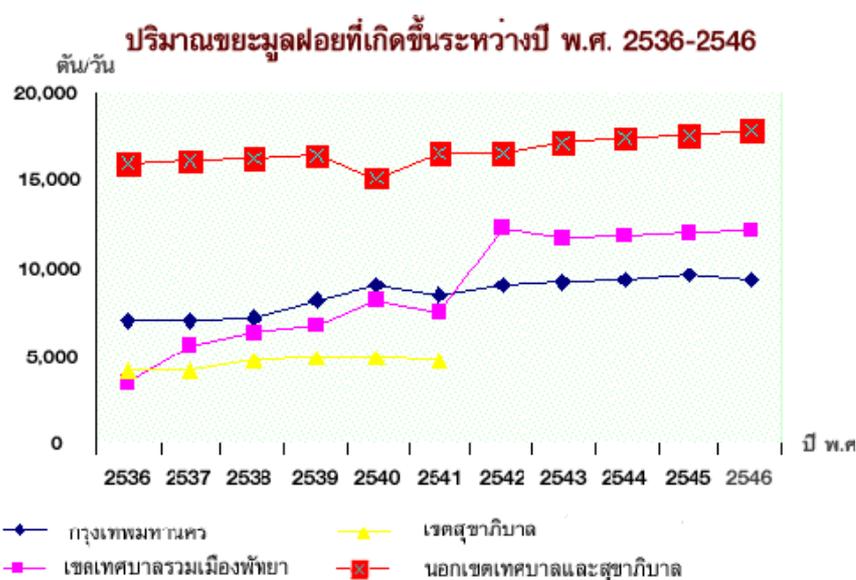


วิธีการทดสอบเพื่อประเมินความซ้ำของแอปเปิ้ลจากการกระแทก และเปรียบเทียบวัสดุกันซ้ำ

Test Method to Evaluate Bruising During Impacts to Apples and Compare Cushioning Materials

คำนำ

ในปัจจุบันถ้าเราเดินตามตลาดสด หรือซูเปอร์มาเก็ตเพื่อหาซื้อผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล, แดงโม, สับประรด ฯลฯ มักพบว่า ผลไม้เหล่านั้นมีการห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลีเอทิลีนหรือแผ่นฟองอากาศพลาสติกกันกระแทก สาเหตุที่ต้องห่อหุ้มเพื่อป้องกันไม่ให้ผลไม้ช้ำ เนื่องจากแรงกระทำภายนอก แต่ตาข่ายโพลีเอทิลีน และแผ่นฟองอากาศพลาสติกกันกระแทกไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดขยะและมลพิษ กรมควบคุมมลพิษ (2548) รายงานถึงปริมาณของขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536-2546 (ภาพที่ 1) และสถานการณ์ของปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะว่าทุกวันนี้คนไทยกว่า 60 ล้านคนสามารถสร้างขยะได้มากถึง 14 ล้านตันต่อปี แต่ความสามารถในการจัดเก็บขยะกลับมีไม่ถึง 70 % ของขยะที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดปริมาณมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ



ภาพที่ 1 ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยระหว่างปี 2536-2546

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

ตารางที่ 1 ระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ

ชนิดของขยะ	ระยะเวลาย่อยสลาย
เศษกระดาษ	2-5 เดือน
เปลือกส้ม	6 เดือน
ถ้วยกระดาษเคลือบ	5 ปี
ก้นกรองบุนหรี	12 ปี
รองเท้าหนัง	25-40 ปี
กระป๋องอลูมิเนียม	80-100 ปี
ถุงพลาสติก	450 ปี
โฟม	ไม่ย่อยสลายควรหลีกเลี่ยงการใช้

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ ซึ่งพบว่า ถุงพลาสติกต้องใช้เวลาในการย่อยสลายถึง 450 ปี ในขณะที่โฟมไม่ย่อยสลายเลย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) ได้ให้แนวคิดในการช่วยลดขยะตามหลัก 7R คือ

