup>3</sup>d<sub>b</sub> = ความลึกเต็มของรอยชำ, mm

R = รัศมีของผลไม้ที่รอยชำ, mm

w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, w<sub>3</sub> = ความกว้างของรอยชำวัดตามแนวแกน

หลักและแกนรอง, mm

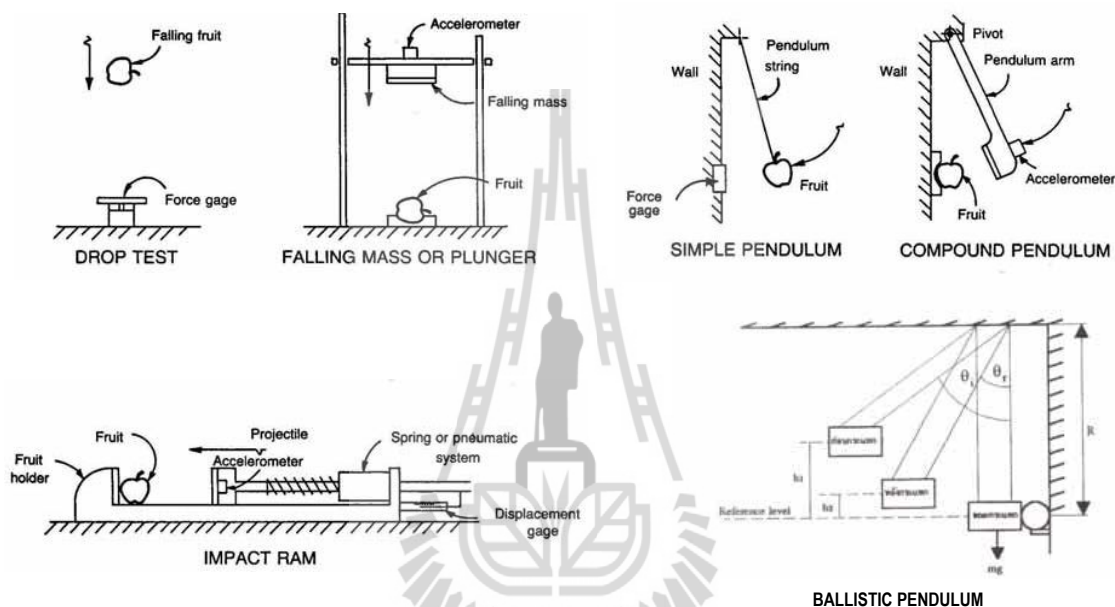
x = ความสูงของหน้าตัดผลไม้เหนือระบายสัมผัส (รอยชำวงกลม), mm

y = ความสูงของหน้าตัดผลไม้เหนือระบายสัมผัส (รอยชำวงรี), mm.

$$x = R - \sqrt{R^2 - \frac{w_1^2}{4}}, \quad y = R - \sqrt{R^2 - \frac{w_1w_2}{4}}$$

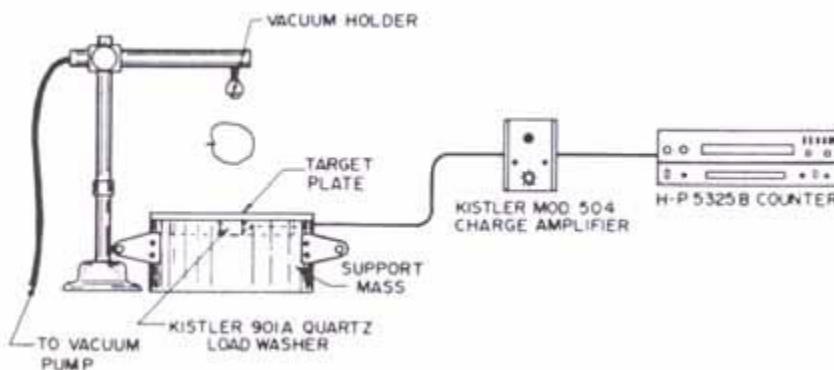
### 2.3 วิธีการทดสอบความเสียหายเชิงกล

ปกติผลผลิตไม้จะถูกระเบิดระหว่างการจัดการหลังเก็บเกี่ยว การขนส่ง การกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภค Srivastava et al. (1993) รายงานว่า สิ่งแรก และสิ่งที่สำคัญที่สุด ในการทำให้เกิดรอยร้าวที่น้อยที่สุด คือการทำให้เกิดพลังงานจลน์ (kinetic energy) กับผลไม้น้อยที่สุด ในทุก ๆ ขั้นตอน ระหว่างปฏิบัติกับเครื่องจักร มีนักวิจัยจำนวนมาก ได้พยายามศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผลไม้เมื่อถูกระเบิด การทดสอบ การกระแทกมีหลายวิธีด้วยกัน (Mohsenin, 1986) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่วิธีที่นิยมหลัก ๆ มี 6 วิธี คือ



รูปที่ 2.1 การทดสอบการกระแทกแบบต่าง ๆ  
ที่มา: Mohsenin (1986) and Jarimopas (1984)

วิธีที่ 1 ได้แก่ Drop Test ทำได้โดยการปล่อยผลไม้ให้ตก (กระแทก) อย่างอิสระในแนวตั้ง ลงสู่พื้นเรียบแข็ง พลังงานกระแทกหาได้จากผลคูณน้ำหนักผลไม้ ความสูงของการปล่อยตก และค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถวัดหาพลังงานคืนกลับได้ (Mohsenin et al., 1986) การวัดพลังงานกระแทก (impact energy) และพลังงานคืนกลับ (rebound energy) สามารถวัดค่าได้อย่างละเอียดโดยใช้เครื่องมือในรูปที่ 2.2

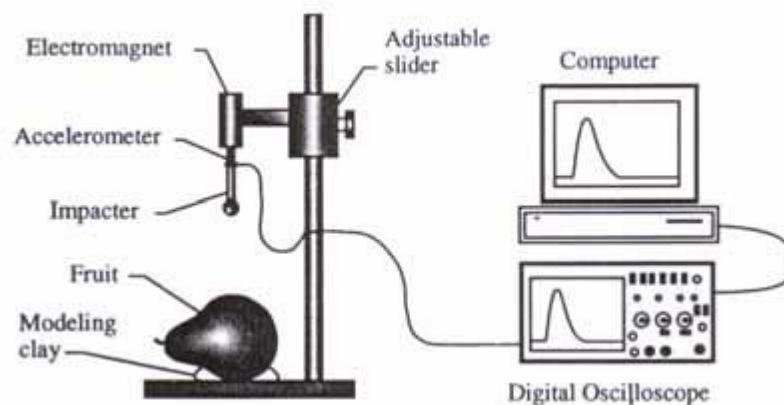


รูปที่ 2.2 การทดสอบแบบ Drop test

ที่มา: Mohsenin (1986)

การทำงานของเครื่องใช้หลักการวัดเวลาคืนกลับ (rebound time) ด้วย electric counter โดยใช้ time-interval mode ผลไม้ถูกจับและปล่อยโดยหัวจับสุญญากาศ ซึ่งช่วยลดการหมุน ในระหว่างการตกอย่างอิสระ กำหนดให้ระยะปล่อยผลไม้คงที่ และตกลง ณ บริเวณที่วาง Load cell ไว้ทุกครั้ง เมื่อผลไม้ถูกปล่อยตก load cell จะส่งสัญญาณ ให้ตัวจับเวลาเริ่มทำงาน ตัวจับเวลา จะแสดงเวลาคืนกลับเป็นหน่วยมิลลิวินาที Chen et al. (1996) ได้กล่าวถึงข้อจำกัดของวิธีนี้ว่า แรงกระแทกเป็นฟังก์ชันของมวล และรัศมีมีความโค้งของผลไม้ ดังนั้นตัวแปรสองตัวนี้จะมีผลต่อความแม่นยำการทดสอบ

วิธีที่ 2 ได้แก่ falling mass ทำได้โดยการวางผลไม้อยู่กับที่ แล้วปล่อยให้วัตถุตกลงอย่างอิสระในแนวตั้งสู่ผลไม้ การหาพลังงานคูดกลืนของผลไม้ อาจทำได้โดยติดอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer) กับตัวกระแทก (impactor) เมื่อเกิดการกระแทกขึ้น นำค่าสัญญาณความเร่งกับเวลา ระหว่างการกระแทกมาพล็อตกราฟ พลังงานคูดกลืนหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Chen et al. (1996) ได้ใช้เทคนิคนี้ ในการหาค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ของผลไม้ โดยใช้ตัวกระแทก ที่มีน้ำหนักน้อย ~10 กรัม กระแทกใส่ผลแพร์ Conferencia และ Bartlett (รูปที่ 2.3) ข้อดีของวิธีนี้คือ การวัด การสัญญาณ กระแทกตอบกลับ (impact acceleration response) เป็นอิสระจากมวล และรัศมีมีความโค้งของผลไม้ ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ต้องใช้ตัวกระแทกที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งถูกจำกัดโดยมวลของอุปกรณ์วัดความเร่ง และการควบคุมความเร็วในการกระแทกทำได้ยาก

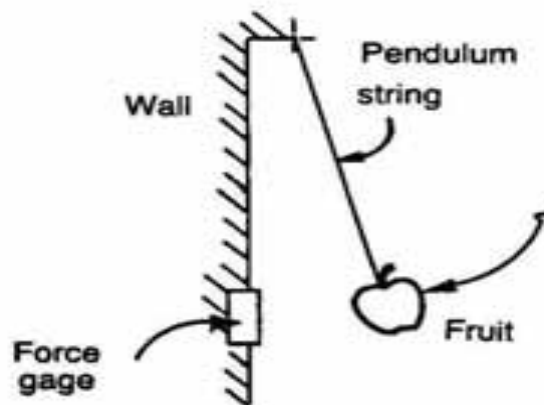


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์หาค่าความแน่นเนื้อ

ที่มา: Chen et al. (1996)

วิธีที่ 3 ได้แก่ Simple pendulum ทำได้โดยผูกผลไม้ไว้กับเชือก จากนั้นปล่อยให้ผลไม้เคลื่อนที่จากมุมที่กำหนดให้ไปกระทบเข้ากับพื้นผิวเรียบและแข็ง ลักษณะการเคลื่อนที่ของผลไม้คล้ายกับการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา Pang et al. (1992) ได้ประยุกต์ หลักการทำงานนี้ทดสอบการกระทบอย่างอิสระของแอปเปิลกับผลแอปเปิล โดยใช้แอปเปิลพันธุ์ Granny Smith สองผลแขวนไว้ด้วยกัน แล้วปล่อยให้แอปเปิลสองผลกระทบกันเองอย่างอิสระ โดยลูกหนึ่งอยู่กับที่ (รูปที่ 2.4) พบว่าแอปเปิลลูกหนึ่งมักชำรุดมากกว่าแอปเปิลอีกลูกหนึ่ง บางครั้ง แอปเปิลชำเพียงลูกเดียว และยากมากที่แอปเปิลจะชำเท่ากันทั้งสองลูก ซึ่งเขาแนะนำว่า ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจเกิดจากความแปรผันของความแข็งแรงจุดครากของผลไม้ (variation of fruit physical yield strength) ของแอปเปิลในแต่ละผล มากกว่าที่จะเกิดจากค่าความไวของการชำ (bruise susceptibility) พลังงานกระทบกับพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง และปริมาณชำของแอปเปิลสองผลมีความสัมพันธ์กับพลังงานดูดกลืน (absorbed energy) แบบเป็นเส้นตรง สอดคล้องกับ บัณฑิต และคณะ (2543) ซึ่งรายงานว่า ปริมาณชำ เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพลังงานกระทบ และพลังงานดูดกลืน การทดสอบการกระทบโดยวิธีนี้ มีข้อดีคือ มีการกระทบเพียงด้านเดียว โดยไม่มีการกระจายแรงไปที่อื่นและการทดสอบวิธีนี้คล้ายการจำลองการตกหล่นของผลไม้ในระหว่างขั้นตอนการเก็บเกี่ยว แต่มีข้อเสีย คือไม่สามารถกำหนดระดับ พลังงานกระทบที่แน่นอนได้ เนื่องจากน้ำหนักของผลไม้ที่นำมาทดสอบไม่เท่ากัน

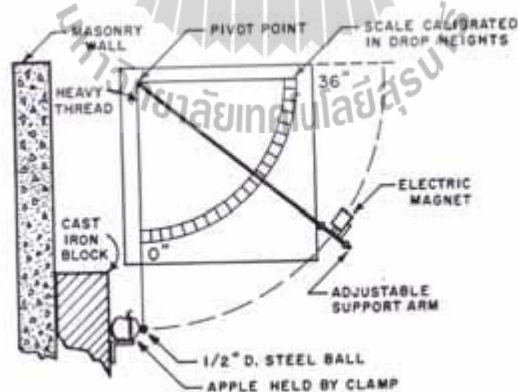




รูปที่ 2.4 การทดสอบการกระแทกแบบ simple pendulum

ที่มา: Pang et al. (1992)

วิธีที่ 4 ได้แก่ Compound pendulum ลักษณะตรงกันข้ามกับ simple pendulum คือ วางผลไม้ อยู่กับที่ ปล่อยวัตถุที่มีลักษณะคล้ายคานแข็ง ไปกระแทกเข้ากับผลไม้ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุ คล้ายกับการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา Mohsenin (1986) ได้เสนอวิธีการทดสอบ dynamic hardness test ที่ใช้หลักการของ simple pendulum (รูปที่ 2.5) ชุดทดสอบประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (electric magnet) และ แขนยึด, สเกลวัดค่าความสูงของลูกตุ้ม, ลูกบอลเหล็ก และเชือกแข็ง (heavy thread) และแทนวางผลไม้

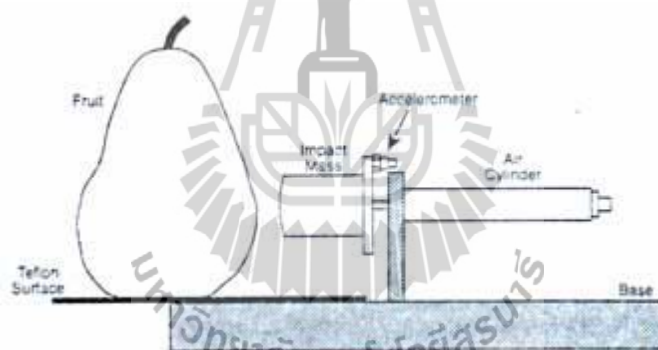


รูปที่ 2.5 การทดสอบโดยใช้ Compound Pendulum

ที่มา: Mohsenin (1986)

วิธีการทดสอบใช้ลูกบอลเหล็กขนาด  $\frac{1}{2}$  นิ้ว เป็นตัวกระแทก (pendulum) และแม่เหล็กไฟฟ้ายึดลูกบอลเหล็กไว้ จากนั้นปรับองศาการกระแทกตามต้องการ เมื่อพร้อมแล้วตัดสัญญาณที่แม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้ลูกบอลเหล็กกระแทกเข้าสู่ผลไม้ การทดสอบการกระแทกโดยวิธีนี้มีข้อดีคือ บริเวณที่โดนกระแทกมีตำแหน่งที่แน่นอน กำหนดระดับพลังงานกระแทกได้อย่างแม่นยำ และการหาค่าพลังงานดูดกลืนทำได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ เป็นการกระแทกสองด้าน ดังนั้นจึงมีการกระจายแรงไปที่อื่นด้วย

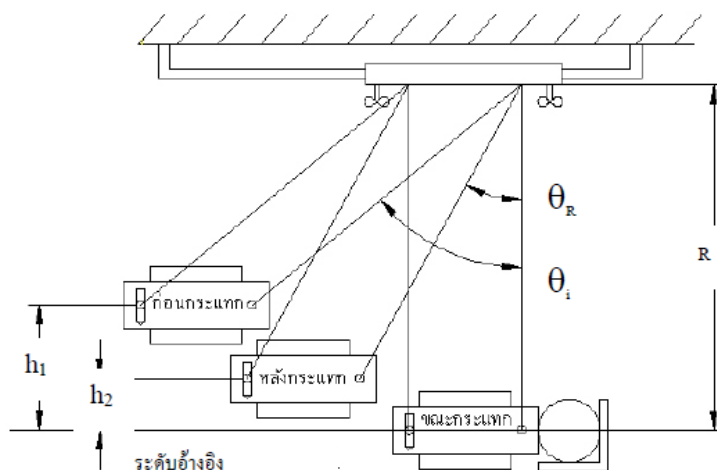
วิธีที่ 5 คือ impact ram ทำงานโดยวางผลไม้อยู่กับที่ ใช้ ram จากสปริง หรือนิวแมติกส์ หรือ อิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ กระแทกกับผลไม้ การทดสอบการกระแทกโดยวิธีนี้มีข้อดีคือ สะดวก ในการทดสอบ บริเวณที่โดนกระแทกมีตำแหน่งที่แน่นอนแต่มีข้อเสียคือเป็นการกระแทกสองด้าน ดังนั้นจึงมีการกระจายแรงไปที่อื่นด้วย นอกจากนี้แล้ว การกำหนดระดับพลังงานกระแทกยังต้องนำผลจากความฝืด (Friction) ของชุด Impact Ram มาคำนวณด้วย Delwiche et al. (1996) ได้ใช้หลักการของ Impact Ram ในการหาค่าความแน่นเนื้อของผลแพร์ (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การทดสอบโดยใช้ Impact ram

ที่มา: Delwiche et al. (1996)

วิธีที่ 6 คือ Ballistic Pendulum (รูปที่ 2.7) ทำงานโดย ปล่อยลูกตุ้มที่มุมตกกระทบใด ๆ ให้กระแทกเข้ากับผลไม้ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มคล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา เมื่อลูกตุ้มกระแทกเข้ากับผลไม้แล้ว ลูกตุ้มจะสะท้อนกลับมาด้วยมุมสะท้อนหนึ่งๆ นำค่ามุมตกกระทบ, มุมสะท้อน และรอยซ้ำของผลไม้ มาวิเคราะห์ผล หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเนื้อซ้ำ (bruise volume) กับพลังงานกระแทก (impact energy) และพลังงานดูดกลืน (absorbed energy) Jarimopas (1984) ได้ใช้ ballistic pendulum ในทดสอบกระแทกผลแอปเปิล โดยได้ใช้ force transducer ร่วมด้วย ทำให้มีความแม่นยำในการวัดค่าพลังงาน แต่มีข้อเสีย คืออุปกรณ์มีราคาแพง



รูปที่ 2.7 การทดสอบโดยใช้ Ballistic Pendulum

ที่มา: ศุภกิตต์ (2550)

ศุภกิตต์ (2550) ได้ทำการพัฒนาเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ ballistic pendulum ที่สามารถวัดค่าพลังงานกระแทกและพลังงานดูดกลืนได้ละเอียดถึง 0.05 จูล และได้ทำการทดสอบการกระแทกผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ห่อหุ้มผลแอปเปิลด้วยวัสดุกันกระแทกที่ได้จาก เชือกกล้วย ผักตบชวา กระดาษลูกฟูกหน้าเดียว กระดาษลูกฟูกสองชั้นแบบใหม่และใช้แล้ว และตาข่ายโพลี โดยพบว่าวัสดุกันกระแทกที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวที่หันลอนออกจากผลแอปเปิลเนื่องจากมีพลังงานที่จุดเริ่มต้นเกิดรอยชำรุดสูงสุดและพลังงานดูดกลืนสูงสุด ส่วนวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการสานเชือกกล้วย และผักตบชวาเป็นตาข่ายไม่เหมาะต่อการเป็นวัสดุกันกระแทกเนื่องจากเกิดความเสียหายมากเนื่องจากจุดตัดที่นำมาอีกเป็นปมก่อให้เกิดความเสียหายหลายจุดจากการกระแทกเพียงครั้งเดียว

## 2.4 การบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรสำหรับการจำหน่าย

บรรจุภัณฑ์หรือภาชนะบรรจุ หมายถึง วัสดุหรือสิ่งที่ใช้ในการรองรับและรวบรวมสินค้าเพื่อการจัดการกับสินค้านั้น หรือเพื่อการขนส่ง หรือเพื่อการวางขาย ด้วยเหตุที่อุตสาหกรรมเกษตรมีการแข่งขันสูง ประกอบกับราคาวัสดุหีบห่อในปัจจุบันเพิ่มขึ้นและค่าแรงงานสูงขึ้น ทั้งหมดทำให้เกิดแนวโน้มการทำบรรจุภัณฑ์ที่ราคาถูกเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและการใช้เครื่องจักรกลในการปฏิบัติการบรรจุหีบห่อ

### 2.4.1 หน้าที่ของบรรจุภัณฑ์

1. การบรรจุ (containment) หรือการรับรองสินค้าหรือผลผลิตให้อยู่เป็นหน่วยเดียวกัน

เพื่อความสะดวกในการจัดการต่างๆ เช่น การขนย้าย การเก็บรักษา หรือการบ่ม

2. การป้องกัน (protection) หรือการปกป้องผลผลิตภายในภาชนะบรรจุจากการสูญเสียระหว่างการขนย้ายหรือเก็บรักษา ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการตกกระทบ การบีบอัด การสัมผัสที่เย็น หรือจากการผันแปรของอุณหภูมิและความชื้นตลอดจนศัตรูพืช

3. การอำนวยความสะดวกและการใช้ประโยชน์ (utility) เช่น มีขนาดเล็ก ใช้มือหยิบขึ้นได้ สามารถแสดงสินค้าภายในให้เห็นได้ง่าย ป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้

4. ข้อมูล (information) คือ ให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลผลิตภายในภาชนะบรรจุ ได้แก่ ชนิดคุณภาพ การนำไปใช้ประโยชน์ ผู้ผลิต และข้อมูลเกี่ยวกับการตลาด เช่น เครื่องหมายการค้า หมายเลขสินค้า (lot number) จุดปลายทาง คุณค่าทางอาหาร วิธีบริโภค วันที่บรรจุ วันหมดอายุ

หน้าที่ 2 ประการแรก จะเกี่ยวพันมากกับการบรรจุภัณฑ์สำหรับการขนส่ง ส่วนหน้าที่ 2 ประการหลัง จะเกี่ยวพันมากกับการบรรจุภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

#### 2.4.2 การกำหนดการบรรจุในบรรจุภัณฑ์

1. การกำหนดด้วยการนับ การนับทำได้โดยวิธีเครื่องกลไฟฟ้า (electromechanical) และจักษุไฟฟ้า (electro optics) วิธีเครื่องกลไฟฟ้าประกอบด้วย ไมโครสวิตช์ ที่กระตุ้นการทำงานด้วยคานที่โหลดด้วยสปริงขนาดเล็ก (spring-loaded level) ซึ่งมันจะถูกเปิดเมื่อผลไม้สัมผัสมันและปิดเมื่อผลไม้ออกจากการสัมผัสไป แนวทางการนับแบบจักษุไฟฟ้า คือ การนับเกิดขึ้นเมื่อผลไม้เคลื่อนที่ผ่านไปขวางลำแสงจาก photocell transducer ทั้งสองวิธีการนับสามารถตั้งเวลาล่วงหน้าได้และความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์  $\pm 1$  ผล อย่างไรก็ตามวิธีการจักษุไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือกว่าเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนกลไกไปรบกวนผลไม้ที่ละผล (infeed singular mechanism) ที่นิยมใช้คือระบบจักษุไฟฟ้าร่วมกับสายพานลำเลียงแบบลูกกลิ้ง Grommet

2. การกำหนดด้วยน้ำหนัก ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ที่มีผลผลิตแล้วโดยตรงจากเครื่องชั่งในสายการบรรจุ

#### 2.4.3 ประเภทของการบรรจุหีบห่อผลผลิตสด

การบรรจุหีบห่อผลผลิตสดมี 2 ประเภท คือ

1. บรรจุภัณฑ์ขายส่ง (wholesale pack)
2. บรรจุภัณฑ์ขายปลีก (retail pack)

#### 2.4.4 ชนิดบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้

1. แข่งไม้ไผ่ เป็นบรรจุภัณฑ์พื้นบ้านที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศ

เนื่องจาก ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย แข็งสามารถ บรรจุผลิตผลเกษตรได้ทุกชนิด กันน้ำ และช่วยระบาย อากาศได้ มีรูปทรงหลายแบบเช่น แบบปากกว้างหรือแบบสอบเรียวลง บรรจุผลิตผลได้ตั้งแต่ 15 – 25 กิโลกรัม แข็งมีข้อเสียคือ มีโครงสร้างไม่แข็งแรง ทำให้ผลิตผลได้รับการกระทบกระเทือนง่าย นอกจากนี้เข็งยังอาจทำลายผิวของผัก ผลไม้โดยเฉพาะ ผัก ผลไม้ ที่มีผิวบาง การจัดเรียงเพื่อขนส่งทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่นิยมใช้เข็งสำหรับบรรจุสินค้าเพื่อการส่งออกไปยังประเทศที่พัฒนาแล้ว

2. กล่องกระดาษลูกฟูก เป็นภาชนะที่นิยมใช้บรรจุผลิตผลเกษตรเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ แบบปากกล่องสวมทับตัวกล่องและแบบธรรมดา ขนาด ความจุและความแข็งแรงแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัสดุและโครงสร้างที่ใช้ กล่องกระดาษลูกฟูกสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของโครงสร้างของกระดาษคือ

1). แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยลอนลูกฟูก และกระดาษปะหน้าเพียงหน้าเดียว

2). แผ่นกระดาษลูกฟูก 1 ชั้น (single wall) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษ 3 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อง 2 ด้าน และลอนลูกฟูก 1 แถว อยู่ระหว่างกระดาษทำผิวกล่องทั้งสอง

3). แผ่นกระดาษลูกฟูก 2 ชั้น (double wall) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษรวม 5 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อง 3 แผ่น และมีลอนลูกฟูก 2 แถว ระหว่างกระดาษทำผิวกล่องแต่ละแผ่น

4). แผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (triple wall) คือ กระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษรวม 7 ชั้น ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อง 4 แผ่น และมีลอนลูกฟูก 3 แถว ระหว่างกระดาษทำผิวกล่องแต่ละแผ่น ความแข็งแรงของกล่องลูกฟูก

นอกจากจะขึ้นกับ โครงสร้างของแผ่นกระดาษลูกฟูกและชนิดของกระดาษ (คุณภาพ และน้ำหนักกระดาษ) แล้วแบบของกล่องก็มีผลทำให้คุณสมบัติของกล่องต่างกันไปด้วย ตัวอย่างเช่น กล่องที่ทำมาจากแผ่นกระดาษลูกฟูก 2 ชั้น ย่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงกดตามแผ่นตั้งสูงกว่ากล่องที่ทำจากแผ่นกระดาษลูกฟูก 1 ชั้น ดังนั้นการจะเลือกใช้กล่องแบบใดจึงขึ้นอยู่กับประเภทและน้ำหนักของสินค้าเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวิธีการลำเลียงและขนส่งอีกด้วย ในบ้านเรา กล่องส่วนใหญ่จะทำจากกระดาษลูกฟูกชนิด 1 ชั้นและ 2 ชั้น ส่วนกระดาษลูกฟูกชนิด 3 ชั้น ยังมีที่ใช้กันน้อยมาก มักทำเป็นกล่องขนาดใหญ่เพื่อบรรจุสินค้าที่มีน้ำหนักมากๆ เช่น เครื่องซักผ้า รูปแบบของกล่องกระดาษลูกฟูก เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้กล่องกระดาษลูกฟูกได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในการออกแบบได้หลายรูปร่างเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ การออกแบบกล่องนอกจากจะต้องคำนึงถึงรูปร่างของผลิตผลแล้ว ความแข็งแรงของกล่องก็เป็นเรื่องสำคัญมาก กล่องรูปแบบต่างกันก็จะมีคุณสมบัติรับน้ำหนักได้ต่างกัน การออกแบบจะต้องจัดให้แนวของลอนลูกฟูกในผนังด้านข้างของกล่องอยู่ในแนวตั้งจึงจะ รับน้ำหนักได้ดี

นอกจากนั้นส่วนมุมทั้ง 4 ของกล่องก็เป็นบริเวณที่รับน้ำหนักได้ดี ส่วนบริเวณตรงกลางของกล่องจะรับน้ำหนักได้น้อยที่สุด ถ้าออกแบบกล่องให้มีความยาวมากก็จะทำให้กล่องรับน้ำหนักได้น้อย เพราะฉะนั้นในการออกแบบควรออกแบบให้ด้านกว้างและด้านยาวมีความยาวไม่แตกต่างกันมาก แต่ถ้ามีความจำเป็นต้องออกแบบกล่องให้ยาวก็ควรมีแผ่นกั้นบริเวณกลางกล่องเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรง อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกับความแข็งแรงของกล่องก็คือ รูที่เจาะเพื่อระบายอากาศ เนื่องจากการเจาะรูเป็นส่วนสำคัญสำหรับบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้แต่ การเจาะรูจะส่งผลให้ความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรเจาะรูให้มีพื้นที่รูเกินกว่า 5% ของพื้นที่ทั้งหมด รูไม่ควรอยู่ใกล้กันและอยู่ใกล้มุมกล่อง และรูควรมีรูปร่างกลม ขนาดเล็ก จะช่วยให้บรรจุภัณฑ์แข็งแรงมากกว่ารูรูปร่างรี ขนาดเล็ก กล่องกระดาษลูกฟูกมีข้อดีคือ มีผิวเรียบไม่ทำความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ และยังช่วยป้องกันการกระแทกได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์รายละเอียดของสินค้าเพื่อดึงดูดความสนใจของลูกค้าได้อีกด้วย ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมโดยสามารถนำกลับมาเข้ากระบวนการผลิตใหม่ได้ แต่ข้อเสียของกล่องกระดาษลูกฟูกคือ ไม่ทนน้ำ ต้องระมัดระวังเรื่องความชื้น การระบายอากาศระบายได้ เฉพาะบริเวณที่มีการเจาะรู ในการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกอาจมีการประยุกต์ ใช้แผ่นกระดาษลูกฟูกในรูปแบบของการจัดเป็น ใส่กล่อง เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผลไม้ และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่ตัวกล่องลูกฟูกและช่วยป้องกันความเสียหายจากการกระแทก

3. ภาชนะพลาสติกแบบคงรูป พลาสติกเข้ามามีบทบาทกับบรรจุภัณฑ์ผัก ผลไม้ มากขึ้นเนื่องจาก คุณสมบัติที่ดีของพลาสติกคือ ความแข็งแรง ทนทาน วางซ้อนได้ดี ทนต่อความชื้นและเปียกน้ำได้ ผิวภายในเรียบไม่ทำลายผลิตภัณฑ์ ทำความสะอาดง่าย นำกลับมาใช้ได้ใหม่ แต่พลาสติกมีราคาค่อนข้างแพงจึงเหมาะกับการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หมุนเวียน วัสดุผลิตมาจาก polyethylene นอกจากนี้ยังมีพวกที่มีลักษณะ เป็น โฟม ทำจาก polystyrene ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทก

4. ภาชนะไม้ ไม้ที่นำมาใช้ผลิตเป็นภาชนะไม้ควรเป็นไม้ที่มีราคาถูก วัสดุหาง่าย และสะดวกต่อการใช้งาน ตัวอย่างของไม้ที่มีการใช้ได้แก่ ไม้ยาง ไม้เนื้ออ่อน ไม้อัด ข้อดีของภาชนะไม้คือ มีความแข็งแรง ทนทานต่อการวางซ้อน สามารถออกแบบให้อากาศถ่ายเทได้ ตามต้องการ ทนต่อความชื้นและเปียกน้ำได้แต่ต้องระวังการเกิดเชื้อรา สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนข้อเสียของภาชนะไม้คือ ผิวภายในแข็งและหยาบอาจทำความเสียหายต่อผลไม้ได้ การขึ้นรูป การเก็บรักษา การขนย้าย และการพิมพ์ข้อความทำได้ยาก ภาชนะไม้ที่นำมาใช้ควรมีความชื้นไม่เกิน ร้อยละ 20 และปราศจากเชื้อรา หากใช้การอบน้ำยาต้องสะอาดและไม่มีสารเคมีตกค้างหากอยู่ในสภาพไม่ดีไม่ควรนำมาใช้หมุนเวียน

5. โฟม เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทหนึ่ง ที่ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยพลาสติกที่นิยมมาใช้ในการผลิตโฟมมีหลายชนิด เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิสไตรีน (PS) พอลิยูรีเทน (PU) เป็นต้น ชนิดที่นิยมที่สุดคือ PS ซึ่งจะ เรียกว่า พอลิสไตรีนที่ขยายตัวแล้ว (expanded

polystyrene) หรือ เรียกย่อๆ ว่า EPS เนื่องจากโฟมมีคุณสมบัติเด่นเหนือวัสดุอื่นตรงที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความยืดหยุ่นป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี อีกทั้งขึ้นรูปให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย ซึ่งใช้เงินทุนไม่สูงมากนัก ดังนั้นบรรจุภัณฑ์โฟม จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โฟมแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะรูปทรง สำหรับโฟมที่นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ คือ โฟมชนิดถาดแบน ซึ่งเวลาใช้จะมีการห่อรัดด้วยฟิล์มยืดใสที่ทำมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อป้องกันฝุ่น ละออง และช่วยเก็บรักษาความสดไว้ในระยะเวลาสั้นๆ โฟมถือเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการอำนวยความสะดวกในการขายปลีกมากกว่าประโยชน์ด้านการขนส่งหรือป้องกันการกระทบกระเทือน

6. ผลิตภัณฑ์เยื่อกระดาษขึ้นรูป เยื่อกระดาษขึ้นรูปหมายถึงวัสดุหรือภาชนะบรรจุสามมิติที่ทำจากการขึ้นรูปของเยื่อกระดาษให้เป็นรูปร่างตามต้องการ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเศษกระดาษเหลือใช้ที่มีเยื่อบริสุทธิ์ผสมอยู่บ้าง การเลือกใช้วัสดุชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์และความต้องการในการใช้งาน สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะใช้กระดาษที่มีคุณภาพสูง และไม่เปื้อนหมึกพิมพ์ เช่นกระดาษที่ได้จากการตัดขอบกระดาษของโรงงานผลิตกระดาษ เป็นต้น กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจะไม่ใส่สารเคมีใดๆเลยก็ได้หรืออาจ ผสมแป้งและจี๊ฟลงไปเพื่อช่วยในการทนน้ำ หรือผสมสีที่ละลายน้ำ เพื่อเพิ่มความสวยงาม หรือหากต้องการเสริมคุณสมบัติในการต้านไขมันก็มักจะใส่สารประเภท fluorocarbon ผสมกับสารดูดประจุลบเข้าไป เยื่อกระดาษขึ้นรูปนั้นมักจะนำมาใช้เป็นวัสดุกันกระแทก วัสดุช่วยบรรจุหรือภาชนะบรรจุสินค้าที่บอบบาง แดกหักง่าย เพื่อช่วยในการขนส่ง ตัวอย่างการใช้งานของเยื่อกระดาษขึ้นรูปได้แก่การทำเป็นถาดหลุมใส่ผลไม้สด

บรรจุภัณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ เท่านั้น ยังมีบรรจุภัณฑ์อีกมากมายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ โดยการเลือกใช้ขึ้นนั้นต้องพิจารณาถึงลักษณะของผัก ผลไม้ชนิดนั้นๆ ลักษณะการขนส่ง และกฎระเบียบของแต่ละประเทศในกรณีที่ต้องมีการส่งออก ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทผัก ผลไม้ ถือเป็นเรื่องสำคัญซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีการพิถีพิถันในการเลือกใช้มากกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษานานและมีคุณภาพก่อนจะถึงมือผู้บริโภค ในปัจจุบันกระแสยุคโลกาภิวัตน์ที่มีการรณรงค์เรื่องอนุรักษ์ธรรมชาติและการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าควบคู่กันไป ผักและผลไม้ นับเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในแง่การบริโภคภายในประเทศและการส่งออก สำหรับในแง่การส่งออก ผัก ผลไม้ สามารถทำรายได้ให้แก่ประเทศปีหนึ่งหลายพันล้านบาทและยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ผัก ผลไม้ ที่มีการส่งออกมากได้แก่ ถั่วฝักยาว พริก ต้นหอม มะม่วง ลำไย ลิ้นจี่ ทุเรียน เป็นต้น ตลาดที่มีการส่งออกมากได้แก่ ฮอลแลนด์ โปรตุเกส ญี่ปุ่น ยุโรป ตะวันออกกลาง เป็นต้น ปัญหาสำคัญที่มักประสบในการส่งออกคือ พบการสูญเสียโดยเฉลี่ยสูงถึง ร้อยละ 25 ทั้งนี้เนื่องจาก ผักและผลไม้เป็นสินค้าที่บอบช้ำ และเน่าเสียได้ง่าย หากการบรรจุหีบห่อไม่ดี หรือขาดความระมัดระวังในการขนส่ง เพราะฉะนั้นการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์

จึงเป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับสินค้าประเภทนี้ (จิราภา, 2555) ผลไม้หลายชนิดนั้นมีการห่อหุ้มด้วยตาข่าย โฟม หรือแผ่นฟองอากาศพลาสติกกันกระแทก แต่ตาข่าย โฟม และแผ่นฟองอากาศพลาสติกกันกระแทกไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดขยะและมลพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) โดยในปี 2553 พบว่าคนไทยกว่า 60 ล้านคน สามารถสร้างขยะได้มากถึง 15.16 ล้านตันหรือประมาณวันละ 41,532 ตัน แต่การจัดการอย่างถูกต้องยังไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดปริมาณมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ ดังนั้นแนวคิดของงานวิจัยนี้จึงผนวกเรื่องการเพิ่มมูลค่าเพิ่มของฟางข้าว เข้ากับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์และวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่ช่วยป้องกันความเสียหายเชิงกลของผลผลิตทางการเกษตรและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

#### 2.4.5 การจัดการภายในบรรจุภัณฑ์ขายส่ง

เมื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์ต่างๆทางกายภาพ บรรจุภัณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ตัวบรรจุภัณฑ์ภายนอก ผลผลิตที่ถูกบรรจุ และวัสดุบรรจุภัณฑ์ภายในตัวบรรจุภัณฑ์ภายนอก ในทางปฏิบัติ ถ้าตัวบรรจุภัณฑ์ภายนอกถูกออกแบบและสร้างมาอย่างดีและระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพในการบรรจุและความเสียหายของผลผลิตจะขึ้นอยู่กับการจัดการวัสดุบรรจุภัณฑ์ภายใน ได้แก่ การจัดวางผลผลิตและวัสดุบรรจุภัณฑ์ภายใน และการใช้วัสดุกันกระแทก การจัดวางผลผลิตครอบคลุม การพิจารณาจำนวนชั้นของการเรียงซ้อนผลผลิตและการวางผลผลิตในตำแหน่งต่างๆ การออกแบบและจัดการบรรจุภายในบรรจุภัณฑ์ต้องคำนึงถึงปัญหาต่อไปนี้

1. ผักผลไม้ในบรรจุภัณฑ์กระแทกหรือเสียดสีกันเองเนื่องจากการสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่ง

2. ผักผลไม้รับแรงกดในแนวตั้งเนื่องจากผลไม้ที่อยู่ข้างบน

3. ความดันสัมผัสบนผิวผลไม้หนึ่งๆ มากเกินไป

ในการแก้ปัญหาข้างต้น มีวิธีและวัสดุที่ใช้ในการบรรจุภายในบรรจุภัณฑ์หลายอย่างที่ต้องนำมาจัดการ เพื่อให้ได้บรรจุภัณฑ์ที่มีความเสียหายน้อยที่สุด ดังนี้

1. การแบ่งเป็นส่วน (partitioning) เพื่อแยกผลไม้เป็นอิสระกัน วัสดุที่ใช้จัดการบรรจุ ได้แก่ กระจาดลูกฟูกแบบผนังเดี่ยว (single wall) ถูกตัดเป็นชิ้นและเอามาทำกริด ผักและผลไม้แต่ละผลจะถูกบรรจุลงในช่องของกริด แม้ว่าบรรจุภัณฑ์ภายในแบบนี้จะแยกผักผลไม้ออกเป็นแต่ละผลและไม่สัมผัสกันได้ แต่สิ่งที่ต้องระวังก็คือ ระยะห่างระหว่างผักผลไม้กับผนังกริดทั้งในแนวตั้งและแนวนอน เนื่องจากผลไม้แม้จะถูกคัดแล้วว่าเป็นเกรดเดียวกัน แต่ความจริงแล้วมีขนาดไม่เท่ากันพอดีทุกผล เนื่องจากการมีช่วงขนาด กริดที่เป็นวงกลมน่าจะทำให้เกิดระยะห่างกับผิวผลไม้สม่ำเสมอกว่ากริดแบบสี่เหลี่ยม การสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่งจะทำให้ผลไม้เคลื่อนที่ไปกระทบผนังทุกด้าน และเกิดการชำรุดเสียหายได้



2. การกันกระแทก (cushioning) วัสดุที่ใช้กันกระแทกจะทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานกระแทกบางส่วน ปล่อยให้พลังงานกระแทกส่วนที่เหลือไปกระทำต่อผักผลไม้ เป็นการบรรเทาความเสียหาย วัสดุพวกนี้จะมีลักษณะพรุน เช่น ตาข่ายโฟม วัสดุประเภทเดียวกันที่หนากว่า จะดูดซับพลังงานกระแทกและป้องกันความชื้นได้ดีกว่าวัสดุบาง

3. การยึดผลไม้แต่ละผลให้อยู่กับที่ภายในบรรจุภัณฑ์ ป้องกันไม่ให้ผักผลไม้เคลื่อนตัวไปกระทบกับผักผลไม้ด้วยกันหรือผนังบรรจุภัณฑ์ทำให้เกิดการชำรุด วัสดุที่ใช้จัดการบรรจุ ได้แก่ ฟิเลมยึดที่ใช้ซึ่งยึดผลไม้อยู่กับที่กับตัวถาดหรือการเจาะโฟมกันกระแทกแล้ววางผลไม้ลงไปพอดีกับผลไม้โดยโฟมติดตั้งอยู่ในบรรจุภัณฑ์ วิธีนี้พบบ่อยในกล่องบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์

4. การนำเอาเทคนิคบรรจุเต็มแน่นมาใช้เหมาะสม เช่น การเอาตาข่ายโฟมมาห่อหุ้มผลไม้ในบรรจุภัณฑ์สุ่มและใช้เทคนิคบรรจุเต็มแน่น อาจทำให้สามารถบรรจุภัณฑ์สุ่มได้ความหนาแน่นการบรรจุดีขึ้นและความเสียหายน้อยลง ฉันทพงษ์ และบัณฑิต (2549) พบว่า บรรจุภัณฑ์ลึงพลาสติกบรรจุผลแอปเปิ้ลหุ้มตาข่ายโฟมตาข่ายสามารถลดความชื้นเทียบกับการสุ่มธรรมดาได้ถึง 31.5 % ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 2.5 เฮิร์ตซ์ โดยพิจารณาระดับความเสียหายร่วมกับราคาของผลิตผลในปัจจุบันพลาสติกที่ใช้เป็นวัสดุใช้ทำตาข่ายโฟมมีปัญหาเรื่องการใช้เวลาานมากในการย่อยสลายประกอบกับกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (บัณฑิตและคณะ, 2546) ได้พยายามนำเชือกกล้วยมาใช้เป็นกันกระแทกในรูปตาข่าย เขาได้เตรียมเชือกกล้วยที่ตากแห้งแล้ว หนา 4 มิลลิเมตร กว้าง 6 มิลลิเมตร มาดัดเป็นตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยม ความยาวด้านละ 10 มิลลิเมตรนำไปห่อแอปเปิ้ล 3 ขนาด เล็ก, กลาง, ใหญ่ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 89.1-73.3 มิลลิเมตร แล้วนำไปกระทบด้วยเครื่อง ballistic pendulum ปรากฏว่าที่พลังงานกระแทก 1.1 จูล ตาข่ายเชือกกล้วยสามารถปกป้องผลแอปเปิ้ลได้ทุกขนาด 100 % อย่างไรก็ตาม การนำเชือกกล้วยไปใช้ยังมีปัญหาในเรื่องการผลิตจำนวนมากและการจำกัดเชื้อราหลังการเก็บเกี่ยวที่อาจปนเปื้อนผักผลไม้ได้ การจัดการภายในบรรจุภัณฑ์ต้องพยายามเพิ่มความหนาแน่นการบรรจุ (packing density) ตลอดเวลาเพราะจะทำให้ลดต้นทุนในการบรรจุภัณฑ์ลงได้

5. บรรจุภัณฑ์แบบถาด ผลไม้ทุกผลจะถูกแยกอยู่ในช่อง (pocket) ของมัน ซึ่งเกิดจาก 2 ถาดประกบกัน การออกแบบให้หมุดค้ำยัน (supporting pegs) ช่วยป้องกันผลไม้จากการรับความดันใดๆ เนื่องจากภาระในแนวตั้งที่เกิดจากการซ้อน ที่วางตอนบนเพื่อไว้เนื่องจากความแปรปรวนในขนาดผลไม้ภายในนับต่างๆ และเพื่อป้องกันผลไม้จากการรับภาระจากการซ้อน อย่างไรก็ตามที่วางตอนบนก็เป็นแหล่งสำคัญของความเสียหาย เนื่องจากการกระทบภายในช่องของมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลไม้ขนาดเล็ก ผลไม้จะได้รับการกระทบได้ในบรรจุภัณฑ์แบบถาดและเซลล์ ซึ่งรับรู้ได้จากการเขย่าภาชนะบรรจุและฟังเสียง ถ้าสิ่งแวดลอมสำหรับการสั่นสะเทือนของการขนส่งมีความถี่พ้องกับความถี่ธรรมชาติของผลไม้ในถาดหรือเซลล์ ผลไม้จะกระทบตลอดภายใต้สิ่งแวดลอมเหล่านี้ และผลไม้จะได้รับความเสียหายไม่ว่าวัสดุจะอ่อนนุ่มเท่าใดอีกวิธีหนึ่งที่จะแก้ปัญหาคือการกระทบของ

ผลไม้ คือ การกำจัดหมุดค้ำยันและให้ภาชนะบรรจุและผลไม้รับภาระที่เกิดจากการซ้อนกัน ในขณะที่ถูกกันกระแทกอย่างหนาแน่นโดยถาดด้วยกัน ถาดแบบกันกระแทก (cushioning trays) ซึ่งจะเก็บผลไม้อย่างหนาแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและกันกระดอน ประโยชน์อีกอย่างก็คือ ค่าความหนาแน่นของการบรรจุดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบแบบหมุด บรรจุภัณฑ์กันกระแทกต้องถูกทำให้สัมผัสพื้นที่ผิวผลไม้ให้ได้มากที่สุด เพื่อลดการกดเนื่องจากการระเหิดที่เกิดจากการซ้อน ลักษณะของถาดตามกลไกดังกล่าว คือ ความดันเนื่องจากแรงของไหลที่เกิดจากการซ้อนกันจะพุ่งลงไปที่ด้านล่างและห่างจากผลไม้ออกไปมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและความดันกดผลไม้ลดลงถาดบางอันทำด้วยเยื่อกระดาษซึ่งราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับพลาสติกจากน้ำมันดิบถาดพลาสติกส่วนมากทำจาก expanded polystyrene หรือ polyvinyl chloride (PVC) แต่รูปทรงของถาดกระดาษและพลาสติกจะเหมือนกัน คุณภาพการป้องกันการสั่นสะเทือนและการอัดของถาดที่ทำจากวัสดุต่างๆยากที่จะคาดคะเนได้ หลักการทำงานคือ การป้องกันการกระแทกและการชนโดยตรงระหว่างผลไม้และการลดลงของความดันสัมผัส ไม่ว่าจะโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวรับน้ำหนักหรือ โดยการส่งผ่านแรงกดจากการซ้อนผ่านหมุดค้ำ วิธีที่ใช้ได้วิธีเดียวในการเปรียบเทียบเชิงปริมาณก็คือ การทดสอบเลียนแบบการขนส่งในห้องปฏิบัติการบรรจุหีบห่อ ภาชนะบรรจุในขนาดพอสมควรบรรจุด้วยผลไม้ประเภทเดียวกันใช้ถาดแบบต่างๆเอามาต้นและกดอัด ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ถูกนำมาเปรียบเทียบ การทดสอบการสั่นสะเทือนถูกทดลองกับเครื่องเขย่าแบบกลหรือแบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้า เราจะได้กราฟของแรง-ความแอ่น (force deflection) ของภาชนะบรรจุที่วางและที่มีภาระจากเครื่องทดสอบการอัดแบบต่างๆ (Peleg, 1981) ได้เปรียบเทียบคุณภาพการป้องกันของบรรจุภัณฑ์แบบถาดต่างๆบรรจุภัณฑ์สุ่มและระบบการบรรจุผลิตผลแบบให้ความหนาแน่นการบรรจุสูง (face centered packing pattern, fcc) สำหรับแอปเปิล ปรากฏว่า