REFUSE การปฏิเสธหรือหลีกเลี่ยงสิ่งของหรือบรรจุภัณฑ์ที่จะสร้างปัญหาขยะรวมทั้งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กล่องโฟม หรือขยะมีพิษอื่น ๆ

REFILL การเลือกใช้น้ำดื่มขวดเติมซึ่งใช้บรรจุภัณฑ์น้อยชิ้นกว่า ขยะก็น้อยกว่าด้วย

RETURN การเลือกใช้น้ำดื่มที่สามารถส่งคืนบรรจุภัณฑ์กลับสู่ผู้ผลิตได้ เช่น ขวดเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ

REPAIR การซ่อมแซมเครื่องใช้ให้สามารถใช้ประโยชน์ได้ต่อไปไม่ให้เกิดเป็นขยะ

REUSE การนำบรรจุภัณฑ์ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เช่น ใช้ถุงผ้าไปซื้อปิ้งแทนถุงก๊อบแก๊บ

RECYCLE การแยกขยะที่ยังใช้ประโยชน์ได้ให้ส่งต่อการจัดเก็บและส่งแปรรูป เช่น
บรรจุภัณฑ์ พลาสติก แก้ว กระจก เครื่องดื่มต่าง ๆ

REDUCE การลดการบริโภคและหาทางเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของสิ่งของเครื่องใช้
ต่าง ๆ

ดังนั้นในกระแสดยุคโลกาภิวัตน์ที่รณรงค์อนุรักษ์ธรรมชาติ จึงได้มีความคิดที่จะนำ วัสดุ
บรรจุภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มาใช้ทดแทน วัสดุ
บรรจุภัณฑ์ที่จะนำมาใช้ทดแทน ต้องมีสมบัติที่ใกล้เคียงกันกับตาข่ายโพลีเอทิลีน คือ ป้องกันความ
เสียหายของผลไม้ได้ดี, สะดวกในการใช้งาน, มีช่องว่างเพื่อให้ผลไม้ได้หายใจ (Respiration) และมี
ราคาไม่แพง ในปัจจุบันเรามีการผลิตวัสดุกระดาษ หมุนเวียนกลับมาใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ใหม่ เช่น
กล่อง, กระดาษสำหรับงานการเขียนและการพิมพ์ การใช้กระดาษฝอยเป็นวัสดุกันกระแทก ใน
บรรจุภัณฑ์ผลไม้สด ประเทศไทยมีวัสดุเกษตรเหลือใช้มากมาย เช่น วัชพืช, กาบกล้วย, ผักตบชวา
และหญ้าแฝก มีการผลิตสินค้า handicraft OTOP จากผักตบชวา, หญ้าแฝก เป็นบรรจุภัณฑ์
เครื่องประดับ (คณะอนุกรรมการส่งเสริมการตลาด ภายใต้คณะกรรมการอำนวยการ หนึ่งตำบล
หนึ่งผลิตภัณฑ์แห่งชาติ, 2549) ออกจำหน่าย บัณฑิต และคณะ (2546) ได้สาธิตการนำเชือกกล้วย
มาทำวัสดุกันช้ำกับแอปเปิ้ลด้วย อย่างไรก็ตามยังไม่มีผู้นำวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ และวัสดุเกษตร
เหลือใช้ไปใช้ทำวัสดุกันช้ำกับผลไม้สด