1. ถาดเยื่อกระดาษ อาจจะถูกกดคืนความชื้นจากผลิตภัณฑ์หรือภูมิภาคที่ล้อมรอบ ทำให้ถาดนุ่มและอ่อนตัวเพิ่มขึ้น นี่อาจจะทำให้ถาดสอดคล้องกับรูปร่างผลไม้ได้ดีขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสและลดความดัน ในทางตรงข้ามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถ้วยในถาดล่างก่อน อาจทำให้เกิดผิวแบนๆเล็กน้อยในถ้วยอันที่อยู่กัน ซึ่งจะทำลายผิวที่โค้งซึ่งจะเป็นการกระแทก เนื่องจากผลไม้ชั้นล่างจะรับแรงกดมากที่สุดที่เกิดจากผลไม้ทั้งหมดเหนือนัน ผลไม้ต้องถูกค้ำด้วยพื้นที่ที่ใหญ่มากซึ่งเปลี่ยนส่วนของผิวของถ้วยที่โค้งเป็นพื้นที่ราบทำให้เกิดจุดสัมผัสจุดเดียวระหว่างผลไม้กับถาดและเกิดการเปลี่ยนรูปผลไม้ที่สัมผัสกัน

2. ถาด expanded polystyrene ใช้วัสดุกันกระแทกอย่างดีเยี่ยม น้ำหนักเบาและดึงดูดใจ ถ้วยถาดชั้นกันยังจะคงคุณสมบัติกันกระแทกและจะไม่แบนแม้ว่าถูกกดนาน

3. ถาด PVC ความหนาแน่นสูง จะบางและยืดหยุ่นได้ทำให้ถาดสอดคล้องอย่างกระชับกับรูปร่างและขนาดต่างๆของผลไม้ได้ สามารถรับภาระน้ำหนักกดในแนวตั้งน้อยกว่าถาดแบบ expanded polystyrene หรือถาดเยื่อกระดาษ ผลลัพธ์สุทธิบางทีเป็นการประนีประนอมระหว่าง

คุณภาพการป้องกันของถาดแบบหมุดและถาดเยื่อกระดาษแบบกันกระแทก การกระแทกถูกป้องกันไว้เนื่องจากการกระชับพอดีของผลไม้ในกระเปาะผนังบาง ในขณะที่โครงสร้างแบบหมุดจะเป็นตัวรับภาระการช้อนเนื่องจากวัสดุถาด PVC มีความหนาแน่นสูง ทำให้สูญเสียที่ว่างในภาชนะบรรจุน้อยที่สุด ความหนาแน่นบรรจุอาจจะดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับถาดแบบเยื่อกระดาษหรือ expanded polystyrene

4. ภาชนะบรรจุที่มีถาดและผลไม้บรรจุอยู่รวมกันเป็นหนึ่งระบบ การประนีประนอมที่ดีอาจได้แก่ การใช้ถาดแบบกันกระแทกเพื่อกำจัดการกระแทกไปมา ในขณะที่ทำภาชนะบรรจุให้แข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักช้อนเกือบทั้งหมดโดยมีการเสีรูปลักษณ์น้อย ต้องระมัดระวังที่จะป้องกันช่องว่างตอนบน (head space) ระหว่างชั้นของผลไม้บนสุดกับฝาภาชนะบรรจุเพราะจะมีอันตรายจากการกระแทกไปมาของถาดนั้นๆเนื่องจากการสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่ง

5. การทำตัวเลขนับบนถาด เป็นเรื่องสำคัญมากที่จะหลีกเลี่ยงการหีบถาดผิดขนาดกับขนาดผลไม้ ควรทำตัวเลขนับบนถาดให้สูงขึ้นหรือพ่นสีถาดตามหมายเลขนับเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาด

#### 6. บรรจุกัณฑ์เซลล์

บรรจุกัณฑ์เซลล์ มี 3 แบบ

1. บรรจุกัณฑ์เซลล์แบบรังผึ้งหกเหลี่ยม
2. บรรจุกัณฑ์เซลล์แบบรังผึ้งสามเหลี่ยม
3. บรรจุกัณฑ์แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

บรรจุกัณฑ์เซลล์ทั้งสามแบบปกติทำจากกระดาษกราฟที่ใช้งานหนัก (heavy duty craft paper) ในขณะที่เซลล์รูปร่างหกเหลี่ยมนิยมใช้มากสำหรับบรรจุผลไม้ทรงรี เซลล์พิเศษ เช่น สามเหลี่ยมใช้บรรจุลูกแพร์ อาโวคาโด ไม่มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างบรรจุกัณฑ์แบบถาดหมุดและแบบเซลล์เมื่อคำนึงถึงคุณภาพในการป้องกัน บรรจุกัณฑ์เซลล์ที่มีโครงสร้างเป็นรังผึ้ง แข็งแรงกว่าบรรจุกัณฑ์แบบถาดหมุด ในความสามารถของผนังที่จะรับภาระในแนวตั้งนี้ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ภาชนะบรรจุแบบ RSC (regular slotted container) ที่มีผนังบางและไม่แพงและยังจะได้ความแข็งแรงในการช้อนสูงเป็นพิเศษ แม้ในสภาวะแวดล้อมชื้น ถ้าผนังของภาชนะบรรจุที่เป็นกระดาษถูกฟูกถูกทำให้อ่อนแอโดยการดูดกลืนความชื้นเข้าไปกระดาษของบรรจุกัณฑ์ภายใน เช่น ถาดแบบหมุดหรือบรรจุกัณฑ์แบบเซลล์จะไม่ถูกกระทบและยังคงความแข็งแรงอยู่ ดังนั้นบรรจุกัณฑ์แบบเซลล์จึงมีความเหมาะสมสำหรับการช้อนผลิตผลสูงและเก็บนานๆในสภาวะแวดล้อมความชื้นสูง เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับการเปลี่ยนแปลงในขนาดของผลไม้ บรรจุกัณฑ์เซลล์ต้องมีช่องว่างตอนบนเหมือนกับบรรจุกัณฑ์แบบถาดหมุด ดังนั้นผนังเซลล์ต้องใหญ่กว่าผลไม้ผลโตที่สุดในนั้น ซึ่งจะทิ้งไว้ที่ว่างมากสำหรับการกระแทกของผลไม้ ไม่เพียงแต่ขึ้นๆลงๆ แต่ยังด้านข้างอีกด้วย

แทนที่จะเป็นรูปถ้วยครึ่งวงกลม (วงกลมเหมือนในถาดหมุด) แต่แผ่นกระดาษที่จะทำให้พื้นผิวเรียบเหล่านี้ค่อนข้างยืดหยุ่นเลยทีเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคุณซับเอาความชื้นจากผลไม้ไปแล้วก็จะพORMตัวเป็นถ้วยเล็กๆ ถาดอาจจะถูกนำมาใช้ใหม่ ถ้ามีระบบการนำกลับมาใช้ใหม่และการรวบรวมที่เหมาะสม มีความเป็นไปได้ที่ถาดจากบรรจุภัณฑ์แบบเซลล์อาจจะใช้แสดงผลไม้ที่ดึงดูดความสนใจในร้านผลไม้สามารถที่จะแกะถาดแบบหมุดออกมาจากบรรจุภัณฑ์โดยการย้ายถาดไปในครั้งเดียว ในทางตรงข้ามบรรจุภัณฑ์เซลล์อาจต้องเอาออกจากบรรจุภัณฑ์ที่ละผลและส่วนภาชนะบรรจุภายในต้องทิ้งไป เซลล์เบื้องต้นทำมาจากกระดาษรังผึ้ง (paper honeycomb) การแบ่งแยกแต่ละชั้นใช้แผ่นกระดาษธรรมดา

การนำเอาบรรจุภัณฑ์ขายส่งไปใช้งานกับผลไม้ชนิดหนึ่งๆต้องพิจารณาเลือกบรรจุภัณฑ์ภายนอกควบคู่ไปกับการจัดการภายในบรรจุภัณฑ์อย่างเหมาะสม เพื่อก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์น้อยและค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการบรรจุต่ำ



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ในงานวิจัยนี้มีอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องมือวัดและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยดังต่อไปนี้
1. ฟางข้าว ใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตกระดาษฟางข้าวและขึ้นรูปภาชนะก้นกระแทก
  2. แอปเปิล พันธุ์ฟูจิ ใช้เป็นวัสดุทดสอบความสามารถในการปกป้องของวัสดุก้นกระแทกจากฟางข้าว แอปเปิลที่ใช้มี 2 ขนาด คือ เบอร์ 80 และเบอร์ 100
  3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
  4. เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตกระดาษและทดสอบความสามารถในการปกป้องผลผลิตทางการเกษตร มีดังนี้
    1. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง
    2. เครื่องชั่งน้ำหนักฟักัด 60 กิโลกรัม
    3. เครื่องวัดความชื้นแบบอินฟราเรด
    4. ตู้อบหาความชื้น(Hot air oven)
    5. เครื่องทดสอบการกระแทก(Ballistic Pendulum)      แสดงดังรูปที่ 3.1
    6. เครื่องจำลองการสั่นสะเทือน มอเตอร์ไฟฟ้า 220 V ขนาด 3 แรงม้า ยี่ห้อมิตซูบิชิ แสดงดังรูปที่ 3.2
    7. เครื่องสับย่อย มอเตอร์ไฟฟ้า 220 V ขนาด 3 แรงม้า ยี่ห้อมิตซูบิชิ แสดงดังรูปที่ 3.3
    8. ชุดขึ้นรูปถาดบรรจุภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.4
    9. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
    10. หม้อต้มเยื่อ
    11. กระบะเหลี่ยม
    12. เตาก๊าซ
    13. นาฬิกาจับเวลา
    14. ผ้าขาวบาง
    15. เกรียงฉาบปูน
    16. ตะแกรงมุ้งลวดขนาด 60 x 40 cm.



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการกระแทก



รูปที่ 3.2 เครื่องจำลองการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.3 เครื่องสับย่อย



รูปที่ 3.4 ชุดจั่นรูปถาดบรรจุภัณฑ์

## 3.2 วิธีการ

### 3.2.1 การพัฒนากระบวนการผลิตกระดาษฟางข้าว

การผลิตกระดาษฟางข้าวเพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทกในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มขั้นตอนของเตรียมเยื่อโดยการสับฟางให้มีขนาดเล็กลงเพื่อช่วยลดเวลาในการต้มเยื่อ โดยกระบวนการผลิตกระดาษฟางข้าวมีดังนี้

1. การเตรียมเยื่อ สับฟางข้าวโดยใช้เครื่องสับย่อยขนาดตะแกรง 3 มิลลิเมตรเพื่อให้ได้ฟางเส้นสั้นที่มีขนาดสม่ำเสมอ
2. การต้มเยื่อ นำฟางข้าวที่ผ่านการสับเตรียมในข้อ 1 ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
3. การล้างเยื่อ เยื่อที่ผ่านการต้มแล้วจะถูกนำมาล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ออก
4. การแผ่เยื่อกระดาษ นำเยื่อกระดาษที่ผ่านการล้างมาแล้วเทแผ่ลงบนตะแกรงมุ้งลวดขนาด 40 cm x 60 cm โดยกำหนดความหนาของกระดาษตามปริมาณฟางสับที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 1 ซึ่ง

กระดาษที่มีความหนา 2 mm ใช้ฟางสับ 200 กรัม ความหนา 3 mm ใช้ฟางสับ 250 กรัม ความหนา 4 mm ใช้ฟางสับ 300 กรัม และความหนา 6 mm ใช้ฟางสับ 400 กรัม

5. การทำแห้ง นำเยื่อฟางเข้าที่ผ่านการแผ่บนตะแกรงไปตากแดด เมื่อกระดาษมีความชื้นต่ำกว่า 10 %wb. แล้วจะทำการลอกออกจากตะแกรงเพื่อเก็บไว้สำหรับทดสอบวัสดุกันกระแทก

### 3.2.2 การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลด้วยวิธีตกกระแทก (drop test) มีวิธีดำเนินการดังนี้

1. การเตรียมวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว โดยใช้กระดาษที่ทำไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.1 ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้กระดาษฟางข้าวที่มีความหนา 2, 4 และ 6 mm ห่อหุ้มผลแอปเปิลเปรียบเทียบกับผลแอปเปิลเปล่าและผลแอปเปิลที่ห่อด้วยตาข่ายโพลี

2. ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผลแอปเปิล โดยทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาด  $D_{max}$   $D_{min}$  และความสูง พร้อมทั้งตรวจสอบรอยชำรุดที่มีมาก่อนการทดลอง ในการทดลองนี้จะใช้แอปเปิล 2 ขนาดคือ เบอร์ 80 และเบอร์ 100 ซึ่งจะใช้อัปเปิลในการทดสอบทั้งสิ้น 450 ผล

3. ทำการทดสอบโดยการปล่อยตกกระแทกแบบอิสระที่ความสูง 25, 50 และ 75 cm ที่ระดับความสูงละ 15 ซ้ำ

4. ทำการประเมินปริมาณชำรุดที่แอปเปิลไว้ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องซึ่งการทดสอบนี้พลังงานในการกระแทกมีค่าสูงทำให้เห็นรอยชำรุดอย่างชัดเจน (รูป 3.5) จึงทำการประเมินรอยชำรุดแบบ full depth (Sattveit, 1984) ดังแสดงในสมการ (3.1)

$$BV = \frac{\pi d}{24} (3w_1 w_2 + 4d^2) \quad \dots\dots(3.1)$$

โดยที่ BV คือปริมาตรรอยชำ (mm<sup>3</sup>)

d คือความลึกรอยชำ (mm)

w<sub>1</sub> คือความกว้างรอยชำตามแกนหลัก (mm)

w<sub>2</sub> คือความกว้างรอยชำขวางแกนรอง (mm)

สำหรับพลังงานตกกระทบบนผลไม้สามารถหาได้จากมวลของผลแอปเปิล และระยะความสูงซึ่งแสดงในสมการ (3.2)

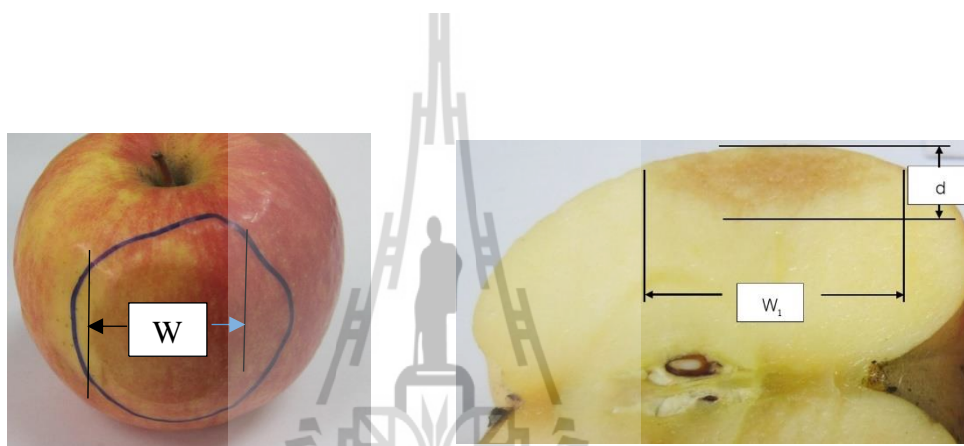
$$E = mgh \quad \dots\dots(3.2)$$

โดยที่ E คือพลังงานตกกระทบบนผลไม้ (J)

m คือมวลของผลแอปเปิล (kg)

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

h คือระยะความสูงที่ผลแอปเปิลตก (m)



รูปที่ 3.5 ลักษณะการชำรุดของผลแอปเปิลจากการกระทบ

**3.2.3 การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลด้วยวิธี Ballistic Pendulum** มีวิธีการดังนี้

1. การเตรียมวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว โดยใช้กระดาศที่ทำไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.1 ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้กระดาศฟางข้าวที่มีความหนา 2, 3 และ 4 mm (เนื่องจากการทดสอบในข้อ 3.2.2 พบว่าความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลที่ 4 และ 6 mm ไม่มีความแตกต่างกัน) แบบตัดเป็นริ้วและไม่ตัดริ้ว (รูปที่ 3.6) ห่อหุ้มผลแอปเปิลเปรียบเทียบกับผลแอปเปิลเปล่าและผลแอปเปิลที่ห่อด้วยตาข่ายโพลี

2. ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผลแอปเปิล โดยทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาด  $D_{max}$   $D_{min}$  และความสูง พร้อมทั้งตรวจสอบรอยชำรุดที่มีก่อนการทดลอง ในการทดลองนี้จะใช้แอปเปิล 2 ขนาดคือ เบอร์ 80 และเบอร์ 100 ซึ่งจะใช้อแอปเปิลในการทดสอบทั้งสิ้น 450 ผล



3. ทำการทดสอบการกระแทกด้วยเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum ที่พัฒนาขึ้น (รูปที่ 3.1) ตามที่แนะนำโดย ศุภกิตต์ (2550) โดยกำหนดมุมในการกระแทกคือ 5, 10, 15, 20 และ 25 องศา เพื่อให้ได้รับพลังงานในการกระแทกอยู่ในช่วง 0.262 -3.114 จูล

4. ทำการประเมินปริมาตรซ้ำโดยทิ้งแอปเปิลไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชม. เพื่อให้รอยซ้ำของแอปเปิลเกิดการเปลี่ยนสี ผ่าแอปเปิลกลางบริเวณที่โคนกระแทก โดยผ่านแกนซ้ำของแอปเปิลวัดความกว้าง และความลึกรอยซ้ำ (รูปที่ 3.7) แล้วหาปริมาตรซ้ำด้วยสมการ (3.3) (Chen and Sun, 1981)

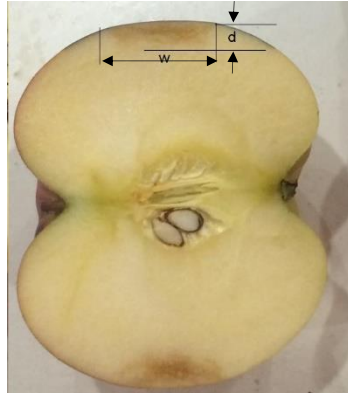
$$BV = \frac{\pi}{8} w^2 d \quad \dots\dots(3.3)$$

โดยที่ w คือความกว้างรอยซ้ำ (mm)

d คือ ความลึกรอยซ้ำ (mm)

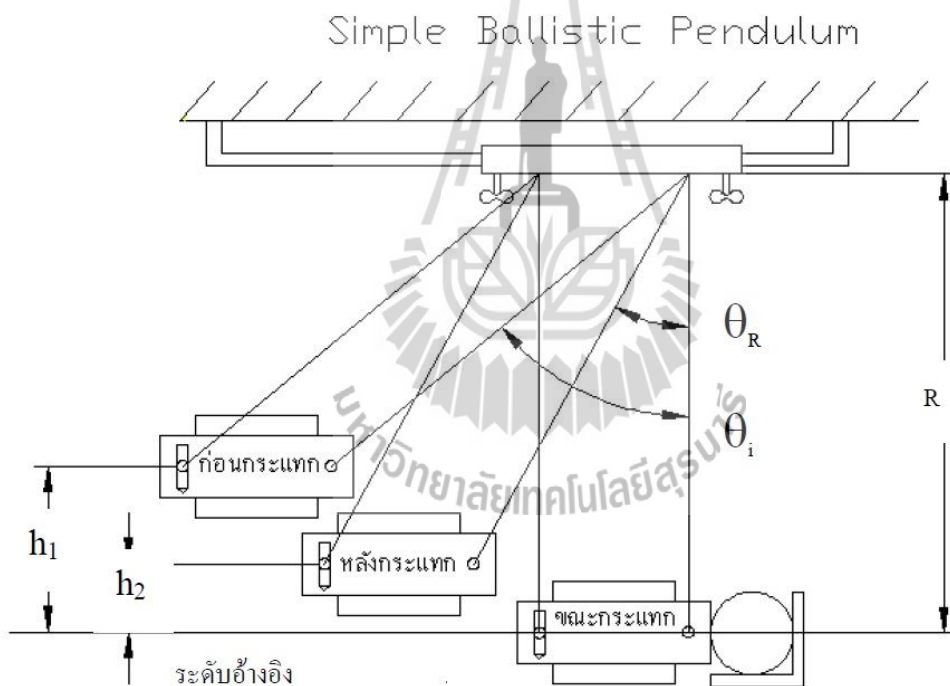


รูปที่ 3.6 ลักษณะของกระดษฝงข้วแลแนวค้คร้ว



รูปที่ 3.7 ลักษณะรอยช้ำที่เกิดจากการกระทบ

5. การวิเคราะห์พลังงานกระทบและพลังงานที่ดูดซับของผลแอปเปิ้ล สามารถหาได้จาก ลักษณะทางกายภาพของเครื่องทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมวิเคราะห์พลังงานของ Ballistic Pendulum

ที่มา: สุภกิตต์ (2550)

จากไดอะแกรม (รูปที่ 3.8) สามารถวิเคราะห์หาพลังงานต่างๆ ได้ดังนี้

1. พลังงานที่ใส่ให้ (input energy) หรือ พลังงานกระทบ (impact energy)

$$IE = mgh_1 = mgR(1 - \cos\theta_i) \quad \dots(3.4)$$

2. พลังงานคืนกลับ (recovery energy)

$$RE = mgh_2 = mgR(1 - \cos\theta_R) \quad \dots(3.5)$$

3. พลังงานดูดกลืน (absorbed energy)

$$\begin{aligned} AE &= IE - RE \\ &= mgh_1 - mgh_2 \\ &= mgR(1 - \cos\theta_i) - mgR(1 - \cos\theta_R) \\ &= mgR(\cos\theta_R - \cos\theta_i) \quad \dots(3.6) \end{aligned}$$

**3.2.4 การพัฒนาและทดสอบวัสดุกันกระแทกภายในบรรจุภัณฑ์ขายส่ง** ในการพัฒนาวัสดุกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ขายส่งได้ใช้เชื้อฟางข้าวมาทำการขึ้นรูปเป็นถาดสำหรับรองรับผลแอปเปิลโดยมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. ทำการเตรียมเชื้อฟางข้าวตามวิธีการในหัวข้อ 3.2.1 ข้อ 1-3 จากนั้น ทำการแผ่เชื้อซึ่งได้จากฟางสับจำนวน 300 กรัม บนตะแกรงขนาด 40 cm x 60 cm ทำการเกลี่ยให้สม่ำเสมอ นำฟางแดดให้พอมอด
2. นำแผ่นเชื้อที่หมาดวางลงบนตาข่ายภายในแบบขึ้นรูป แล้วกดฝาแบบลง จากนั้นนำไปตากแดด เมื่อแห้งเกาะออกจากแบบพิมพ์จะได้ถาดเชื้อฟางข้าวดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของถาดเชื้อกระดาศฟางข้าว

4. การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลในบรรจุภัณฑ์ขายส่งได้ใช้การทดสอบภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนจำลอง (บันทึก, 2549) โดยทำการบรรจุผลแอปเปิลที่ห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟมลงบนถาดที่โฟม และถาดเยื่อกระดาษฟางข้าว โดยทำการทดสอบบรรจุภัณฑ์ละ 3 ซ้ำ กับแอปเปิลเบอร์ 80 และ เบอร์ 100 ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทดสอบภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนจำลอง

5. การประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิลจะประเมินในลักษณะรูปเปอร์เซ็นต์ความเสียหายรวมที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิลอันเนื่องมาจากรอยดลอก รอยชำ ซึ่งหาได้จากสมการ (3.7) คือ

$$TF = \frac{NF}{NP} \times 100\% \quad \dots\dots (3.7)$$

โดยที่ TF คือเปอร์เซ็นต์ความเสียหายรวม (%)

NF คือจำนวนผลแอปเปิลที่เกิดความเสียหาย (ผล)

NP คือจำนวนผลแอปเปิลทั้งหมดในบรรจุภัณฑ์ (ผล)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษาการใช้ประโยชน์จากฟางข้าวในที่เน้นที่จะศึกษาเป็นวัสดุกันกระแทกสำหรับปกป้องผลิตผลทางการเกษตร ในการทดสอบการปกป้องได้ใช้ผลแอปเปิลเป็นวัสดุทดสอบเนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีขายในท้องตลาดตลอดทั้งปีและมีขนาดรูปร่างที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งผลในการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

#### 4.1 วัสดุกันกระแทกจากกระดาษฟางข้าว

กระบวนการผลิตที่พัฒนาขึ้นโดยเพิ่มการสับลดขนาดฟางข้าวก่อนนำไปต้มทำให้ลดเวลาในการต้มฟางข้าวลงได้ประมาณ 1 ชั่วโมง กระดาษที่ได้จากกระบวนการผลิตเพื่อทำวัสดุกันกระแทกจะมีความหนา 2, 3, 4 และ 6 mm ตามปริมาณฟางข้าวที่ใช้ทำเยื่อได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 กระดาษที่ผลิตได้มีความหนาและน้ำหนักสม่ำเสมอทุกแผ่น เพราะมีการชั่งน้ำหนักของเยื่อก่อนที่จะทำกระดาษ นำกระดาษจากฟางข้าวทั้ง 4 ความหนา มาตัดให้ได้ขนาด 6 x 24 เซนติเมตร เพื่อที่จะสามารถห่อหุ้มผลแอปเปิลได้พอดี รอสำหรับทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิล

#### 4.2 การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิล

##### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของผลแอปเปิล

ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของแอปเปิลแสดงในตารางที่ 4.1 โดยการวัดขนาดและรูปร่างของแอปเปิล แอปเปิลที่ใช้ทดสอบมี 2 ขนาด คือ เบอร์ 80 และเบอร์ 100

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของผลแอปเปิล

ลักษณะทางกายภาพ	เบอร์ 80	เบอร์ 100
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (mm)	78.92±1.80	78.92±3.27
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด (mm)	50.49±2.55	48.12±3.00
ความสูง (mm)	67.77±2.30	64.47±3.42
น้ำหนัก (g)	197.79±5.24	168.62±12.70

จากตารางที่ 4.1 พบว่าผลแอปเปิลทั้งสองขนาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 78.92±1.80 และ 78.92±3.27 มิลลิเมตร สำหรับแอปเปิลเบอร์ 80 และ 100

ตามลำดับ ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด ความสูง น้ำหนักและแอปเปิลเบอร์ 80 จะมีค่ามากเบอร์ 100 เนื่องจากบรรจุภัณฑ์มีขนาดที่เท่ากันและกำหนดการบรรจุด้วยน้ำหนัก แอปเปิลที่ผลโตกว่าคือ เบอร์ 80 จึงจำนวนผลน้อยกว่าเบอร์ 100

#### 4.2.2 ผลของการทดสอบด้วยวิธีตกกระทบ (Drop Test)

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาตรรอยชำ ระดับความสูงที่ใช้ปล่อย และพลังงาน กระแทกมีความสัมพันธ์กัน โดยค่าความสูงที่สูงขึ้น พลังงานกระแทกและปริมาตรรอยชำก็สูงขึ้นตามไปด้วย แต่ก็มีบางการทดลองไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ แอปเปิลที่ใช้ในการทดสอบเป็นขนาดเบอร์ 100 โดยค่าการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2-4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม

ลำดับที่	ระดับความสูง					
	25 cm		50 cm		75 cm	
	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)
1	1377.54	0.36	4308.47	0.68	3668.86	1.11
2	2087.92	0.41	3080.07	0.67	6204.12	1.19
3	1387.54	0.36	3274.19	0.73	3822.80	1.11
4	2601.24	0.39	2122.41	0.68	5443.33	1.25
5	2068.74	0.40	2794.19	0.69	6895.14	1.12
6	2488.14	0.44	2681.35	0.81	4386.38	1.20
7	2042.76	0.37	4152.79	0.74	5510.62	1.02
8	1603.52	0.38	3141.33	0.76	2092.30	1.13
9	1837.31	0.40	4329.51	0.80	3902.45	1.08
10	3008.60	0.37	4241.15	0.80	3976.08	1.20
11	2367.91	0.40	4238.47	0.69	5157.58	1.10
12	2431.59	0.39	3828.29	0.73	2286.56	1.10
13	2873.38	0.36	4067.51	0.75	6895.14	1.21
14	2375.04	0.38	3899.76	0.74	4968.89	1.11
15	2205.40	0.39	3738.63	0.71	3429.70	1.10
<b>Mean±S.D.</b>	2183.8±488.3	0.39±0.02	3593.2±697.0	0.73±0.05	4576.0±1475.8	1.13±0.06

ตารางที่ 4.3 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี

ลำดับที่	ระดับความสูง					
	25 cm		50 cm		75 cm	
	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)
1	770.74	0.39	3668.86	0.75	2318.50	1.05
2	1422.62	0.41	1884.82	0.78	3731.56	1.08
3	409.98	0.38	3668.86	0.70	3190.65	1.02
4	583.68	0.40	1880.18	0.74	3509.49	1.11
5	1193.18	0.39	2205.40	0.73	6057.25	1.10
6	1113.31	0.35	2875.87	0.81	1541.41	1.08
7	2125.21	0.40	2942.23	0.71	3668.92	1.08
8	1030.87	0.38	2261.95	0.68	3646.21	1.06
9	1113.31	0.42	1583.36	0.79	3506.90	1.05
10	741.32	0.39	2730.83	0.82	6895.14	1.16
11	922.45	0.35	1758.96	0.69	2528.72	1.06
12	1081.49	0.35	2318.56	0.69	3098.08	1.16
13	909.03	0.35	1880.18	0.73	6414.09	1.13
14	1086.86	0.38	3011.22	0.74	5358.51	1.04
15	917.38	0.40	2082.88	0.74	4758.47	1.12
<b>Mean±S.D.</b>	1028.1±394.0	0.38±0.02	2450.3±667.2	0.74±0.04	4014.9±1561.9	1.09±0.04

ตารางที่ 4.4 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วยกระดาษ  
ฟางข้าวหนา 2 mm

ลำดับที่	ระดับความสูง					
	25 cm		50 cm		75 cm	
	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)
1	1979.86	0.42	3506.90	0.84	5358.44	1.33
2	1529.87	0.43	770.74	0.84	6544.59	1.30
3	917.38	0.41	3506.90	0.87	5251.92	1.25
4	1886.95	0.41	3990.64	0.87	3149.05	1.32
5	2716.17	0.46	1988.56	0.81	7379.60	1.19
6	197.99	0.45	4329.44	0.88	5726.08	1.31
7	177.89	0.45	3141.33	0.85	7481.67	1.23
8	917.38	0.42	4238.34	0.79	7131.59	1.30
9	2802.02	0.45	2789.80	0.82	7135.67	1.24
10	153.74	0.42	5160.59	0.89	4440.48	1.24
11	3149.05	0.44	2924.79	0.88	7634.07	1.35
12	2318.50	0.41	1775.10	0.82	4895.65	1.35
13	1731.80	0.42	3745.83	0.93	6661.42	1.25
14	2488.14	0.45	2354.36	0.90	5603.23	1.27
15	1086.79	0.46	4241.15	0.82	5581.24	1.32
<b>Mean±S.D.</b>	1603.6±997.1	0.43±0.02	3231.0±1157.0	0.85±0.04	5998.3±1288.2	1.28±0.05

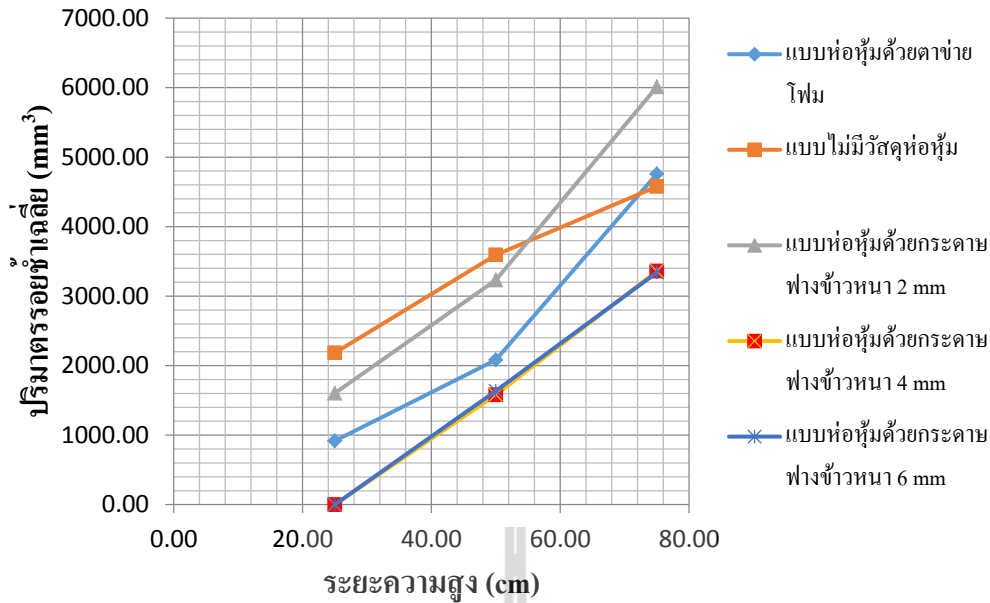


ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วยกระดาษ  
ฟางข้าวหนา 4 mm

ลำดับที่	ระดับความสูง					
	25 cm		50 cm		75 cm	
	ปริมาตร รอยชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอย ชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอย ชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)
1	0.00	0.36	921.53	0.85	4405.56	1.23
2	0.00	0.43	2431.59	0.85	3274.04	1.24
3	0.00	0.42	0.00	0.87	1601.92	1.26
4	0.00	0.43	3673.37	0.88	4147.16	1.15
5	0.00	0.39	0.00	0.77	3936.32	1.30
6	0.00	0.39	3141.33	0.75	2313.19	1.24
7	0.00	0.39	3286.89	0.80	1405.83	1.19
8	0.00	0.45	846.45	0.82	2601.24	1.27
9	0.00	0.40	2122.41	0.82	3960.24	1.32
10	0.00	0.42	1623.16	0.81	3077.48	1.17
11	0.00	0.44	945.75	0.81	2151.14	1.25
12	0.00	0.37	1830.76	0.79	2693.06	1.28
13	0.00	0.34	0.00	0.68	5301.44	1.33
14	0.00	0.35	1719.43	0.77	3207.70	1.28
15	0.00	0.46	1145.11	0.81	6317.61	1.31
<b>Mean±S.D.</b>	<b>0.0±0.0</b>	<b>0.40±0.04</b>	<b>1579.2±1191.9</b>	<b>0.81±0.05</b>	<b>3359.6±1350.1</b>	<b>1.25±0.05</b>

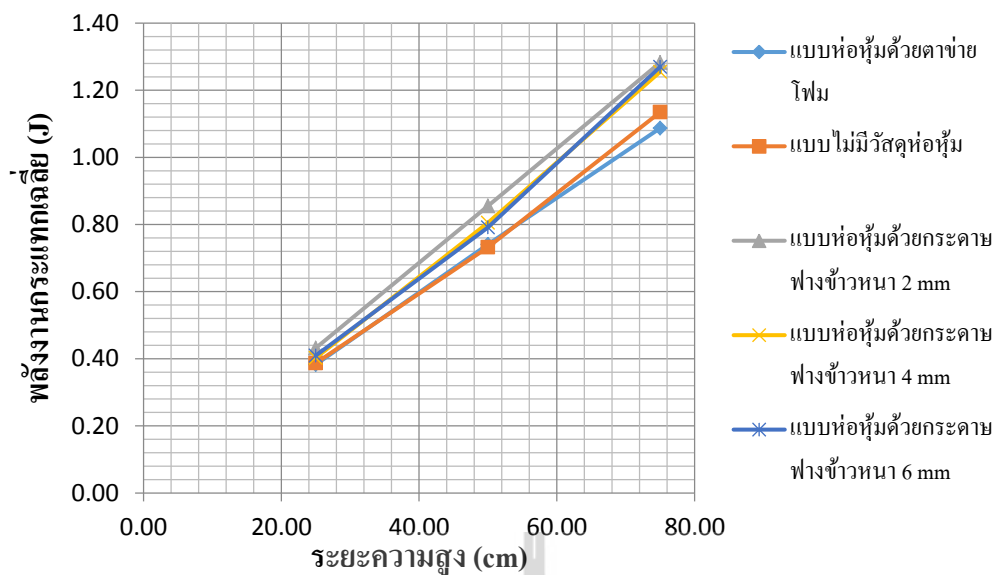
ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาตรรอยชำและพลังงานกระแทกของการทดสอบแบบห่อหุ้มด้วยกระดาษ  
ฟางข้าวหนา 6 mm

ลำดับที่	ระดับความสูง					
	25 cm		50 cm		75 cm	
	ปริมาตรรอย ชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอย ชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)	ปริมาตรรอย ชำ (mm <sup>3</sup> )	พลังงาน กระแทก (J)
1	0.00	0.42	2693.13	0.83	3822.79	1.19
2	0.00	0.41	695.34	0.74	3149.05	1.26
3	0.00	0.41	212.71	0.86	3987.73	1.31
4	0.00	0.41	1780.24	0.68	4053.70	1.29
5	0.00	0.38	2027.37	0.81	3363.76	1.21
6	0.00	0.40	1724.73	0.75	4568.60	1.27
7	0.00	0.43	1662.43	0.86	4130.67	1.25
8	0.00	0.40	2875.87	0.78	2601.24	1.20
9	0.00	0.40	2396.25	0.79	3141.33	1.33
10	0.00	0.41	463.88	0.83	2804.40	1.21
11	0.00	0.41	2141.78	0.80	3650.04	1.35
12	0.00	0.41	1662.43	0.81	3493.65	1.25
13	0.00	0.44	1466.08	0.76	3378.85	1.32
14	0.00	0.44	1145.11	0.76	1694.79	1.22
15	0.00	0.39	1583.89	0.79	2259.59	1.40
<b>Mean±S.D.</b>	0.0±0.0	0.41±0.02	1635.4±766.7	0.79±0.05	3340.0±765.4	1.27±0.06



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงและปริมาตรรอยน้ำเฉลี่ย

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อระยะความสูงเพิ่มขึ้นปริมาตรรอยน้ำก็สูงขึ้นด้วยนั่นคือ ปริมาตรรอยน้ำจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานกระแทกที่ได้รับ และเมื่อพิจารณาถึงวิธีในการปกป้องผล แอปเปิ้ลแล้วพบว่า การทดสอบแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม และ แบบห่อหุ้ม ด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 4, 6 มิลลิเมตร ปริมาตรรอยน้ำที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะความสูงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาการปกป้องด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2 มิลลิเมตร นั้นมีพบว่ามีค่าปริมาตรรอยน้ำสูงกว่าแบบไม่ห่อหุ้มที่ระดับความสูง 75 เซนติเมตร และพบว่า การปกป้องด้วยการหุ้มตาข่ายโฟมที่ระดับความสูง 75 เซนติเมตรนี้ก็มีความใกล้เคียงกับการ ไม่ห่อหุ้มสาเหตุอาจมาจากระดับพลังงานที่สูงเกินความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกของวัสดุ ห่อหุ้ม และอาจเป็นผลจากน้ำหนักของแอปเปิ้ลที่ต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าที่ออกมาต่างกันจึงได้ทำการ หาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกกับระยะความสูงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าสมมติ ฐานที่ว่าพลังงานกระแทกที่เกิดจากการทดสอบแอปเปิ้ลที่ปกป้องด้วยกระดาษฟางข้าวความหนา 2, 4, และ 6 มิลลิเมตร ที่ระดับความสูง 75 เซนติเมตรนั้นมีค่ามากกว่าการทดสอบผลแอปเปิ้ลที่ไม่ ห่อหุ้มและผลแอปเปิ้ลที่หุ้มด้วยตาข่ายโฟม นั่นคือน้ำหนักเฉลี่ยของผลแอปเปิ้ลที่ทดสอบด้วยการหุ้ม กระดาษฟางข้าวมีค่ามากกว่านั่นเองเมื่อระยะที่สูงขึ้นส่งผลให้พลังงานกระแทกสูงขึ้นไปด้วยตาม สมการ  $U = mgh$  ความจริงแล้วถ้ามวลเท่ากันความสูงเท่ากันพลังงานกระแทกจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงและพลังงานกระแทกเฉลี่ย

จากผลการทดสอบที่ได้เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาตรรอยช้ำที่เกิดขึ้นถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มอย่างชัดเจนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้กระดาดฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร หรือ 6 มิลลิเมตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมด้านการจัดการกระดาดฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร จึงมีความเหมาะสมกว่าที่จะเลือกใช้

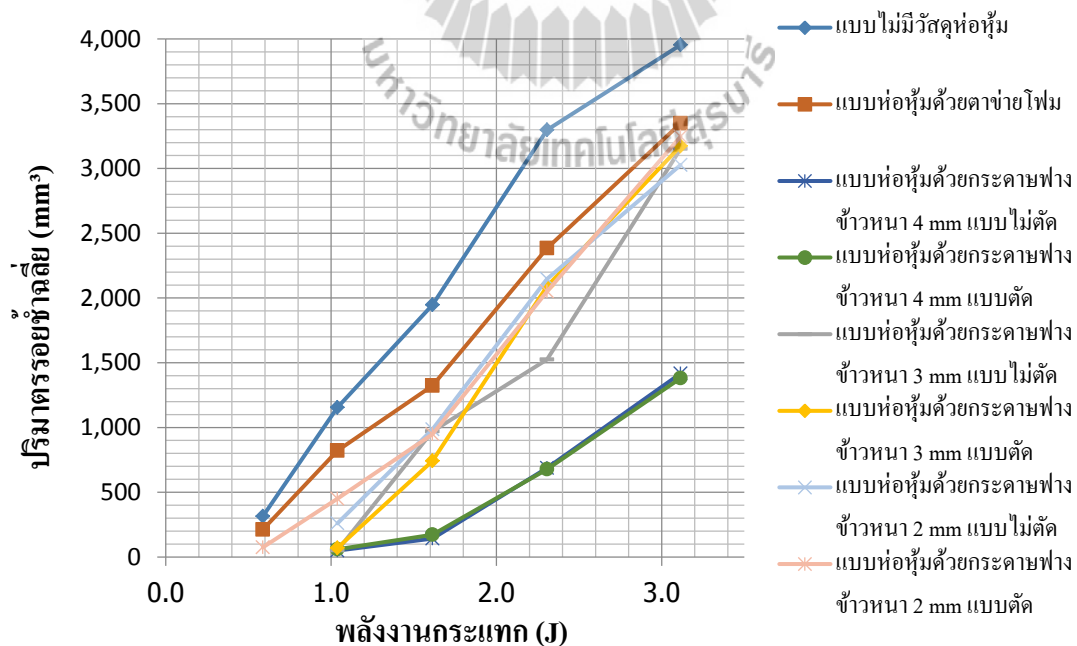
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาตรรอยช้ำจากการทดสอบด้วยวิธีการตกกระทบ

Cushioning Material	Non	Foam net	RP 2 mm	RP 4 mm	RP 6 mm
Mean of bruise volume (mm <sup>3</sup> )*	3451.21 <sup>a</sup>	2516.34 <sup>b</sup>	3688.04 <sup>b</sup>	1646.25 <sup>c</sup>	1705.02 <sup>c</sup>

\*Values followed by the same letter in row are not significantly different (Duncan, P<0.05)

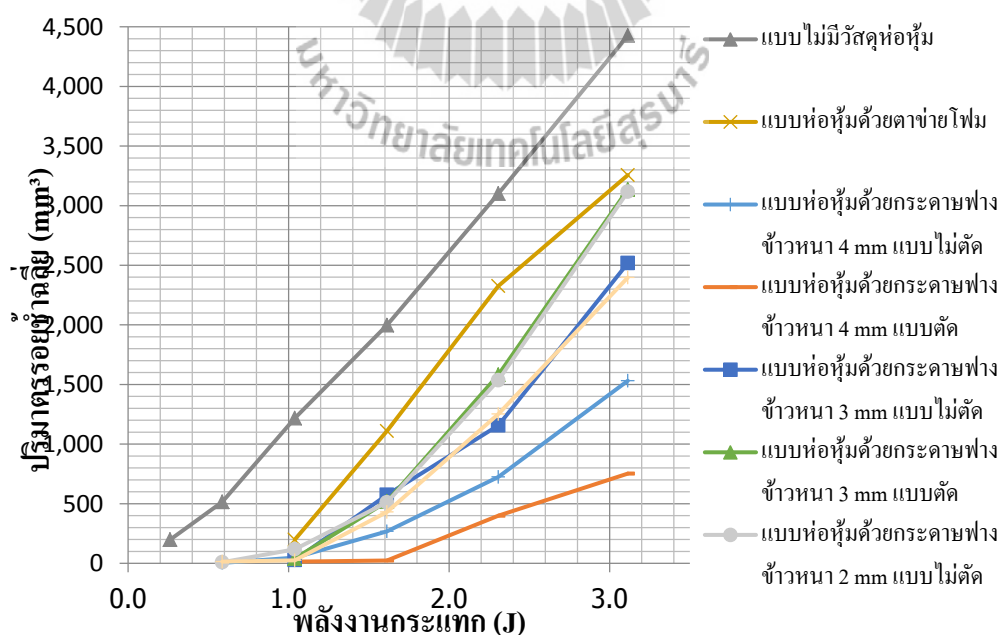
#### 4.2.3 ผลทดสอบการกระแทกด้วยเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum

เนื่องจากการทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลด้วยวิธีตกกระทบนั้น ค่าพลังงานการกระแทกขึ้นอยู่กับความสูงและน้ำหนักของผลแอปเปิลโดยน้ำหนักเป็นค่าที่ไม่สามารถกำหนดให้คงที่ได้ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบหาความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิลโดยวิธีการกระแทกแบบ Ballistic pendulum โดยทำการทดสอบกับผลแอปเปิล 2 ขนาดคือเบอร์ 80 และ เบอร์ 100 ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและปริมาตรรอยชำแฉะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่อถึงจุดที่เริ่มเกิดรอยชำแฉะแล้ว (ศุภกิตต์, 2550) เมื่อพิจารณาการปกป้องผลแอปเปิลเบอร์ 80 แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 3, 4 มิลลิเมตร (แบบตัดรีวและแบบไม่ตัด) ตามรูปที่ 4.3 และตาราง 4.8 พบว่า เมื่อพลังงานกระแทกสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาตรรอยชำแฉะสูงขึ้นด้วย และวัสดุกันกระแทกจากกระดาษฟางข้าวที่ความหนา 3 และ 4 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานเริ่มต้นที่ก่อให้เกิดรอยชำแฉะสูงสุดคือ 1.0383 จูล เมื่อทำการคำนวณหาค่าความต้านทานการชำแฉะโดยคำนวณจากค่าความชันกราฟพลังงานกระแทก (แกนนอน) และปริมาตรรอยชำแฉะทั้งหมด (แกนตั้ง) ค่าความชันของกราฟน้อย หมายถึง มีค่าความต้านทานการชำแฉะมาก เพราะทำให้เกิดปริมาตรชำแฉะน้อยกว่าจากพลังกระแทกหน่วยเดียวกัน ซึ่งจากการพิจารณาจาก รูปที่ 4.3 ตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9 พบว่าวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรแบบตัดรีวและไม่ตัดรีว สามารถป้องกันความชำแฉะที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิลได้ดีที่สุด (ค่าความต้านทานไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) โดยมีความต้านทานการชำแฉะสูงสุดเท่ากับ 656.53 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยชำแฉะของแอปเปิลเบอร์ 80