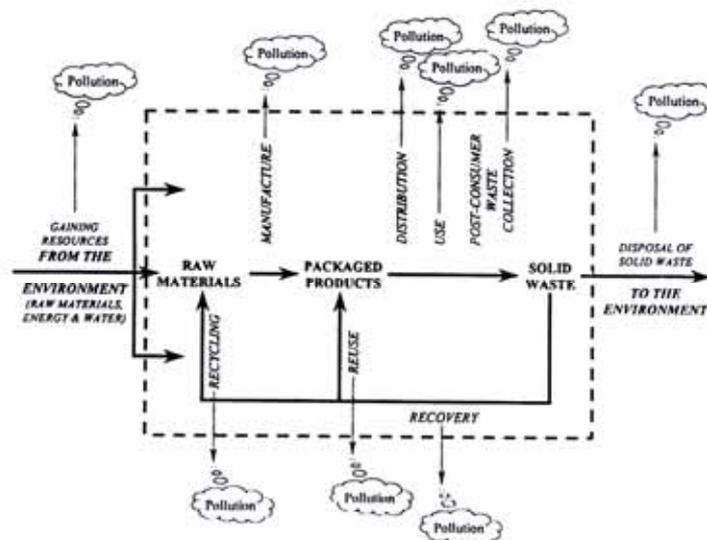
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการปกป้องผลไม้ของเชือกกล้วย, ผักตบชวา และ
กระดาษลูกฟูก เปรียบกับตาข่ายโพลีเอทิลีน
2. เลือกวัสดุที่เหมาะสมมาใช้ทดแทนตาข่ายโพลีเอทิลีน
3. ปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทก Ballistic Pendulum ให้สามารถวัดได้มี
ความละเอียดแม่นยำยิ่งขึ้น

การตรวจเอกสาร

วงจรบรรจุกัณฑ์กับสิ่งแวดล้อม

วงจรของวัสดุบรรจุกัณฑ์ที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม (ภาพที่ 2) เริ่มจากการได้ทรัพยากรจากธรรมชาติ นำทรัพยากรเข้าสู่โรงงานผลิต, กระจายผลผลิตสู่ผู้บริโภค, ผลผลิตถูกใช้และทิ้งกลายเป็นขยะ ส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่, ผลิตใหม่ วงจรดังกล่าวนี้ใช้พลังงาน, น้ำ และวัตถุดิบ ทุกขั้นตอนการผลิต การกระจายผลผลิต การใช้ และภายหลังการบริโภค ล้วนสร้างมลภาวะให้ สิ่งแวดล้อม (Levy, 2000)



ภาพที่ 2 วงจรวัสดุบรรจุกัณฑ์ที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม

ที่มา: Levy (2000)

ถ้าเป็นไปได้ควรเลือกบรรจุกัณฑ์ที่มาจากธรรมชาติ (ภาพที่ 3) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถทำได้ สิ่งที่เหมาะสมที่สุดคือ ทำอย่างไรที่จะใช้บรรจุกัณฑ์ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดในทุกขั้นตอนของวงจรบรรจุกัณฑ์



ภาพที่ 3 บรรจุภัณฑ์ธรรมชาติ

ที่มา: Levy (2000)

วัสดุบรรจุภัณฑ์ทดแทนพลาสติก

มลพิษที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม มีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน ขยะจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกก็เป็นสาเหตุหนึ่ง เนื่องจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกนั้นสลายตัวได้ยาก จึงทำให้เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก่อให้เกิดมลภาวะทางดิน ดังนั้นจึงได้มีความพยายามหาแนวทางในการกำจัดพลาสติกเหล่านั้น เป็นต้นว่า

การใช้ปฏิกิริยาทางชีวเคมีทำได้โดยการสังเคราะห์พลาสติกที่มีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และเชื้อราชนิดต่าง ๆ

การใช้แสงแดด โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อแสงอุลตราไวโอเล็ตเข้าไปในห่วงโซ่โพลิเมอร์ เมื่อพลาสติกโดนแสงจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ผลก็คือ พลาสติกจะเสื่อมและแตกหักง่าย

การใช้ความร้อน วิธีนี้ใช้กำจัดพลาสติกที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ในที่สุดจะได้คาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และสารที่เป็นพิษบางส่วน

การนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ที่ใช้แล้วนำกลับมา ทำความสะอาดตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดเพื่อทำเป็นพลาสติกอัดเม็ด จากนั้นนำไปผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่ เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้ไม่สามารถใช้บรรจุอาหารได้ เพราะมีความสะอาดไม่เพียงพอ

จะเห็นได้ว่ามีการพัฒนาเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหามลพิษที่เกิดจากพลาสติกไว้หลายแนวทาง แต่วิธีการในการกำจัดพลาสติกดังกล่าวไม่ได้เป็นวิธีการในการลดปัญหามลพิษจากพลาสติกได้ทั้งหมดทางออกที่ดี คือ การร่วมมือกันลดการผลิตและการใช้พลาสติก โดยหาวัสดุอื่นมาใช้ทดแทนพลาสติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่จะนำมาใช้ทดแทนพลาสติก ในรูปของตาข่ายโฟม 3 ชนิดด้วยกัน คือ ผักตบชวา, เชือกกล้วย และแผ่นกระดาษลูกฟูก

เหตุผลในเบื้องต้นที่ใช้พิจารณาเลือกวัสดุบรรจุภัณฑ์ทดแทนพลาสติก คือ

1. มีราคาถูก และเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย
2. มีศักยภาพในการป้องกันความเสียหายเชิงกลที่จะเกิดขึ้นกับผลไม้ได้
3. มีศักยภาพในการปฏิบัติกับเครื่องจักรได้ง่าย
4. มีรูปแบบ/วิธีการที่สามารถนำไปห่อหุ้มผลไม้

การนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์

ผักตบชวาเป็นวัชพืชซึ่งในประเทศไทย พบเห็นได้ทั่วไปตามห้วย, หนอง และลำคลอง ได้มีการคิดค้นหาวิธีกำจัดผักตบชวาโดยการนำมาใช้ประโยชน์ เช่น นำไปเป็นอาหารสัตว์ ทำกระดาษ ปุ๋ย เครื่องจักรสาน อุปกรณ์เพาะเห็ดฟาง และทดลองนำผักตบชวาไปช่วยในการแก้ปัญหาน้ำเน่าอย่างได้ผล (รุ่งรัตน์, 2520; ชาติชาย, 2544)

นอกจากนี้ ผักตบชวาสามารถใช้ประโยชน์ในรูปของบรรจุภัณฑ์ได้ โดยนำเนื้อเยื่อผักตบชวาเป็นวัสดุหลักผสมกับตัวประสาน โดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมกับเนื้อเยื่อที่ทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุด แล้วจึงนำไปทดสอบความเค้นและความเครียด จากนั้นจึงสร้างแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป (จ๊กกรี และ สุก โสภ, 2539)

การนำเศษเหลือของกล้วยไปใช้ประโยชน์

เศษเหลือจากการใช้ประโยชน์ทางด้านอาหาร เช่น เปลือกกล้วย โดยเฉพาะเปลือกกล้วย นำว่าสุกที่เหลือจากการทำกล้วยตาก/อบ และกล้วยกวน โรงงานแปรรูปจะนำไปตากแห้ง และใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ฟืน (วิชัย, 2541)

เศษเหลืออื่น ๆ ของกล้วย ได้แก่ ใบกล้วยใช้ห่อขนม, หน่อกล้วยใช้ทำพันธุ์, ก้านกล้วยและกาบกล้วย มีการนำไปแยกเป็นเส้นตากแห้ง เรียกว่า เชือกกล้วย โดยเชือกกล้วยยังสามารถนำมาถัก/ร้อย/สานเป็นกระเป๋า ถาด และเสื่อ นอกจากนี้แล้วก้านกล้วย และต้นกล้วยยังนำไปต้มเพื่อทำเป็นเยื่อในการทำกระดาษได้อีกด้วย การใช้ประโยชน์ด้านบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ ใบกล้วย หรือใบตองใช้สำหรับห่ออาหาร ใบตองอ่อนเมื่อนำมารีดแห้งนิยมใช้ห่อกะละแม และมวนบุหรี่ กาบกล้วยหรือลำต้นเทียม ในอดีตเรานิยมนำกาบกล้วย หรือลำต้นเทียม มารีดเป็นรี้ว แล้วรีดน้ำออกนำไปตากแห้ง จะได้เชือกกล้วยที่มีความเหนียวสูงมาก สามารถนำมาใช้ถักกระเป๋า และงานหัตถกรรมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาทำโครงของพวงหรีด หรือพวงมาลัยได้อีกด้วย ปัจจุบันได้มีการสกัดเนื้อเยื่อจากกาบกล้วยมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ (งามทิพย์, 2541)