เมื่อพิจารณาการปกป้องผลแอปเปิลเบอร์ 100 แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม แบบห่อหุ้มด้วยตาข่าย โฟม และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 3, 4 มิลลิเมตร (แบบตัดรีวและแบบไม่ตัด) ตามรูปที่ 4.4 และตาราง 4.8 พบว่า เมื่อพลังงานกระแทกสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณรอยชำสูงชันด้วย และวัสดุกันกระแทกจากกระดาษฟางข้าวที่ความหนา 3 และ 4 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานเริ่มต้นที่ก่อให้เกิดรอยชำสูงสุดคือ 1.0383 จูล เท่ากับวัสดุกันกระแทกตาข่ายโฟม โดยค่าพลังงานเริ่มต้นที่ก่อให้เกิดรอยชำเป็นค่าที่พลังงานกระแทกที่เริ่มก่อให้เกิดรอยชำกับผลแอปเปิลในช่วงที่ทำการทดสอบ เมื่อทำการคำนวณหาค่าความต้านทานการชำโดยคำนวณจากค่าความชันกราฟพลังงานกระแทก (แกนนอน) และปริมาตรรอยชำทั้งหมด (แกนตั้ง) ค่าความชันของกราฟน้อย หมายถึง มีค่าความต้านทานการชำมาก เพราะทำให้เกิดปริมาตรชำน้อยกว่าจากพลังกระแทกหน่วยเดียวกัน ซึ่งจากการพิจารณาจาก รูปที่ 4.4 ตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9 พบว่าวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรแบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการชำสูงที่สุดเท่ากับ 380.64 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิลเบอร์ 100 และ 656.53 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิลเบอร์ 80 ซึ่งจากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าแอปเปิลเบอร์ 80 จะมีค่าความต้านทานการชำต่ำกว่าเบอร์ 100 เนื่องจากมีขนาดที่โตกว่าจึงมีความไวต่อความชำมากกว่าในทุกลักษณะการห่อหุ้มยกเว้นในลักษณะการห่อหุ้มแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากตัวอย่างที่นำมาใช้มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.1) จึงทำให้ค่าความต้านทานการชำในการทดสอบแบบที่ 1 ของทั้งสองขนาดไม่ต่างกันนัก ส่วนในกรณีการห่อหุ้มแบบที่ 2 อาจเกิดจากคุณภาพของตาข่ายโฟมที่นำกลับมาใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยชำเฉลี่ยของแอปเปิลเบอร์ 100

ตารางที่ 4.8 ระดับพลังงานที่เริ่มเกิดรอยชำ

ลักษณะการห่อหุ้ม	ระดับพลังงานที่เริ่มเกิดรอยชำ (J)	
	แอปเปิลเบอร์	แอปเปิลเบอร์
	100	80
1. แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม	0.2616	0.2616
2. แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี	1.0383	0.2616
3. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 2 มิลลิเมตร แบบตัด	0.5866	0.5866
4. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 2 มิลลิเมตร แบบไม่ตัด	0.5866	0.5866
5. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 3 มิลลิเมตร แบบตัด	1.0383	1.0383
6. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 3 มิลลิเมตร แบบไม่ตัด	1.0383	1.0383
7. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัด	1.0383	1.0383
8. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 4 มิลลิเมตร แบบไม่ตัด	1.0383	1.0383

ปริมาตรรอยชำที่เกิดจากการห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวที่ตัดรื้อจะมีค่าน้อยกว่าจากรายงานของ สุกกิตต์ (2550) ที่เกิดขึ้นจากการห่อหุ้มด้วยตาข่ายถักจากฝักตบชวา และเชือกกล้วย รวมถึงลอนของกระดาษลูกฟูกเนื่องจากลักษณะการตัดของกระดาษเป็นการตัดเพื่อให้ง่ายต่อการห่อหุ้มผลแอปเปิลและลักษณะรื้อที่ของกระดาษที่ตัดมีขนาดใหญ่เมื่อห่อหุ้มผลแอปเปิลแล้วไม่เกิดช่องว่างระหว่างรื้อ

ตารางที่ 4.9 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรซ้ำกับพลังงานกระแทกของแอปเปิล  
เมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ

ลักษณะการห่อหุ้ม	แอปเปิล เบอร์ 100		แอปเปิล เบอร์ 80	
	$V_b = AE_i + B^*$	$R^2$	$V_b = AE_i + B$	$R^2$
1. แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม	$V_b = 1495.30E_i - 313.94$	0.99	$V_b = 1475.50E_i - 421.4$	0.98
2. แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม	$V_b = 1494.0E_i - 1291.7$	0.99	$V_b = 1242.90E_i - 534.79$	0.99
3. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 2 mm. แบบตัด	$V_b = 975.70E_i - 865.45$	0.94	$V_b = 1273.80E_i - 852.04$	0.98
4. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 2 mm. แบบไม่ตัด	$V_b = 1245.10E_i - 1098.3$	0.93	$V_b = 1363.60E_i - 1146.7$	0.99
5. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 3 mm. แบบตัด	$V_b = 1273.10E_i - 1150.6$	0.93	$V_b = 1347.20E_i - 1117.9$	0.96
6. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 3 mm. แบบไม่ตัด	$V_b = 1176.9 E_i - 1305.6$	0.97	$V_b = 1433.50E_i - 1468.3$	0.97
7. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 4 mm. แบบตัด	$V_b = 380.64E_i - 470.6$	0.94	$V_b = 656.53E_i - 752.28$	0.95
8. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟาง ข้าวหนา 4 mm. แบบไม่ตัด	$V_b = 609.34E_i - 540.05$	0.93	$V_b = 682.73E_i - 803.83$	0.95

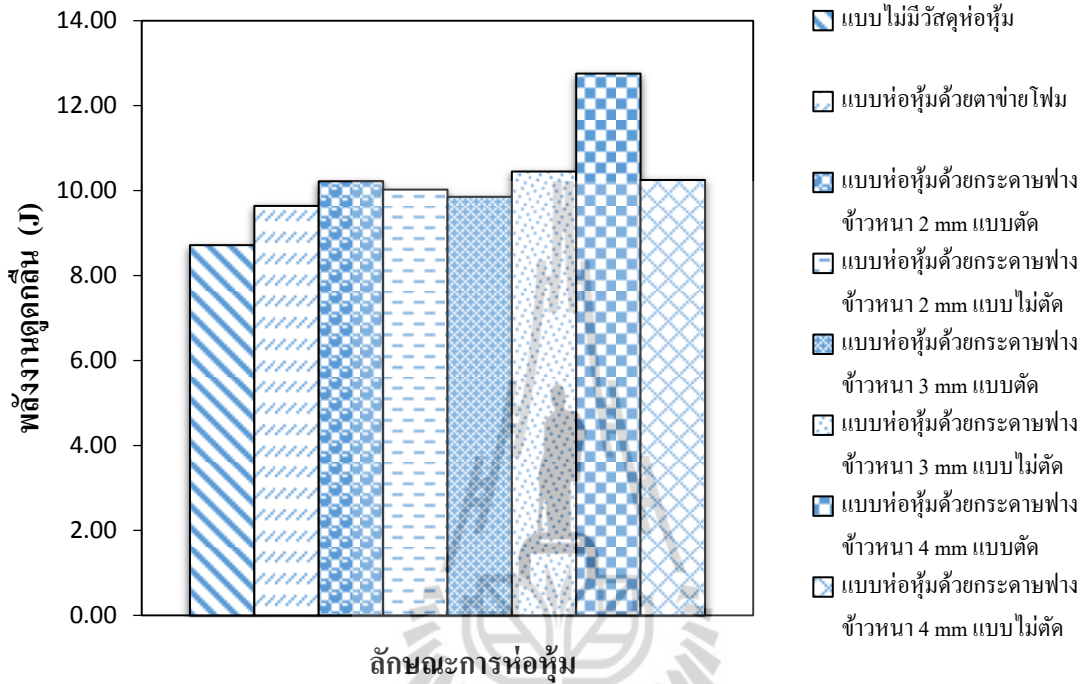
\*เมื่อ  $V_b$  = ปริมาตรเนื้อซ้ำ และ  $E_i$  = พลังงานกระแทก A, B = ค่าคงที่

#### 4.2.4 ผลของทดสอบการกดทับโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

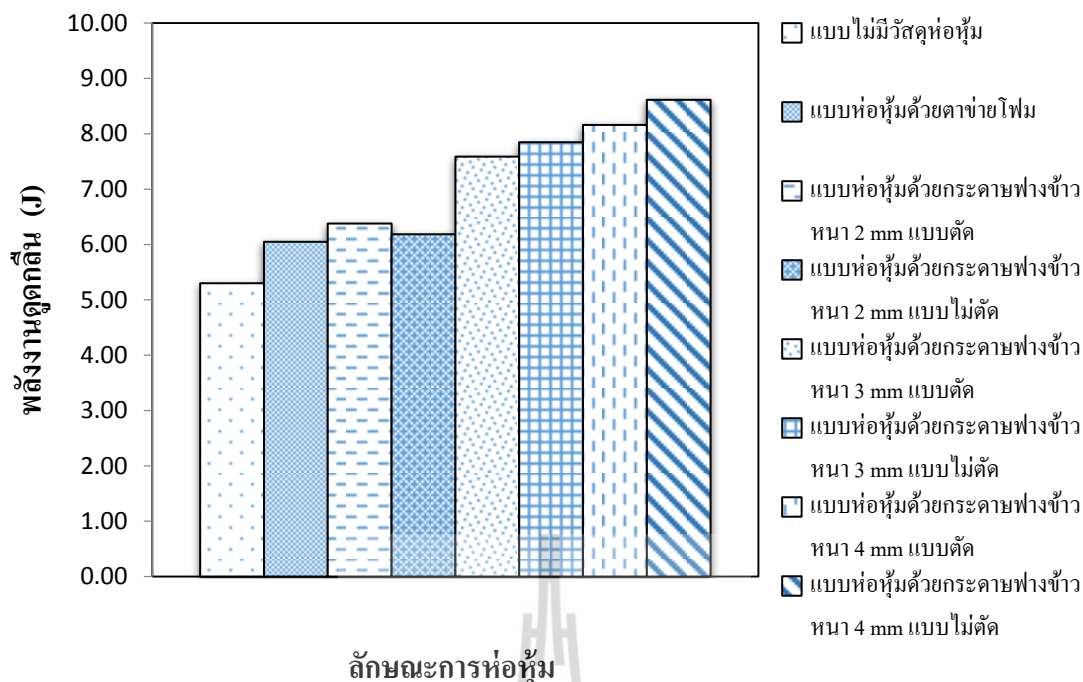
เมื่อห่อหุ้มผลแอปเปิลด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ ภายใต้การทดสอบการกดเป็น  
ภาวะเกือบสถิต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานดูดกลืนระหว่างลักษณะการห่อหุ้มด้วย  
วัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆกับค่าพลังงานดูดกลืนของผลแอปเปิลที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มมีความแตกต่าง  
กัน โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนไว้ที่วัสดุห่อหุ้มก่อนถ่ายเทไปยังผลแอปเปิลเป็นผลให้  
แอปเปิลที่ห่อหุ้มสามารถรับพลังงานได้มากกว่า การวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานนี้  
สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการขนส่งผลแอปเปิลหรือผลผลิตทางการเกษตรอื่น โดยใช้  
เป็นข้อมูลประกอบเพื่อให้ระมัดระวังในการวางซ้อนทับผลผลิตที่สูงเกินไปเพราะจะทำให้ผลผลิต  
ด้านล่างได้รับความเสียหาย ซึ่งผลจากการทดลองนี้พบว่าผลแอปเปิลเบอร์ 80 ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษ  
จากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัดรีว มีพลังงานดูดกลืนสูงสุด เท่ากับ 12.76 จูล โดยที่



แอปเปิลที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มมีพลังงานดูดกลืนน้อยที่สุด คือ 8.72 จูล (รูปที่ 4.5) สำหรับผลแอปเปิลเบอร์ 100 ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัดไม่รีว มีพลังงานดูดกลืนสูงที่สุด เท่ากับ 8.61 จูล โดยที่ แอปเปิลที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มมีพลังงานดูดกลืนน้อยที่สุด คือ 5.30 จูล (รูปที่ 4.6) อีกทั้งยังพบว่า ลักษณะการห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวทั้งสามความหนาสามารถดูดกลืนพลังงานได้ดีกว่าการห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี



รูปที่ 4.5 พลังงานดูดกลืนเมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆของแอปเปิลเบอร์ 80



รูปที่ 4.6 พลังงานดูดกลืนเมื่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆของแอปเปิลเบอร์ 100

#### 4.2.4 ผลของการทดสอบด้วยวิธีการสั้นสะเทือน มาตรฐาน ASTM D999 method A2

จากการทดสอบเขย่าแอปเปิลทั้งสองขนาดคือ เบอร์ 100 และ เบอร์ 80 ด้วยเครื่องจำลองการสั้นสะเทือน ตามมาตรฐาน ASTM- D999 method A2 ของบรรจุกัณฑ์ทั้ง 2 แบบคือ 1) กล่องกระดาษลูกฟูก (หุ้มตาข่ายโฟมและวางถาดรองแอปเปิลโฟม) 2) กล่องกระดาษลูกฟูก(หุ้มโฟมตาข่ายและวางถาดรองแอปเปิลจากฟางข้าว) และได้วัดความเสียหายของแอปเปิล โดยกำหนดความเสียหายเป็น 2 ประเภทคือ ช้ำ ถลอก แล้วคำนวณและวิเคราะห์ออกมาเป็นค่าความเสียหาย 2 แบบ คือ 1) ปริมาณความเสียหายเฉลี่ยต่อผล (ผลรวมของความเสียหายทั้งหมดในบรรจุกัณฑ์ / จำนวนผลทั้งหมดในบรรจุกัณฑ์) 2) เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (จำนวนผลที่เกิดความเสียหายทั้งหมดในบรรจุกัณฑ์/จำนวนผลทั้งหมดในบรรจุกัณฑ์) ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณความเสียหายของแอปเปิลเบอร์ 80 และ เบอร์ 100 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า แอปเปิลเบอร์ที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูกที่หุ้มตาข่ายโฟมและวางถาดรอง โฟมมีความเสียหายเกิดขึ้น จากการถลอก 11.33 เปอร์เซ็นต์ และไม่พบรอยช้ำ สำหรับแอปเปิลเบอร์ 100 ส่วนแอปเปิลเบอร์ 80 พบความเสียหายจากการช้ำ 0.42 เปอร์เซ็นต์ และ ถลอก 17.08 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแอปเปิลเบอร์ที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูกที่หุ้มตาข่ายโฟมและวางถาดรองแอปเปิลจากฟางข้าวมีความเสียหายที่เกิดขึ้น ช้ำ 0.67 เปอร์เซ็นต์ และถลอก 14.00 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแอปเปิลเบอร์ 100 และพบความเสียหายจากการช้ำ 4.17 เปอร์เซ็นต์ และ ถลอก 18.75 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแอปเปิลเบอร์ 80 แสดงให้เห็นว่า ถาดรองแอปเปิลจากฟางข้าวมีความสามารถในการปกป้องความเสียหายได้ในระดับที่ต่ำกว่าถาดรองแอปเปิลจากโฟมเล็กน้อย

พิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่ค่าไม่ต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเสียหายของแอปเปิลขนาด 80 มีความเสียหายมากกว่า แอปเปิลขนาดเบอร์ 100 ในทั้ง 2 รูปแบบการบรรจุ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอปเปิลขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายมากกว่าแอปเปิลขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เป็นความเสียหายเนื่องจากรอยถลอกมากกว่ารอยขีดข่วน แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งรอยถลอกจะเกิดขึ้นที่ผิวเปลือกส่วนรอยขีดข่วนจะทำให้เกิดความเสียหายถึงเนื้อแอปเปิล

ตารางที่ 4.10 ความเสียหายของแอปเปิลเบอร์ภายใต้สภาวะสั้นสะท้อนจำลอง

ลักษณะของภาชนะ	ชั้นรูป	เบอร์ 80			เบอร์ 100		
		ขีด (%)	ถลอก (%)	รวม (%)	ขีด (%)	ถลอก (%)	รวม (%)
ถาด โฟม	กล่องที่ 1	1.25	22.50	23.75	0	8	8
	กล่องที่ 2	0	16.25	16.25	0	10	10
	กล่องที่ 3	0	12.50	12.50	0	16	16
ค่าเฉลี่ย		0.42	17.08	17.50	0.00	11.33	11.33
ถาดฟาง ข้าว	กล่องที่ 1	6.25	12.50	18.75	2	16	18
	กล่องที่ 2	2.50	16.25	18.75	0	7	7
	กล่องที่ 3	3.75	27.50	31.25	0	19	19
ค่าเฉลี่ย		4.17	18.75	22.92	0.67	14.00	14.67



(ก) ลักษณะผิวถลอก



(ข) ลักษณะความเสียหายจากรอยขีด

รูปที่ 4.7 ความเสียหายของผลแอปเปิลจากการทดสอบด้วยเครื่องสั้นสะท้อนจำลอง

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการ

จากการพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวในรูปแบบของกระดาษและถาดรองภายในบรรจุภัณฑ์ขนส่ง แล้วดำเนินการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการปกป้องความเสียหายเชิงกล 3 ชนิด คือ ความเสียหายจากการกระแทก ความเสียหายจากการกดทับและความเสียหายจากการสั่นสะเทือนโดยใช้แอปเปิลเป็นวัสดุในการทดสอบ สามารถสรุปผลวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การทดสอบความสามารถในการปกป้องความเสียหายเชิงกลจากการกระแทก

การทดสอบด้วยวิธีด้วยวิธีตกกระทบเพื่อดูปริมาตรรอยชำรุดและพลังงานกระแทก พบว่า ปริมาตรรอยชำรุดแปรผันตามระดับพลังงานกระแทก โดยเมื่อพลังงานสูงขึ้นปริมาตรรอยชำรุดก็เพิ่มมากขึ้น วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร มีความสามารถป้องกันความชำรุดที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิลได้ดีที่สุด สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ตาข่ายโพนอนั้นสามารถป้องกันความชำรุดที่ระดับต่ำกว่า 25 เซนติเมตร แต่เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีตกกระทบค่าพลังงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับมวลของผลแอปเปิลซึ่งไม่คงที่ จึงมีการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบแท่งมวลแกว่ง (Ballistic Pendulum) เพื่อดูปริมาตรรอยชำรุดและพลังงานกระแทก พบว่าปริมาตรรอยชำรุดแปรผันตามระดับพลังงานกระแทก โดยเมื่อพลังงานสูงขึ้นปริมาตรรอยชำรุดก็เพิ่มมากขึ้น วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำรุดที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการชำรุดสูงสุดเท่ากับ 656.53 และ 380.64 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิลเบอร์ 80 และ 100 ตามลำดับ

##### 5.1.2 การทดสอบความสามารถในการป้องกันความเสียหายเชิงกลจากการกดทับ

การกดทับโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เป็นการทดสอบการกดทับเพื่อดูค่าพลังงานดูดกลืนของวัสดุกันกระแทกแบบชนิดต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า ผลแอปเปิลเบอร์ 80 ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัดรีว มีพลังงานดูดกลืนสูงสุด 12.76 จูล และ สำหรับแอปเปิลเบอร์ 100 ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบไม่ตัดรีว มีพลังงานดูดกลืนสูงสุด 8.61 จูล แอปเปิลที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มมีพลังงานดูดกลืนน้อยที่สุดที่ 8.72 จูล และ 5.30 จูล สำหรับแอปเปิลเบอร์ 80 และ เบอร์ 100 ตามลำดับ ลักษณะการห่อหุ้มแอปเปิลด้วยตาข่ายโพนอนั้นมีพลังงานดูดกลืนที่ต่ำกว่าวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวทั้ง 3 ความหนา

### 5.1.3 การทดสอบความสามารถในการป้องกันความเสียหายเชิงกลจากการสั่นสะเทือน

การใช้ฟางข้าวขึ้นรูปเป็นถาดรองแอปเปิลเพื่อกันกระแทกในบรรจุภัณฑ์ขายส่งเมื่อเทียบกับถาดโฟมแล้วยังมีความสามารถในการปกป้องที่ต่ำกว่าโดยความเสียหายรวมที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิลเบอร์ 80 ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนจำลองของถาดโฟมและถาดฟางข้าวคือ 17.50 และ 22.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสำหรับแอปเปิลเบอร์ 100 คือ 11.33 และ 14.67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวมีความเป็นไปได้ในการช่วยปกป้องผลผลิตทางการเกษตร (ผลแอปเปิล) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของผิวสัมผัสที่ยังขาดความอ่อนนุ่ม
2. หากมีการนำกระดาษฟางข้าวไปใช้ประโยชน์อาจต้องพิจารณาถึงเรื่องของการเกิดจากความชื้นที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการหายใจของผลผลิตเกษตร



## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ.2553.[ระบบออนไลน์].  
แหล่งที่มา  
[http://www.pcd.go.th/public/Publications/print\\_report.cfm?task=pcdreport2553](http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_report.cfm?task=pcdreport2553)
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือ งดเผาตอซัง สร้างดินยั่งยืน พื้นสิ่งแวดล้อม. กระทรวงเกษตรและ  
สหกรณ์.
- กิตติศักดิ์ ศรีบัว. 2544. การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิราภา เหลืองอรุณเลิศ. 2555. สถาบันอาหาร. (National Food Institute Thailand). [ระบบออนไลน์].  
แหล่งที่มา <http://www.phtnet.org/article/view-article.asp?aID=23>
- ฉัฐพงศ์ รัตนเดช และ บัณฑิต จริ โภภาส. 2549. อิทธิพลความถี่สั่นพ้องและวิธีการบรรจุผลแอปเปิล  
ในบรรจุภัณฑ์ขนส่ง. บทความวิจัยนำเสนอในการประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บ  
เกี่ยว/หลังการผลิตแห่งชาติ ครั้งที่ 4. (หน้า 292-295). จังหวัดเชียงใหม่.
- ชนพรรณ บุญยรัตกลิน , ทรงสิริ วิจิรัตน์ และ อุดม พลเยี่ยม. 2545. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษ  
จากฟางข้าว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตโชนดิเวช.
- นิตยา รื่นสุข, ประนอม มงคลบรรจง, เฉลิมชาติ ฤาไชยคาม และ วาสนา อินแถลง. 2551. การจัดการ  
ฟางข้าวในพื้นที่ทำนาอย่างต่อเนื่อง. วารสารวิชาการข้าว ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม –  
เมษายน. หน้า 35-46.
- บัณฑิต จริ โภภาส, วสันต์ แสงนิล และศุภลักษณ์ วรรณพงษ์. 2543. การศึกษาการใช้ ตาข่ายโพลีเอท  
หุ้มผลไม้ที่ถูกกระทำด้วยภาวะการกระแทก. วารสารวิชาการเกษตร 18 (2): 126 - 136.
- บัณฑิต จริ โภภาส, พิมพรรณ ปรีองาม, รุ่งฤดี พรสกุลเลิศชัย และวิเชฐ ศรีชลเพชร. 2549. การศึกษา  
เปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์ขนส่งผลเงาะสดภายใต้สภาวะสั่นสะเทือนจำลอง. การประชุม  
วิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7.จังหวัดมหาสารคาม. หน้า 307–  
314.
- บัณฑิต จริ โภภาส, ชารินี มหายศนันท์ และนางเยาว์ ศรีอเนก. 2546. การศึกษาความสามารถของตาข่าย  
ที่ทำจากเชือกกล้วยเพื่อป้องกันผลแอปเปิลจากการกระแทก. วิศวกรรมสาร มก. 17(51):9-  
16.
- บัณฑิต จริ โภภาส. 2549. เครื่องจักรกลหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุหีบห่อผลไม้. ภาควิชาวิศวกรรม  
เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

- ศิริพรรณ บุตรมาตย์ และ สุกาน นามคาน. 2547. การศึกษาหาค่าความร้อนของถ่านจาก ฟางข้าว แกลบ มูลสุกร ขี้เลื่อยคั่ว และฟางข้าวผสมกับแกลบ ฟางข้าวผสมกับมูลสุกร ฟางข้าวผสมกับขี้เลื่อย ในอัตราส่วนที่ต่างกัน. โครงการวิจัยหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- ศรินรา แมเริ๊ะ. 2545. บททความวิทยุราชการสาระความรู้ทางการเกษตร. ฟางข้าวอินทรีย์วัตถุค้ำในนาข้าว. งานศูนย์บริการวิชาการและฝึกอบรม. ฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ. คณะทรัพยากรธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- ศุภกิตต์ สายสุนทร. 2550. วิธีการทดสอบเพื่อประเมินความชื้นของแอปเปิ้ลจากการกระแทกและเปรียบเทียบวัสดุกันชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก สาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. สถิติการส่งออก. (Export). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.oae.go.th/oae\\_report/export\\_import/export\\_result.php](http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php)
- อำนาจ คงไทย. 2547. ศักยภาพในการใช้ฟางข้าวเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Andrews, E.H. 1980. In Mechanical Properties of Biological Materials (Symposium XXXIV of the Society for Experimental Biology, J.F.V. Vincent and J.C. Currey, eds.) pp. 13-35, Cambridge University press.
- Bollen, A.F., H.X. Nguyen and B.T. Dela Rue. 1999. Comparison of Methods for estimating the Bruise Volume of Apples. J. Agr. Eng. Res. 74: 325-330.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent and P. Barreiro. 1996. Effect of Impacting Mass on Firmness Sensing of Fruits. Trans. ASAE. 39 (3): 1019-1023.
- Chonhenchob, V. and S.P. Singh. 2004. Testing and Comparison of Various Packages for Mango Distribution. J. Test. Eva. 32: 69-72.
- Delwiche, M. J., H. Arevalo and J. Mehlschau. 1996. Second Generation Impact Force Response Fruit Firmness Sorter. Trans. ASAE. 39 (3): 1025-1033.
- Gordon} J.E. 1978. Structures. Penquin Books. Ltd., Harmondworth, England.
- Garcia, J.L., Ruiz-Altisent M. and Barreiro P. 1995. Factors Influencing Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Apples and Pears. J. Agr. Eng. Res. 61: 11-1.
- Holt, J.E. and D. School. 1977. Bruising and Energy Dissipation in Apples. J. Text. Stud. 7 (4): 421-432.