การนำกระดาษลูกฟูกไปใช้ประโยชน์

แผ่นกระดาษลูกฟูกเป็นวัสดุคิบัติที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับการผลิตเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งเรียกว่ากล่องกระดาษลูกฟูก ทั้งนี้เนื่องจากมีสมบัติที่ดีเด่นหลายประการ อาทิ ใช้บรรจุสินค้าได้แทบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ให้ความสะดวกในการเก็บรักษา จัดจำหน่ายและขนส่ง สามารถออกแบบให้มีความแข็งแรง และรูปทรงแตกต่างตามต้องการ กล่องที่ใช้แล้วสามารถนำกลับสู่กระบวนการผลิตใหม่ได้ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2545)

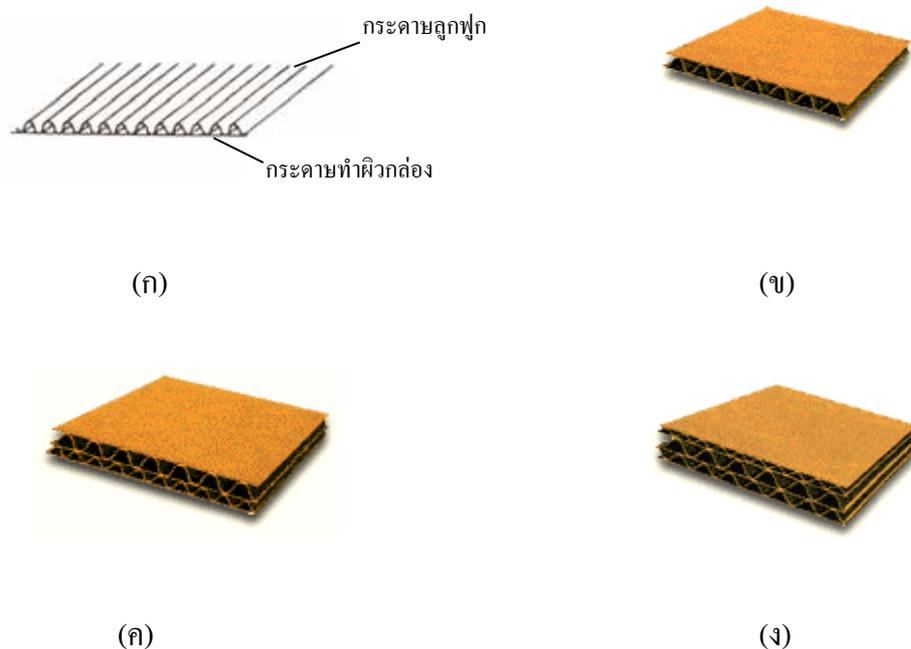
แผ่นกระดาดลูกฟูกสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้าง ดังนี้

1. แผ่นกระดาดลูกฟูกหน้าเดียว (Single - face board) ประกอบด้วยกระดาดทำผิวกล่องหนึ่งแผ่น ติดกับกระดาดลูกฟูกอีกหนึ่งแผ่น (ภาพที่ 4ก.) กระดาดชนิดนี้ไม่สามารถนำไปทำเป็นกล่องเพื่อการขนส่ง แต่นิยมใช้ห่อสินค้า หรือทำเป็นแผ่นรองภายในกล่อง เพื่อเป็นวัสดุกันกระแทก

2. แผ่นกระดาดลูกฟูกหนึ่งผนัง (Single wall, Double face board) ประกอบด้วยแผ่นกระดาดลูกฟูกหนึ่งแผ่น ทากาวแล้วปิดทับด้วยกระดาดทำผิวกล่องทั้งสองด้าน รวมเป็นกระดาดสามชั้น (ภาพที่ 4ข.) ด้วยเหตุนี้ในทางการค้า จึงมักเรียกกระดาดประเภทนี้ว่า แผ่นกระดาดลูกฟูกสามชั้น นิยมนำไปทำกล่องมากที่สุดมีการใช้มากถึงร้อยละ 70 ของปริมาณกล่องทั้งหมด