- Jarimopas, B. 1984. Failure of Apple under Dynamic Loadings. Unpublished D.Sc. Dissertation. Faculty of Agricultural Engineering, Israel Institute of Technology, Technion, Haifa, Israel.
- Mohsenin, N. N., 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers, Second Updated and Revised Edition. 841 p.
- Nilsson, S.B., C.H. Hertz and S. Falk. 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity, II. Physiologier Planetarum 11: 818-836.
- Pang, W., C.J. Studman and G.T. Ward. 1992. Bruising Damage in Apple-to-Apple Impact. J. Agr. Eng. Res. 52: 229-240.
- Peleg, K. 1981. Package product interaction in corrugated containers for fresh produce. Trans. ASAE. 24(3) : 794-800.
- Schoorl, D. and J.E. Holt. 1977. The effect of storage temperature on the bruising of Jonathan, Delicious and Granny Smith Apples. J. Text. Stud. 8: 409-416.
- Schoorl, D. and J.E. Holt. 1980. Bruise resistance measurements in apples. J. Text. Stud. 11: 389-394.
- Schulte, N.L., G.K. Brown and E.J. Timm. 1992. Apple Impact Damage Thresholds. App. Eng. Agr. 8 (1): 55-60.
- Srivastava, A.K., C.E. Goering and R.P. Rohrbach. 1993. Engineering Principles of Agricultural Machines. American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA.



ภาคผนวก  
เอกสารเผยแพร่งานวิจัย



ชนิดของเมล็ดพืช	สิ่งแปลกปลอม	จำนวนอัตราส่วนจริง (เมล็ด)		จำนวนอัตราส่วนการทดลอง (เมล็ด)	
		เมล็ดพืช	สิ่งแปลกปลอม	เมล็ดพืช	สิ่งแปลกปลอม
ถั่วลิสง	พลาสติก	0	10	0	10
ถั่วลิสง	ไม้			0	9
ถั่วลิสง	หิน			0	10

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดพืชด้วยเทคนิคเอกซเรย์โพสิตรอนกราฟฟี ในการทดลองได้ทำการตรวจจับหาสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดถั่วแดง และถั่วลิสง โดยกำหนดสิ่งแปลกปลอม 3 ชนิด คือ หิน ไม้ และพลาสติก ระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่ธัญพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนมาที่ได้จากผลการทดลองคือ 5 วินาที และช่วงเวลาเว้นระยะห่างหลังจากให้ความร้อนคือ 3 วินาที ซึ่งทำให้ได้ภาพถ่ายความร้อนที่ชัดเจนที่ใช้นามวิเคราะห์เพื่อแยกแยะและหาปริมาณสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืช โดยใช้ซอฟต์แวร์ Vision Builder AI ซึ่งซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างธัญพืชกับสิ่งแปลกปลอมได้ค่อนข้างชัดเจน โดยจากผลการทดลองปริมาณจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่จริงมีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับปริมาณสิ่งแปลกปลอมที่โปรแกรมตรวจจับได้ด้วยค่า  $R^2 > 0.97$  และสามารถแยกแยะและหาปริมาณสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืชได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งในทุกกรณีมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20% และระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำหลักการไปประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจหาสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไปในอนาคตได้

#### 5. อ้างอิง

- [1] เพ็ญภา ทรัพย์เจริญ (2544) การศึกษาทางมานุษยวิทยาโภชนาการ : กรณีถั่ว สถาบันการแพทย์แผนไทย กรมการแพทย์กรุงเทพฯ

- [2] พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก และคณะ. (2545). การศึกษาการใช้ แรงของสนามแม่เหล็กในการคัดแยกเมล็ดพืช. พิมพ์ ครั้งที่ 6. (หน้า 330-334)
- [3] สุพรรณ ยั่งยืน และเสรี วงศ์พิเชษฐ์. (2550). การศึกษาและ พัฒนาเครื่องแยกดินทราย ออกจาก อ้อยลำ . Postharvest Newsletter. ปีที่ 6 ฉบับที่ 4
- [4] G.Ginesu, D.D. Giusto, V.Margner V., (2004). Dection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing.IEEE Trasactions on Industrial Electronics.51, 480-490.
- [5] Christiane MAIERHOFER, Mathias ROELLIG (2009) Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures, Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany
- [6] P. Meinschmidt (2005), Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Fraunhofer-Institute for wood research, Braunschweig Germany
- [7] Thermal conductivity Food Network –Solution เรียบเรียงโดย ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศ.ดร.นิธิยา รัตนานพนธ์ URL: [http:// www.Foodnetworksolution.com/wiki/word/0564/thermal-conductivity](http://www.Foodnetworksolution.com/wiki/word/0564/thermal-conductivity), เข้าดูเมื่อวันที่ 28/01/2556.

TPT-18

### การปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว

\* ชนากร แนนกลาง<sup>1</sup> เหวรัตน์ ตรีอำนรรค<sup>1</sup> วัชรชัย อางหาญ<sup>1</sup> และ กระวี ตรีอำนรรค<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม. 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110



ผู้เขียนติดต่อ: ธนากร แนวกลาง E-mail: Brown\_ff@hotmail.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำฟางข้าวมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทก สำหรับปกป้องผลแอปเปิ้ลจากการกระแทกโดยวิธีการทดสอบแบบตกกระแทก ทดสอบกับผลแอปเปิ้ล 5 แบบ คือ แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้มแบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลีเอทิลีน และแบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2,4 และ 6 mm ตัดขนาดเท่ากับ 8x24 cm นำไปห่อผลแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ (เบอร์ 100) ทดสอบการตกกระแทกที่ระดับความสูง 3 ระดับคือ 25, 50 และ 75 cm ประเมินผลหาความสัมพันธ์ของปริมาตรรอยช้ำกับพลังงานกระแทก ผลปรากฏว่า วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 6 mm สามารถป้องกันความช้ำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ตาข่ายโพลีเอทิลีนสามารถป้องกันความช้ำที่ระดับต่ำกว่า 25 cm

**คำสำคัญ:** วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว; รอยช้ำ; พลังงานกระแทก

## บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย จากข้อมูลการส่งออกปี พ.ศ. 2554 พบว่าไทยส่งออกข้าว 10,706,229.125 ตัน มีมูลค่าการส่งออกมากถึง 196,117 ล้านบาท [1] ซึ่งแนวโน้มพื้นที่การปลูกข้าวของไทยมีสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากราคาข้าวที่สูงขึ้น ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งเรียกว่าฟางตอซึ่งเพิ่มขึ้นเกษตรกรนิยมเผาทำลายฟางข้าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมดินทำนาในปีต่อไปเป็นสำคัญ ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดิน ได้มีการรณรงค์การไม่เผาฟางข้าวจากหน่วยงานของรัฐขึ้น เนื่องจากฟางข้าวมีประโยชน์ในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้เกิดขึ้นได้เมื่อย่อยสลายและสามารถใช้เป็นวัสดุคลุมดินหรือใช้รักษาความชื้นในการเพาะเห็ดได้ดี [2] ประโยชน์ที่สำคัญประการหนึ่งของฟางข้าวคือ การมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์ (Fiber) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เช่น การทำกระดาษหัตถกรรม หรือกระดาษฟาง [3] เป็นต้น

ผลิตผลการเกษตรประเภทผัก ผลไม้และผลิตภัณฑ์จากปศุสัตว์หลายชนิดมีความไวต่อความเสียหายเชิงกล ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงมือผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการขนส่ง และการวางจำหน่ายหากผลิตผลเกษตรถึงมือผู้บริโภคในลักษณะที่มีความเสียหาย เช่น มีรอยช้ำ รอยแตก บิดเบี้ยว เสียวรูปทรง อันเนื่องมาจากการกระแทกและการสั่นสะเทือน [6] ก็อาจทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจไม่เลือกซื้อสินค้านั้นๆ อีกทั้งความเสียหายเหล่านี้เป็นแหล่งเพาะสะสมแบคทีเรียและเชื้อราเป็นอย่างดี หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องแล้ว ผลิตผลเกษตรที่อยู่ข้างเคียงอาจเสียหายตามมา ก่อให้เกิดการสูญเสียผลผลิต รายได้ และความน่าเชื่อถือของผู้ผลิต ผู้ขนส่ง และผู้จัดจำหน่าย แนวทางหนึ่งที่จะป้องกันความเสียหายเชิงกลต่อผลิตผลเหล่านี้คือ การปกป้องผลิตผลด้วยบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุกันกระแทกที่สามารถปกป้องผลิตผลได้ อย่างเช่น ไข่ไก่

บรรจุอยู่ในลังพลาสติกหรือลังกระดาษ ส่วนผลไม้จำพวกมะม่วง แอปเปิ้ล และมะละกอถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกตาข่ายโพลีเอทิลีน หรือแผ่นพลาสติกกันกระแทก ซึ่งทั้งตาข่ายโพลีเอทิลีนและพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จึงได้มีความคิดที่จะนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาปรับปรุงคุณสมบัติและองค์ประกอบเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งมีคุณภาพและประสิทธิภาพดีเพียงพอสำหรับการป้องกันความเสียหายของผลแอปเปิ้ล (ความช้ำ แตก เสียสภาพ) อันเนื่องมาจากความเสียหายเชิงกลในขั้นตอนจากการขนส่ง และการวางจำหน่ายในระบบค้าปลีก

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 กระบวนการผลิตวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว

การเตรียมวัตถุดิบโดยสับฟางข้าวด้วยเครื่องสับย่อยขนาดตะแกรง 3 มิลลิเมตร ทำการชั่งฟางข้าวที่สับย่อยโดยชั่งให้ได้ 200, 300 และ 400 g เติลงในหม้อต้มเยื่อที่เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 4% โดยปริมาตร [3] ให้ความร้อนจนน้ำเดือด ใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 ชั่วโมง เยื่อฟางข้าวจากการต้มจะยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปนอยู่ นำมาใส่ผ้าขาวบางล้างด้วยน้ำสะอาดโดยวิธีน้ำไหล สังเกตจากเมื่อจับเยื่อจะไม่ลื่นมือและน้ำล้างเยื่อจะใส นำเยื่อที่เตรียมไว้ทั้ง 3 หม้อ เทเยื่อที่ได้ลงไป ในตะแกรงมุ้งลวดที่ใช้ทำแผ่นกระดาษ โดยใช้ตะแกรงมุ้งลวดขนาด 40x60 cm ใช้เกรียงเกลี่ยเยื่อภายในตะแกรงมุ้งลวดให้มีความสม่ำเสมอทั้งแผ่น นำไปตากแดดให้แห้ง เมื่อกระดาษแห้งสนิทแล้ว ให้ใช้นิ้วมือกรีดรอบๆ ตะแกรงหรือบริเวณขอบตะแกรงจะทำให้กระดาษหลุดออกจากตะแกรงได้ง่ายขึ้น นั้นจึงค่อยๆ ดึงออก จะได้กระดาษจากเยื่อฟางข้าวที่มีความหนาประมาณ 2, 4 และ 6 cm ตามลำดับ วัดความชื้น





ผู้เขียนติดต่อ: ธนากร แนวกลาง E-mail: Brown\_ff@hotmail.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำฟางข้าวมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทก สำหรับปกป้องผลแอปเปิ้ลจากการกระแทกโดยวิธีการทดสอบแบบตกกระแทก ทดสอบกับผลแอปเปิ้ล 5 แบบ คือ แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้มแบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม และแบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2,4 และ 6 mm ตัดขนาดเท่ากับ 8x24 cm นำไปห่อผลแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ (เบอร์ 100) ทดสอบการตกกระแทกที่ระดับความสูง 3 ระดับคือ 25, 50 และ 75 cm ประเมินผลหาความสัมพันธ์ของปริมาตรรอยช้ำกับพลังงานกระแทก ผลปรากฏว่า วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 6 mm สามารถป้องกันความช้ำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ตาข่ายโฟมนั้นสามารถป้องกันความช้ำที่ระดับต่ำกว่า 25 cm

**คำสำคัญ:** วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว; รอยช้ำ; พลังงานกระแทก

## บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย จากข้อมูลการส่งออกปี พ.ศ. 2554 พบว่าไทยส่งออกข้าว 10,706,229.125 ตัน มีมูลค่าการส่งออกมากถึง 196,117 ล้านบาท [1] ซึ่งแนวโน้มพื้นที่การปลูกข้าวของไทยมีสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากราคาข้าวที่สูงขึ้น ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งเรียกว่าฟางตอซึ่งเพิ่มขึ้นเกษตรกรนิยมเผาทำลายฟางข้าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมดินทำนาในปีต่อไปเป็นสำคัญ ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดิน ได้มีการรณรงค์การไม่เผาฟางข้าวจากหน่วยงานของรัฐขึ้น เนื่องจากฟางข้าวมีประโยชน์ในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้เกิดขึ้นได้เมื่อย่อยสลายและสามารถใช้เป็นวัสดุคลุมดินหรือใช้รักษาความชื้นในการเพาะเห็ดได้ดี [2] ประโยชน์ที่สำคัญประการหนึ่งของฟางข้าวคือ การมีคุณสมบัติเป็นพืชเส้นใย (Fiber) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เช่น การทำกระดาษหัตถกรรม หรือกระดาษฟาง [3] เป็นต้น

ผลิตผลการเกษตรประเภทผัก ผลไม้และผลิตภัณฑ์จากปศุสัตว์หลายชนิดมีความไวต่อความเสียหายเชิงกล ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงมือผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการขนส่ง และการวางจำหน่ายหากผลิตผลเกษตรถึงมือผู้บริโภคในลักษณะที่มีความเสียหาย เช่น มีรอยช้ำ รอยแตก บิดเบี้ยว เสียวรูปทรง อันเนื่องมาจากการกระแทกและการสั่นสะเทือน [6] ก็อาจทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจไม่เลือกซื้อสินค้านั้นๆ อีกทั้งความเสียหายเหล่านี้เป็นแหล่งเพาะสะสมแบคทีเรียและเชื้อราเป็นอย่างดี หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องแล้ว ผลิตผลเกษตรที่อยู่ข้างเคียงอาจเสียหายตามมา ก่อให้เกิดการสูญเสียผลผลิต รายได้ และความน่าเชื่อถือของผู้ผลิต ผู้ขนส่ง และผู้จัดจำหน่าย แนวทางหนึ่งที่จะป้องกันความเสียหายเชิงกลต่อผลิตผลเหล่านี้คือ การปกป้องผลิตผลด้วยบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุกันกระแทกที่สามารถปกป้องผลิตผลได้ อย่างเช่น ไข่ไก่

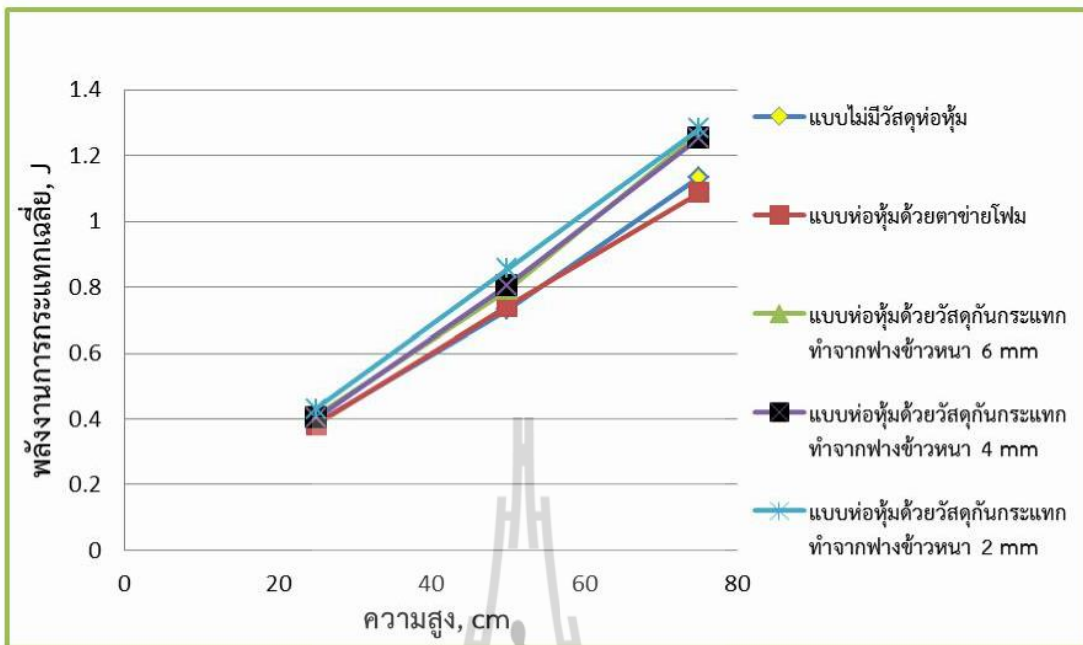
บรรจุอยู่ในลังพลาสติกหรือลังกระดาษ ส่วนผลไม้จำพวกมะม่วง แอปเปิ้ล และมะละกอถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกตาข่ายโฟม หรือแผ่นพลาสติกกันกระแทก ซึ่งทั้งตาข่ายโฟมและพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จึงได้มีความคิดที่จะนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาปรับปรุงคุณสมบัติและองค์ประกอบเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งมีคุณภาพและประสิทธิภาพดีเพียงพอสำหรับการป้องกันความเสียหายของผลแอปเปิ้ล (ความช้ำ แตก เสียสภาพ) อันเนื่องมาจากความเสียหายเชิงกลในขั้นตอนจากการขนส่ง และการวางจำหน่ายในระบบค้าปลีก

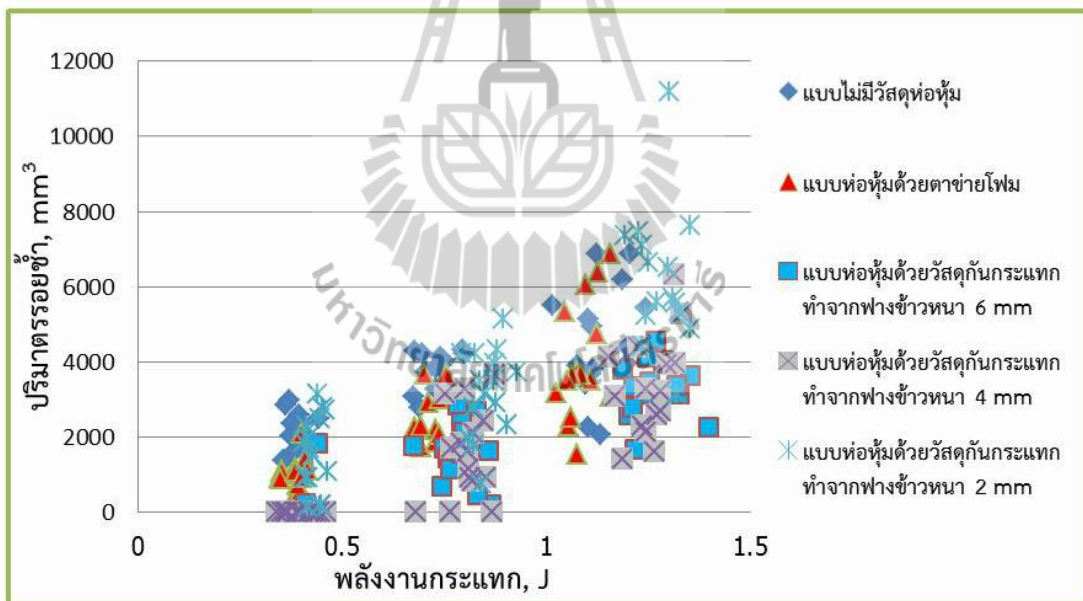
## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 กระบวนการผลิตวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว

การเตรียมวัตถุดิบโดยสับฟางข้าวด้วยเครื่องสับย่อยขนาดตะแกรง 3 มิลลิเมตร ทำการชั่งฟางข้าวที่สับย่อยโดยชั่งให้ได้ 200, 300 และ 400 g เติลงในหม้อต้มเยื่อที่เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 4% โดยปริมาตร [3] ให้ความร้อนจนน้ำเดือด ใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 ชั่วโมง เยื่อฟางข้าวจากการต้มจะยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปนอยู่ นำมาใส่ผ้าขาวบางล้างด้วยน้ำสะอาดโดยวิธีน้ำไหล สังเกตจากเมื่อจับเยื่อจะไม่ลื่นมือและน้ำล้างเยื่อจะใส นำเยื่อที่เตรียมไว้ทั้ง 3 หม้อ เทเยื่อที่ได้ลงไป ในตะแกรงมุ้งลวดที่ใช้ทำแผ่นกระดาษ โดยใช้ตะแกรงมุ้งลวดขนาด 40x60 cm ใช้เกรียงเกลี่ยเยื่อภายในตะแกรงมุ้งลวดให้มีความสม่ำเสมอทั้งแผ่น นำไปตากแดดให้แห้ง เมื่อกระดาษแห้งสนิทแล้ว ให้ใช้นิ้วมือกรีดรอบๆ ตะแกรงหรือบริเวณขอบตะแกรงจะทำให้กระดาษหลุดออกจากตะแกรงได้ง่ายขึ้น นั้นจึงค่อยๆ ดึงออก จะได้กระดาษจากเยื่อฟางข้าวที่มีความหนาประมาณ 2, 4 และ 6 cm ตามลำดับ วัดความชื้น



รูปที่ 3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงและพลังงานกระแทกเฉลี่ย



รูปที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยชำทั้งหมด

เหมือนที่ความสูง 25 cm แต่ที่ความสูงอื่นๆ ไม่เท่ากันอาจเกิดจากมวลที่ต่างกันของผลแอปเปิ้ล

รูปที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาตรรอยชำ โดยกราฟนี้จะใช้ข้อมูลทั้งหมดมาพล็อต ขึ้นอยู่กับความสูงและมวลของแอปเปิ้ล เนื่องจากแอปเปิ้ลไม่ได้มีขนาดและน้ำหนักที่เท่ากันทุกลูก เช่น บางลูก

หนัก แต่ทำการทดลองในระยะที่น้อยกว่า อาจมีค่าพลังงานกระแทกที่เท่ากับหรือน้อยกว่าในการทดลองที่มวลน้อย แต่ทำการทดลองในระยะที่สูงกว่าก็เป็นได้ ค่าจึงออกมาดังรูป

#### 4. สรุป



การทดลองเพื่อดูปริมาตรรอยชำและพลังงาน  
 กระแทก พบว่าปริมาตรรอยชำผันแปรตามระดับพลังงาน  
 กระแทกโดยเมื่อพลังงานสูงขึ้นปริมาตรรอยชำก็เพิ่มมากขึ้น  
 วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 6 mm สามารถ  
 ป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด สำหรับ  
 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ตาข่ายโฟมนั้นสามารถป้องกันความชำที่  
 ระดับต่ำกว่า 25 cm

Breach Science Publishers, Second  
 Updated and Revised Edition. 841p.

## 5. กิตติกรรมประกาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่อุดหนุนทุนในการทำ  
 วิจัยครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554 สถิติการส่งออก  
 (Export) [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา  
[http://www.oae.go.th/oae\\_report/export\\_import/  
 export\\_result.php](http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php) เข้าดูเมื่อวันที่  
 20/08/2555
- [2] ศรีนรา แมะเร้าะ. 2545 บทควมวิทยุรายการสาระ  
 ความรู้ทางการเกษตร ฟางข้าวอินทรีย์วัตถุล้าค่า  
 ในนาข้าว. ประจำปีจันทร์ที่ 17 มิถุนายน 2545,  
 งานศูนย์บริการวิชาการและฝึกอบรม. ฝ่ายวิจัยและ  
 บริการวิชาการ. คณะทรัพยากรธรรมชาติ.  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- [3] ธนพรรณ บุณรัตน์, ทรงสิริ วิชิรันนท์ และ อุดม พล  
 เยี่ยม. 2545. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษจาก  
 ฟางข้าว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบัน  
 เทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตโขติเวช, หน้า 81 –  
 82.
- [4] ศุภกิตต์ สายสุนทร และบัณฑิต จริโมภาส. 2549. การ  
 พัฒนาวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสมต่อผลแอปเปิ้ล  
 สดเพื่อป้องกันการชำจากการกระแทก. รายงาน  
 ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง  
 ประเทศไทย ครั้งที่ 7, วันที่ 23-24 มกราคม 2549,  
 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, จังหวัดมหาสารคาม,  
 หน้า 282 – 289
- [5] บัณฑิต จริโมภาส. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลัง  
 การเก็บเกี่ยว บรรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุ ผลไม้.  
 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย,  
 ขอนแก่น.
- [6] Mohsenin, N. N., 1986. Physical Properties of  
 Plant and Animal Materials. Gordon and



TPT-06

## การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยกระดาดจากฟางข้าวด้วยวิธีการ ทดสอบแบบ ballistic pendulum

\*ธนากร แนวกลาง<sup>1</sup>, เทวรัตน์ ตรีอำรรค<sup>1</sup>, วีรชัย อาจหาญ<sup>1</sup> และ กระวี ตรีอำรรค<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000

ผู้เขียนติดต่อ: ธนากร แนวกลาง E-mail: Brown\_ff@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของวัสดุกันกระแทกจากกระดาดฟางข้าวสำหรับปกป้องผลแอปเปิ้ลจากการกระแทกโดยวิธีการทดสอบแบบ Ballistic Pendulum ทดสอบกับผลแอปเปิ้ล 8 แบบ คือ แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม, แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร ขนาดเท่ากับ 8x24 เซนติเมตร (แบบตัดริ้วและแบบไม่ตัด) นำไปห่อผลแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ (เบอร์ 80 เบอร์ 100) ทดสอบที่ 5 ระดับมุมตกกระทบคือ 15, 20, 25, 30 และ 35 องศา ประเมินผลหาความสัมพันธ์ของปริมาตรรอยช้ำกับพลังงานกระแทกเพื่อหาวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสม ผลปรากฏว่า วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบตัด สามารถป้องกันความช้ำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการเข้าสูงที่สุดเท่ากับ 557.73 และ 310.01 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลเบอร์ 80 และ 100 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว; รอยช้ำ; พลังงานกระแทก

### 1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย จากข้อมูลการส่งออกปี พ.ศ. 2557 พบว่าไทยส่งออกข้าว 9,492,181,007 ตัน มีมูลค่าการส่งออกมากถึง 152,315 ล้านบาท[1] พื้นที่การปลูกข้าวของไทยมีพื้นที่ทั้งหมด 79 ล้านไร่ เป็นพื้นที่ปลูกข้าวนาปี 64 ล้านไร่ ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งเรียกว่าฟางตอซังเหลือในไร่นาเฉลี่ยไร่ละ 300 กิโลกรัม[2] เกษตรกรนิยมเผาทำลายฟางข้าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมดินทำนาในปีต่อไปเป็นสำคัญก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดิน ได้มีการรณรงค์การไม่เผาฟางข้าวจากหน่วยงานของรัฐขึ้นเนื่องจากฟางข้าวมีประโยชน์ในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่ดินได้เมื่อย่อยสลาย และสามารถนำมาอัดแท่งเป็นเชิงเพลิงชีวมวล[3] ประโยชน์ที่สำคัญประการหนึ่งของฟางข้าวคือการมีคุณสมบัติเป็นพืชเส้นใย (Fiber) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เช่น การทำกระดาดหัตถกรรม หรือกระดาดฟาง[4] เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์การเกษตรประเภทผัก ผลไม้และผลิตภัณฑ์จากปศุสัตว์หลายชนิดมีความไวต่อความเสียหายเชิงกล ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตตั้งแต่

เก็บเกี่ยวจนถึงมือผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการขนส่ง และการวางจำหน่ายหากผลิตภัณฑ์ถึงมือผู้บริโภคในลักษณะที่มีความเสียหาย เช่น มีรอยช้ำ รอยแตก บิดเบี้ยว เสียรูปร่าง อันเนื่องมาจากการกระแทกและการสั่นสะเทือน [7] ก็อาจทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจไม่เลือกซื้อสินค้านั้นๆ อีกทั้งความเสียหายเหล่านี้เป็นแหล่งเพาะสะสมแบคทีเรียและเชื้อราเป็นอย่างดี หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ข้างเคียงอาจเสียหายตามมา ก่อให้เกิดการสูญเสียผลผลิต รายได้ และความน่าเชื่อถือของผู้ผลิต ผู้ขนส่ง และผู้จัดจำหน่าย แนวทางหนึ่งที่จะป้องกันความเสียหายเชิงกลต่อผลิตภัณฑ์เหล่านี้คือ การปกป้องผลผลิตด้วยบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุกันกระแทกที่สามารถปกป้องผลผลิตได้ อย่างเช่น ไข่ไก่บรรจุอยู่ในลังพลาสติกหรือลังกระดาษ ส่วนผลไม้จำพวกมะม่วง แอปเปิ้ล และมะละกอลูกห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกตาข่ายโพลี หรือแผ่นพลาสติกกันกระแทก ซึ่งทั้งตาข่ายโพลีและพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

มีการศึกษาการปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวด้วยวิธีการทดสอบแบบตกกระทบ พบว่าวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 6 mm สามารถป้องกันความช้ำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด[5] แต่





เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีตกกระแทกค่าพลังงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับมวลของผลแอปเปิ้ลซึ่งไม่คงที่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลของวัสดุกันกระแทกโดยใช้เทคนิคการทดสอบแบบ ballistic pendulum

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 กระบวนการผลิตวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว

การเตรียมวัตถุดิบโดยสับฟางข้าวด้วยเครื่องสับย่อยขนาดตะแกรง 3 มิลลิเมตร ทำการชั่งฟางข้าวที่สับย่อย โดยชั่งให้ได้ 200 กรัม 250 กรัม และ 300 กรัม เเทลงในหม้อต้มเยื่อที่เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 4% โดยปริมาตร [4] ให้ความร้อนจนน้ำเดือด ใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 ชั่วโมง เยื่อฟางข้าวจากการต้มจะยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปนอยู่ นำมาใส่ผ้าขาวบางล้างด้วยน้ำสะอาด โดยวิธีน้ำไหล สังเกตจากเมื่อจับเยื่อจะไม่ลื่นมือและน้ำล้างเยื่อจะใส นำเยื่อที่เตรียมไว้ทั้ง 3 หม้อ เทเยื่อที่ได้ลงไปในตะแกรงมุ้งลวดที่ใช้ทำแผ่นกระดาษ โดยใช้ตะแกรงมุ้งลวดขนาด 40x60 cm ใช้เครื่องเกลี่ยเยื่อภายในตะแกรงมุ้งลวดให้มีความสม่ำเสมอทั้งแผ่น นำไปตากแดดให้แห้ง เมื่อกระดาษแห้งสนิทดีแล้ว ให้ใช้นิ้วมือกรีดรอบๆ ตะแกรงหรือบริเวณขอบตะแกรงจะทำให้กระดาษหลุดออกจากตะแกรงได้ง่ายขึ้น นั้นจึงค่อยๆ ค่อยๆ ออก จะได้กระดาษจากเยื่อฟางข้าวที่มีความหนาประมาณ 2, 3 และ 4 mm ตามลำดับ วัดความชื้นกระดาษให้ได้ความชื้นต่ำกว่า 10 % นำกระดาษจากฟางข้าวทั้ง 3 ความหนา มาตัดให้ได้ขนาด 8x24 cm [6]

### 2.2 การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบ

#### Ballistic Pendulum

เตรียมผลแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ (เบอร์ 100) และ (เบอร์ 80) จำนวน 1,200 ผล ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียด  $\pm 0.01$  กรัม นำมาวัดค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุด ( $D_{max}$ ), วัดค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุด ( $D_{min}$ ) และวัดค่าความสูง ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบ Ballistic Pendulum โดยแบ่งเป็น 8 แบบ คือ แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม, แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 3 และ 4 mm ตัดขนาดเท่ากับ 8x24 cm แบ่งออกเป็น 2 ชุดคือ แบบตัดรีวและแบบไม่ตัดตั้งแสดงในรูปที่ 1 ทดสอบที่ 5 ระดับมุมตกกระทบคือ 15, 20, 25, 30 และ 35 องศา (ทดสอบมุมละ 15 องศา) หลังจากทำการทดสอบแล้วทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อให้กระดาษที่ซัดเจี้ยน

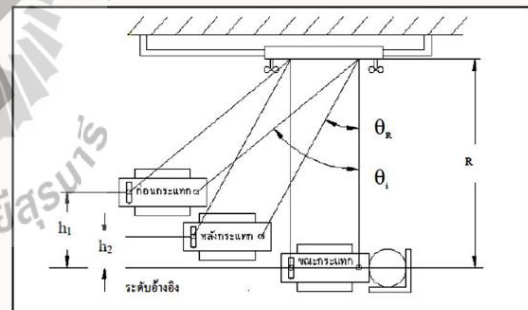


รูปที่ 1 กระดาษจากฟางข้าวแบบตัดรีวและแบบไม่ตัด

นำผลแอปเปิ้ลมาผ่าเพื่อดูรอยชำพร้อมทั้งวัดค่าความลึกเต็มของรอยชำ ( $D$ ), ความกว้างของรอยชำ ( $W$ ) เพื่อคำนวณหาปริมาตรรอยชำ [8] และพลังงานกระแทก ดังสมการ

$$V = (\pi/8)W^2D \quad \dots(1)$$

$$U = mgR(1 - \cos\theta) \quad \dots(2)$$



รูปที่ 2 Ballistic Pendulum

เมื่อ

$U$  = พลังงานกระแทก มีหน่วยเป็น J

$m$  = มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น kg

$g$  = ค่านิจโน้มถ่วง มีหน่วยเป็น  $m/s^2$

$R$  = ความยาวเชือก มีหน่วยเป็น m

$\theta$  = มุมของเส้นเชือกทำกับแนวตั้งก่อนปล่อยมีหน่วยเป็นองศา (มุมตกกระทบ, รูปที่ 2)

คำนวณหาค่าความต้านทานการชำทั้งหมด โดยคำนวณจากค่าความชันกราฟพลังงานกระแทก (แกนนอน) และปริมาตรรอยชำทั้งหมด (แกนตั้ง) วัสดุที่มีค่าความชันของกราฟน้อย หมายถึงมีค่าความต้านทานการชำมาก เพราะทำให้เกิดจากปริมาตรชำน้อย จากพลังพลังกระแทกหน่วยเดียวกัน





### 3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการกระแทกและปริมาตรรอยชำเฉลี่ยของแอปเปิ้ลเบอร์ 80 โดยใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลองมา plot จะเห็นว่า เมื่อพลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้นปริมาตรรอยชำก็สูงขึ้นด้วย และกราฟนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบของแต่ละการทดลอง ซึ่งการทดลองแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 2, 4 mm (แบบตัดรีวและแบบไม่ตัด) เป็นไปตามแนวโน้ม คือ เมื่อพลังงานการกระแทกสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาตรรอยชำสูงขึ้นด้วย แต่แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจาก ฟางข้าวหนา 3 mm (แบบตัดรีวและแบบไม่ตัด) นั้น มีค่าที่แตกต่างจากแนวโน้มอย่างเห็นได้ชัดที่พลังงานการกระแทกที่ 3.1 จูล ค่าที่ควรจะเป็น ปริมาตรรอยชำไม่น่าจะมากกว่าแบบที่ห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวหนา 2 mm แบบไม่ตัด วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 mm. แบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการชำสูงที่สุดเท่ากับ 557.73 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการกระแทกและปริมาตรรอยชำเฉลี่ยของแอปเปิ้ลเบอร์ 100 โดยเราใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลองมา plot จะเห็นว่ากราฟเป็นไปตามแนวโน้ม เมื่อพลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้นปริมาตรรอยชำก็สูงขึ้นด้วย และกราฟนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบของแต่ละการทดลอง ซึ่งการทดลองแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี และ แบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากฟางข้าวหนา 4 mm (แบบตัดรีว และ แบบไม่ตัด) เป็นไปตามแนวโน้ม คือ เมื่อพลังงานการกระแทกสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาตรรอยชำสูงขึ้นด้วย วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 mm. แบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการชำสูงที่สุดเท่ากับ 310.01 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานการชำกำหนดโดยความชันเฉลี่ยของกราฟพลังงานการกระแทกและปริมาตรรอยชำ

ทั้งหมด พบว่า การที่ไม่มีวัสดุห่อหุ้มจะทำให้ผลแอปเปิ้ลเกิดปริมาตรรอยชำเฉลี่ยมากที่สุด วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 mm. แบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุดทั้ง 2 ขนาดคือ เบอร์ 100 และเบอร์ 80

### 4. สรุป

การทดลองเพื่อดูปริมาตรรอยชำและพลังงานการกระแทกพบว่าปริมาตรรอยชำผันแปรตามระดับพลังงานการกระแทกโดยเมื่อพลังงานสูงขึ้นปริมาตรรอยชำก็เพิ่มมากขึ้น วัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนา 4 mm. แบบตัดรีว สามารถป้องกันความชำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด โดยมีความต้านทานการชำสูงที่สุดเท่ากับ 557.73 ละ 310.01 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลเบอร์ 80 และ 100 ตามลำดับ

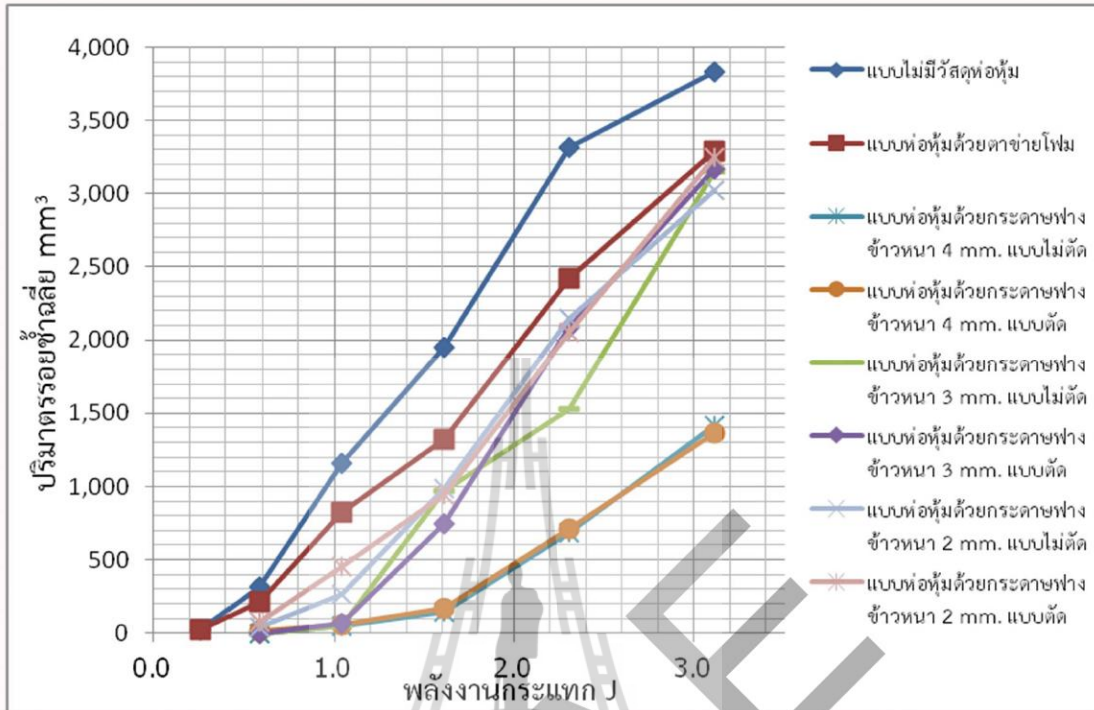
ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานการชำกำหนดโดยความชันเฉลี่ยของกราฟพลังงานการกระแทกและปริมาตรรอยชำ (หน่วย: ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล)

ลักษณะการห่อหุ้ม	ขนาดแอปเปิ้ล	
	เบอร์ 100	เบอร์ 80
1. แบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม	1,532.12 ±355.02	1,411.99 ±206.03
2. แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลี	1,241.25 ±236.11	1,091.07 ±260.44
3. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 2 mm แบบตัด	979.43 ±268.31	1,206.26 ±293.55
4. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 2 mm แบบไม่ตัด	1,208.71 ±213.67	1,218.28 ±317.51
5. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 3 mm แบบตัด	1,273.67 ±222.09	1,345.39 ±101.92
6. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 3 mm แบบไม่ตัด	1,002.76 ±178.53	1,255.99 ±138.60
7. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 4 mm แบบตัด	310.01 ±54.49	557.73 ±179.60
8. แบบห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 4 mm แบบไม่ตัด	588.46 ±156.86	568.60 ±135.43

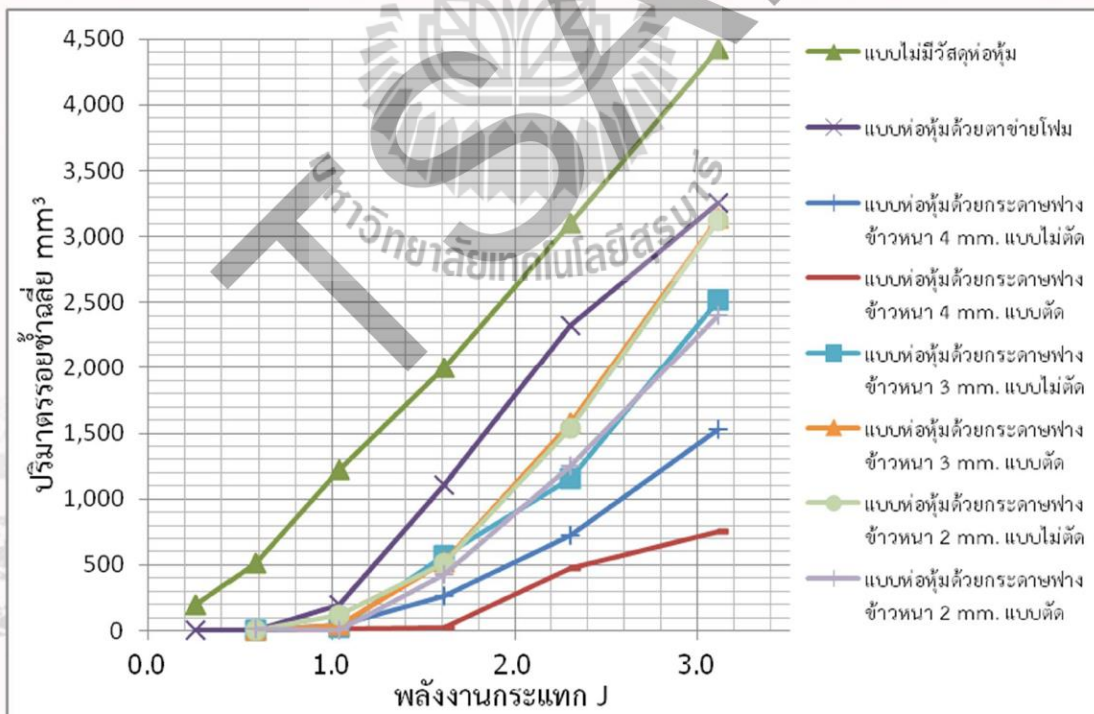




The 16<sup>th</sup> TSAE National Conference and the 8<sup>th</sup> TSAE International Conference  
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 16 ประจำปี 2558 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 8



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาณธัญพืชที่เฉลี่ยของแอปเปิ้ลเบอร์รี่ 80



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทกและปริมาณธัญพืชที่เฉลี่ยของแอปเปิ้ลเบอร์รี่ 100







## 5. กิตติกรรมประกาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่อุดหนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, (2557) สถิติการส่งออก (Export) [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.oae.go.th/oea\\_report/export\\_import/export\\_result.php](http://www.oae.go.th/oea_report/export_import/export_result.php) เข้าดูเมื่อวันที่ 20/01/2558
- [2] กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, (2548) คู่มืองดเผาตอซัง สร้างดินยั่งยืน พื้นสิ่งแวดล้อม, หน้า 4
- [3] ณัฐพงษ์ ประภาการ, สุภัทร หนูยิ้ม, ธนัช มุขพันธ์, พรรษา ลิบลับ, สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อัจฉาญ (2555). คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ฟางข้าว เศษวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด และแห้งมันสำปะหลัง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, วันที่ 24-27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย.
- [4] ธนพรรณ บุณรัตกลิน, ทรงสิริ วิชิรานนท์ และ อุดม พลเยี่ยม. 2545. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษจากฟางข้าว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตโชนดิเวช, หน้า 81 – 82
- [5] ธนากร แนวกลาง, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, วีรชัย อัจฉาญ และ กระวี ตรีอำนาจ (2556). การปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, วันที่ 1-4 เมษายน 2556 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.
- [6] ศุภกิตต์ สายสุนทร และบัณฑิต จริโมภาส. (2549). การพัฒนาวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสมห่อผลแอปเปิ้ลสดเพื่อป้องกันการช้ำจากการกระแทก. รายงานประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7, วันที่ 23-24 มกราคม 2549, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, จังหวัดมหาสารคาม, หน้า 282-289.
- [7] บัณฑิต จริโมภาส. 2549. เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุ ผลไม้. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น.
- [8] Chen. and Z. sun. 1981. Impact Parameters Related to Bruise Injury in Apples. ASAE. Paper No. 81-3041.

การศึกษาความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลของวัสดุกันกระแทกจากกระดาษฟางข้าว  
A Study on Performance of Cushioning Material from Rice Straw Paper for Protection of Apple Fruits

เทวรัตน์ ตรีอำรรค<sup>1\*</sup> ธนากร แนวกกลาง<sup>1</sup> พยงค์ ลบแจ้ง<sup>1</sup> วรณวิษา ไยงเหลือม<sup>1</sup> และ กระวี ตรีอำรรค<sup>2</sup>  
TawaratTreeamruk<sup>1</sup>, Thanakon Nawglang<sup>1</sup>, Payong Lobchaeng<sup>1</sup>, Wanwisa Yai-ngooluam<sup>1</sup> and Krawee Treeamruk<sup>2</sup>

#### Abstract

The objective of this research was to evaluate the performance of rice straw paper as cushioning material for protects the apple fruits from the impact force by drop test method. The 5 types of apple fruit protection was used to test in this study, non-protection, wrap with foam-net, wrap with cushioning material from rice straw paper thickness of 2, 4 and 6 mm. The paper was cut to size of 8x24 cm. Fuji apple fruits count number 100 were use in this study. Drop tests at three height levels of 25, 50 and 75 cm. were used in the experiment. The relationship of bruise volume and impact energy was evaluated. The results indicated that the bruise volume decreased when increasing the paper thickness at all energy levels. The cushioning material from rice straw paper at a thickness of 4 and 6 mm were better protection of apple fruits than foam-net significantly.

Keywords: apples, cushioning material, rice straw paper

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระแทกของกระดาษฟางข้าวสำหรับปกป้องผลแอปเปิ้ลจากแรงกระแทก ด้วยวิธีการทดสอบแบบตกกระแทกกับผลแอปเปิ้ล 5 แบบคือแบบไม่มีวัสดุห่อหุ้ม, แบบห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟมและแบบห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกทำจากกระดาษฟางข้าวหนา 2, 4 และ 6 มม. ตัดขนาดเท่ากับ 8x24 ซม. นำไปห่อผลแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ (เบอร์ 100) ทดสอบการตกกระแทกที่ระดับความสูง 3 ระดับคือ 25, 50 และ 75 ซม. ประเมินผลหาความสัมพันธ์ของปริมาตรรอยช้ำกับพลังงานกระแทก ผลการทดสอบปรากฏว่าวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าวที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีปริมาตรรอยช้ำลดลงที่ทุกระดับพลังงานโดยกระดาษฟางข้าวที่มีความหนา 4 และ 6 มม. สามารถป้องกันความช้ำที่จะเกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีกว่าตาข่ายโฟมกันกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: แอปเปิ้ล, วัสดุกันกระแทก, กระดาษฟางข้าว

#### บทนำ

ผลิตผลทางการเกษตรต้องการการปกป้องจากความเสียหายเชิงกลอันเนื่องมาจากการตกกระทบ (impact) การสั่นสะเทือน (vibration) และการกดทับ (compression) ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกี่ยว การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวและการขนส่ง โดยผลิตผลแต่ละชนิดจะมีความไวต่อความเสียหายนี้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะตามธรรมชาติ ผลิตผลทางการเกษตรหลายชนิดไม่มีเปลือกหนาจึงก่อให้เกิดความเสียหายเชิงกลได้มากกว่า เช่น มะละกอ ส้มเขียวหวาน ชมพู และแอปเปิ้ล เป็นต้น สำหรับแอปเปิ้ลเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีผลผลิตจำหน่ายตลอดทั้งปี จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเกษตรสำหรับทดสอบความเสียหายเชิงกลหรือวัสดุกันกระแทกที่พัฒนาขึ้นมา (ศุภกิตต์, 2550) ในปัจจุบันวัสดุที่นิยมใช้ในการปกป้องผลิตผลทางการเกษตรคือตาข่ายโฟม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา รับประทานการกระแทกได้ดี แต่เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงได้มีการรณรงค์ให้ลดใช้พลาสติกและโฟมซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติ แล้วหันมาใช้วัสดุจากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีวัสดุเหลือใช้ในระบบการผลิตค่อนข้างมาก โดยเฉพาะข้าวจะมีฟางข้าวเหลือทิ้งไว้เป็นจำนวนมากโดยในแต่ละปีประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 61 ล้านไร่ มีส่วนที่เป็นฟางข้าวรวมต่อซึ่งเหลืออยู่ประมาณ 40 ล้านตัน (วีระศักดิ์, 2541) ฟางข้าวนี้ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ทันก่อนฤดูกาลเพาะปลูกใหม่ เกษตรกรส่วนใหญ่จึงนิยมกำจัดฟางข้าวด้วยการเผา

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

<sup>1</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of technology, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of technology, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

\*Corresponding author: tawarat@sut.ac.th

ทำลาย เนื่องจากฟางข้าวนี้เป็นอุปสรรคในการเตรียมแปลงเพาะปลูก โดยเฉพาะ ในฤดูฝนที่ชาวนาไม่สามารถเผาทำลาย ฟางข้าวได้ ฟางข้าวในแปลงจะติดสะสมกับใบผานไถขณะไถเตรียมแปลงเนื่องจากผานไม่สามารถตัดสับฟางข้าวได้ การเผา ทำลายฟางข้าวก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดิน จากเหตุผลดังกล่าว ปัจจุบันจึงได้มีการณรงค์ ไม่ให้เผาฟางข้าว เนื่องจากฟางข้าวมีประโยชน์ในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่ดินได้เมื่อย่อยสลาย และสามารถใช้เป็นวัสดุคลุม ดินหรือใช้รักษาความชื้นในการเพาะเห็ดได้ดี นอกจากนี้ประโยชน์ที่สำคัญประการหนึ่งของฟางข้าวคือการมีคุณสมบัติเป็นฟิซ เส้นใย (fiber) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เช่น การทำกระดาษหัตถกรรม หรือกระดาษฟางข้าว โดย ชัยพรและรังสิณี (2550) ได้ ศึกษากระบวนการผลิตกระดาษฟางข้าวเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบเอกที่ฟโดยการผสมถ่านกัมมันต์แล้ววัดความสามารถใน การดูดซับเอทีเอ็นเพื่อเป็นแนวทางในการใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระแทกเพื่อปกป้องผลผลิตทางการเกษตร งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบเพื่อหา ความสามารถในการปกป้องผลผลิตทางการเกษตรโดยใช้แอปเปิ้ลเป็นวัสดุในการทดลอง

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 1. การเตรียมกระดาษฟางข้าว

นำฟางข้าวจากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาทำการย่อยด้วยเครื่องสับลดขนาดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 3 มม. จากนั้นนำฟางข้าวที่เตรียมได้จำนวน 200 กรัม ลงต้มในหม้อต้มเยื่อที่บรรจุสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร (ธนพรธณ และคณะ, 2545) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างเยื่อด้วยน้ำสะอาด แล้วทำการเกลี่ยเยื่อบนตะแกรง ขนาด 40x 60 ซม. จากนั้นนำไปตากแดดเมื่อแห้งจะได้กระดาษฟางข้าวที่มีความหนา 2 มม. สำหรับกระดาษฟางข้าวที่มีความ หนา 4 และ 6 มม. ทำการเตรียมเช่นเดียวกันแต่เพิ่มปริมาณฟางสับเป็น 300 และ 400 กรัม ตามลำดับ นำกระดาษที่ได้มาตัด เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 8x24 ซม. แล้วกรัดเป็นริ้วตามลักษณะดังแสดงใน Figure 1.



Figure 1 Pieces of rice straw paper (1) 6 mm thickness (2) 4 mm thickness (3) 2 mm thickness

#### 2. การทดสอบการปกป้องผลแอปเปิ้ล

การทดลองครั้งนี้ใช้ผลแอปเปิ้ลสดพันธุ์ฟูจิเบอร์ 100 จากตลาดสุรนคร จังหวัดนครราชสีมา โดยเบื้องต้นทำการ คัดเลือกผลแอปเปิ้ลที่ไม่มีรอยตำหนิ รอยขีด จำนวน 225 ผล ทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_{max}$ ,  $D_{min}$ ) และ ความสูง จากนั้นการแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มดังนี้ 1) ผลแอปเปิ้ลเปล่า 2) ผลแอปเปิ้ลหุ้มด้วยตาข่ายโฟม 3) ผลแอปเปิ้ลหุ้มด้วย กระดาษฟางข้าวหนา 2 มม. 4) ผลแอปเปิ้ลหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 4 มม. 5) ผลแอปเปิ้ลหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวหนา 6 มม. จำนวนกลุ่มละ 45 ผลเพื่อใช้ทดสอบการตกกระแทก (drop test) ที่ระดับความสูง 25, 50 และ 75 ซม. โดยใช้แอปเปิ้ล จำนวน 15 ผลในแต่ละระดับความสูง หลังทดสอบทั้งผลแอปเปิ้ลไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้เกิดรอยขีดที่ชัดเจน

การประเมินความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลจะดูจากปริมาณรอยขีดที่เกิดขึ้นโดยจากการสังเกตพบว่า ลักษณะการขีดมีลักษณะดังแสดงใน Figure 2 จึงใช้การประเมินปริมาณรอยขีดแบบ full depth (Sattveit, 1984) ดังแสดงใน สมการ (1)

$$BV = \frac{\pi d}{24} (3w_1 w_2 + 4d^2) \quad \dots\dots(1)$$

โดยที่ BV คือปริมาตรรอยขีด (มม.<sup>3</sup>), d คือความลึกรอยขีด (มม.),  $w_1$  คือความกว้างรอยขีดตามแกนหลัก (มม.),  $w_2$  คือความกว้างรอยขีดขวางแกนรอง (มม.)



สำหรับพลังงานตกกระทบหาได้จากมวลของผลแอปเปิ้ล และระยะความสูงดังแสดงในสมการ (2)

$$E = mgh \dots\dots(2)$$

โดยที่ E คือพลังงานตกกระทบ (จูล), m คือมวลของผลแอปเปิ้ล (กก.), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที<sup>2</sup>), h คือระยะความสูงที่ผลแอปเปิ้ลตก (เมตร)

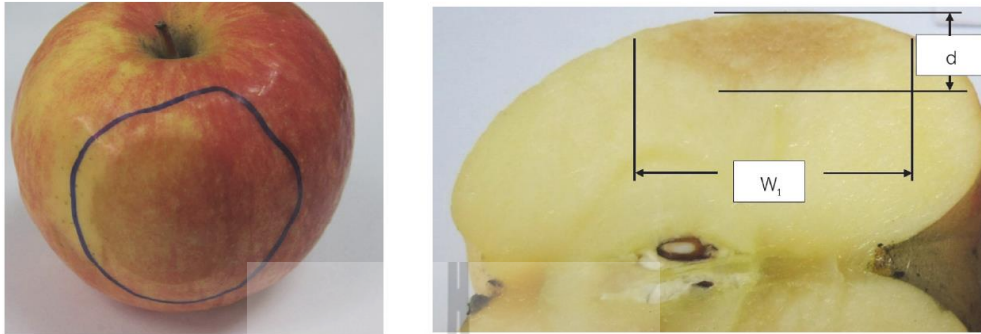


Figure 2 Bruise on apple fruit and dimension of measure.

**ผลและวิจารณ์**

ผลจากการทดสอบพบว่าปริมาณรอยช้ำที่เกิดขึ้นจากการตกกระทบของผลแอปเปิ้ลขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งค่าพลังงานในการตกกระทบจะขึ้นอยู่กับความสูงและน้ำหนักของผลแอปเปิ้ล ซึ่งจาก Figure 3 พบว่าปริมาณรอยช้ำของผลแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ห่อหุ้มวัสดุกันกระแทกมีปริมาณรอยช้ำมากกว่าผลแอปเปิ้ลที่ได้รับการปกป้อง เมื่อพิจารณาที่วัสดุกันกระแทกจะพบว่ากระดาษฟางข้าวที่ความหนา 2 มม. สามารถลดปริมาณรอยช้ำของผลแอปเปิ้ลได้ที่ระดับความสูง 25 ซม. และ 50 ซม. แต่ที่ความสูง 75 ซม. จะมีปริมาณรอยช้ำสูงกว่าผลแอปเปิ้ลเปล่าที่ไม่ได้ห่อหุ้มทั้งนี้อาจเกิดจากการในการทดสอบผลแอปเปิ้ลที่ได้มีน้ำหนักที่มากกว่าทำให้มีค่าพลังงานกระแทกที่สูงกว่า (Figure 4)

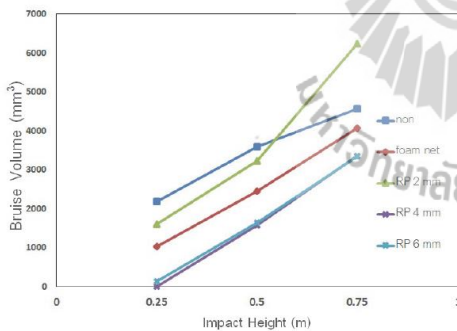


Figure 3 Relationship between impact height and bruise volume.

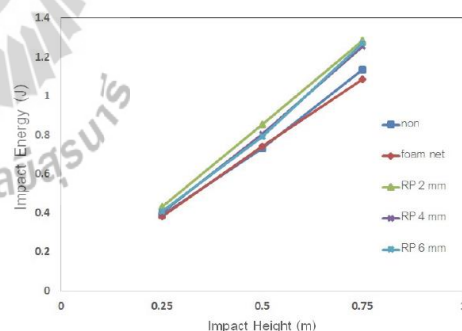


Figure 4 Relationship between impact height and impact energy.

เมื่อพิจารณาปริมาณรอยช้ำที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษฟางข้าวที่ความหนา 4 และ 6 มม. พบว่าที่ระดับความสูง 25 ซม. นั้นกระดาษฟางข้าวที่ความหนานี้สามารถปกป้องผลแอปเปิ้ลไม่ให้เกิดความช้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และเห็นความแตกต่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผลแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ห่อหุ้มวัสดุกันกระแทกและห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม และเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้นกระดาษฟางข้าวที่ความหนา 4 และ 6 มม. ก็ช่วยลดรอยช้ำที่เกิดขึ้นกับผลแอปเปิ้ลได้ดีกว่าการห่อหุ้มด้วยตาข่ายโฟม ซึ่งลักษณะของการกระแทกที่เกิดขึ้นจริงนั้นมักจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการคัดแยก การบรรจุหรือการขายปลีกที่ใช้คนปฏิบัติงาน แต่ในระหว่างการขนส่งรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีสาเหตุมาจากการกดทับและการสั่นสะเทือนมากกว่า

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณรอยช้ำที่เกิดขึ้นถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มอย่างชัดเจนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งจะเห็นว่าการใช้กระดาษฟางข้าวที่ความหนา 4 มม. หรือ

6 มม. ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตั้งนั้นเพื่อความเหมาะสมด้านการจัดการกระดาดฟางข้าวที่ความหนา 4 มม. จึงมีความเหมาะสมกว่าที่จะเลือกใช้

Table 1 Mean of bruise volume by drop test

Cushioning Material	non	Foam net	RP 2 mm	RP 4 mm	RP 6 mm
Mean of bruise volume (mm <sup>3</sup> )*	3451.21 <sup>a</sup>	2516.34 <sup>b</sup>	3688.04 <sup>a</sup>	1646.26 <sup>c</sup>	1705.02 <sup>c</sup>

\* Values followed by the same letter in row are not significantly different (Duncan, P<0.05)

### สรุป

ค่าปริมาตรรอยขีดของผลแอปเปิ้ลมีความสัมพันธ์กับระดับพลังงานที่ตกกระทบบนผิวแอปเปิ้ลโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น วัสดุกันกระแทกที่ทำจากกระดาดฟางข้าวความหนา 4 และ 6 มม. สามารถใช้ปกป้องผลแอปเปิ้ลได้โดยเฉพาะที่ระดับพลังงานต่ำ (ตกไม่เกิน 25 ซม.) ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลได้ดีกว่าตาข่ายไหมอย่างมีนัยสำคัญจึงสามารถใช้ทดแทนได้

### คำขอบคุณ

ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนและสถานที่ในการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- ชัยพร สามพุ่มพวง และรังสิณี ไตรวิทย์. 2550. กระบวนการผลิตกระดาดฟางข้าวเพื่อดูดซับเชื้อที่ดิน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 38(5พิเศษ): 283-286.
- ธนพรรณ นุณยรัตกดิน, ทรงศิริ วิจิราภรณ์ และอุดม พลเยี่ยม. 2545. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาดฟางข้าว รายงานฉบับสมบูรณ์. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตสุโขทัย. 108 หน้า
- วีระศักดิ์ ศรีอ่อน. 2541. การทำกระดาดฟางข้าว (รายงาน). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.namoon.go.th/knamoon/pdf/rice-straw.pdf>. (29 กรกฎาคม 2554).
- ศุภกิตต์ สายสุนทร. 2550. วิธีการทดสอบเพื่อประเมินความซ้ำของแอปเปิ้ลจากการกระแทกและเปรียบเทียบวัสดุกันขีด. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก สาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 112 หน้า.
- Saltveit, M.E. 1984. Effects of temperature on firmness and bruising of 'Starkrimson Delicious' and Golden Delicious' apples. HortScience 19: 550-551.

## ประวัตินักวิจัย

### 1. ชื่อ

(ภาษาไทย) นางเทวรัตน์ ตรีอำรรค  
(ภาษาอังกฤษ) Ms. Tawarat Treeamnuk

### 2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

### 3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 300000  
โทร. 044-224583  
E-mail: [tawarat@sut.ac.th](mailto:tawarat@sut.ac.th)

### 4. ประวัติการศึกษา

วศ.บ (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542  
วศ.ม (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545  
วศ.ด (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551

### 5. ผลงานวิชาการ / ผลงานวิจัย

- 1.บัณฑิต จริโมภาส, ชัยพร ทองปัญญา, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, นฤมล บุญกระจ่าง และ มาลัย ไกรทอง. 2543. การศึกษาการขุดตัวของส้มเขียวหวานในบรรจุภัณฑ์ขายส่งระหว่างการขนส่งทางบก. วารสารวิชาการ เกษตร, ปีที่ 18 (2), หน้า 137-147.
- 2.สมยศ เจริญอักษร และ เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2546. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบเพิ่มความร้อน. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 367-374.
- 3.บัณฑิต จริโมภาส และ เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2547. ภาชนะสูญญากาศสำหรับการทดสอบบรยรั้วของบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว. 2547. บทความวิจัย เสนอในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 1 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม วันที่ 7-9 ธันวาคม.



- 4.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2548. การอบแห้งพริกด้วยระบบลมร้อนและไมโครเวฟ. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2548 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 113-114.
- 5.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2549. การอบสมุนไพรด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 112.
- 6.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2550. การอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารวิชาการเกษตร. ปีที่ 25 (1), หน้า 46-57.
- 7.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, สมยศ เชิญอักษร, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, อนุพันธ์ เทิดวงศักรกุล และเชาว์ อินประสิทธิ์. 2550. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 13 (1), หน้า 23-29.
- 8.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2551. ความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งของไพล. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2551 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 86.
- 9.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2551. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ: การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. ปีที่ 39 ฉบับที่ 3 (พิเศษ), หน้า 164-167.
- 10.ธนัช मुखันท์, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, พรธมา ลิบลับ และวีรชัย อาจหาญ. 2552. การอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งหมุนแบบกะ. รายงานการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6., หน้า 582-588.
- 11.ปัทมา แก้วธรรม วันพิทักษ์ คงสนุ่น กระวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2554. การอบแห้งสับปะรดแช่หิมด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน-ไมโครเวฟ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 42, ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 493-496.
- 12.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, เกียรติศักดิ์ ใจโต, ธรรมรัตน์ ขาวสำอางค์, กระวี ตรีอำนาจ. 2554. เครื่องแยกเกล็ดจาก ข้าวกล้องซ้อมมือแบบประหยัด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 517-520.
- 13.ศักยะ สมบัติไพรวัน เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และกระวี ตรีอำนาจ. 2555. การศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 43, ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 355-358.
- 14.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล ปริศนา แสงรุ่ง และปัตตะนี สุตตะนา. 2555. สมบัติทางกายภาพและความร้อนของข้าว ขาวดอกมะลิ 105. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, 4-5 เมษายน 2555 ณ จังหวัดเชียงใหม่. หน้า 526-531.

15. ศักยะ สมบัติไพรวาน เทวรัตน์ ตรีอำนาจ กระจวี ตรีอำนาจ. 2555. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระยะการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการเก็บเกี่ยว. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 18 (1) หน้า 52-58.
16. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ เกียรติศักดิ์ ใจโต วีรชัย อางหาญ และกระจวี ตรีอำนาจ. 2555. การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 43, ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 135-138.
17. เกียรติศักดิ์ ใจโต, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, กระจวี ตรีอำนาจ. เครื่องรีดและกรีดผักตบชวา. 2556. น. 56. ใน รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14. โรงแรมหัวหินแกรนด์แอนด์พลาซ่า, ประจวบคีรีขันธ์.
18. นาฏชนก ปรางปรู, วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และเกียรติศักดิ์ ใจโต. 2556. การทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, น. 74. ใน รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14. โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า, ประจวบคีรีขันธ์.
19. เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, ภัทรา จิตกุล, วุฒิชนา สิงห์คง. 2556 การศึกษาการอบแห้งไอ้ก้าวกุ้งตากแห้งสำเร็จรูปด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง. 2556. น. 96. ใน รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14. โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์พลาซ่า, ประจวบคีรีขันธ์.
20. วิเชียร ดวงสีเสน เทวรัตน์ ตรีอำนาจ นัยวัฒน์ สุขทั้ง วีรชัย อางหาญ. 2556. การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 19 (1), หน้า 7-13.
21. กระจวี ตรีอำนาจ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. 2556. การพัฒนาและทดสอบเครื่องรีดและกรีดเส้นผักตบชวาสำหรับงานหัตถกรรม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 19 (1), หน้า 25-30.
22. กระจวี ตรีอำนาจ สถาพร แต่งดี วรุฒ เนตรสว่าง และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. 2557. การทดสอบและประเมินผลเครื่องคว้านลำไยกิ่งอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 45:3/1 (พิเศษ) : 317-320.
23. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ ชนากร แนวกลาง พยงค์ לבแจ้ง วรรณวิษา ไยงูเหลือม และ กระจวี ตรีอำนาจ. 2557. การศึกษาความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลของวัสดุกันกระแทกจากกระดากฟางข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 45:3/1 (พิเศษ) : 369-372.
24. เกียรติศักดิ์ ใจโต, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, นาฏชนก ปรางปรู, เบญจวรรณ วานมนตรี และกระจวี ตรีอำนาจ. 2557. ผลกระทบของค่าความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะพร้าวชูด, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

- ระดับชาติ ครั้งที่ 15, หน้า 557-561, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2-4 เมษายน 2557, ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จ. พระนครศรีอยุธยา.
25. เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตริอำนาจ, เกียรติศักดิ์ ใจโต และ นาฎชนก ปรางปรู. 2557. อิทธิพลของสภาวะไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของไข่เป็ด, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15, หน้า 573-578, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2-4 เมษายน 2557, ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จ. พระนครศรีอยุธยา.
26. จีรศักดิ์ ปาประกอบ, นัยวัฒน์ สุขทั้ง, เทวรัตน์ ตริอำนาจ และวีรชัย อาจหาญ. 2558. การอบแห้งมันเส้นสะอาดด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 29, 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา.
27. Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnaksorn. 2006. Thai aroma herb drying with microwave assisted heat pump dryer. Proceedings of the 13th Tri-University International Joint Seminar & Symposium 2006, Oct. 29-Nov. 2. Mie University, Japan. Pp. 278-281.
28. Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnaksorn. 2007. Performance Study of Heat pump-Microwave Combination Dryer. Proceeding of International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology, 21-24 January, Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kean, Thailand. Page 35.
29. Nartchanok PRANGPRU, Tawarat TREEAMNUK, Kaittisak JAITO and Benjawan VANMONTREE. 2014. Comparing the Efficiency of Carrier Type on Drum Drying of Tamarind Juice, in 7th International Conference on Agricultural Engineering, 2nd – 4th April 2014, Krungsri river Hotel Pranakhornsriayothanya, 114-120.
30. Nartchanok Prangpru, Tawarat Treeamnu, Kaittisak Jaito, Benjawan Vanmontree, Krawee Treeamnu. 2015. Comparing the Efficiency of Two Carrier Types on Drum Drying of Tamarind Juice. Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 21 (1): 1-6.