3. แผ่นกระดาดลูกฟูกสองผนัง (Double wall board) ประกอบด้วย กระดาดลูกฟูกสองแผ่น และกระดาดทำผิวกล่องสามแผ่น รวมกันเป็นกระดาดห้าชั้น (ภาพที่ 4ค.) มักทำเป็นกล่องขนาดใหญ่ หรือใช้บรรจุสินค้าที่มีน้ำหนักมาก เพื่อการขนส่งในระยะทางไกล เช่น กล่องเพื่อการขนส่ง เป็นต้น

4. แผ่นกระดาดลูกฟูกสามผนัง (Triple wall board) ประกอบด้วย กระดาดลูกฟูกสามแผ่น และกระดาดทำผิวกล่องสี่แผ่น รวมกันเป็นกระดาดเจ็ดชั้น (ภาพที่ 4ง.) ในทางการค้าจะเรียกกระดาดประเภทนี้ว่า แผ่นกระดาดลูกฟูกเจ็ดชั้น มีการใช้ไม่กว้างขวางเท่าใดนัก มักใช้กับการบรรจุสินค้าที่มีมวลใหญ่ ๆ เพื่อการขนส่งในระยะทางไกล

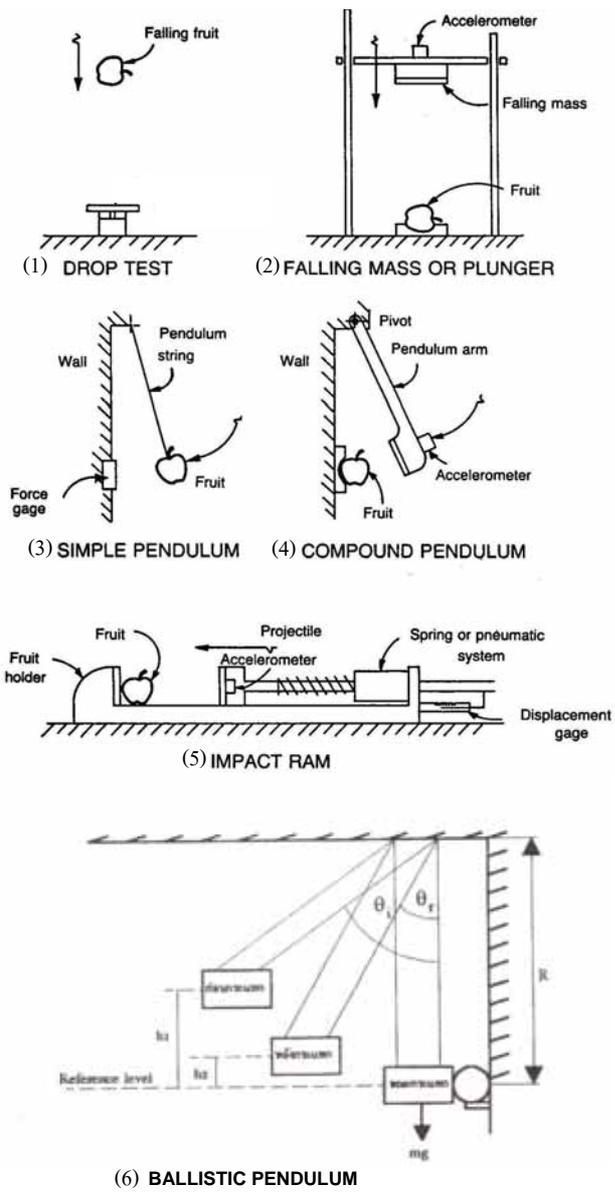


ภาพที่ 4 แผ่นกระดาษลูกฟูก

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2545)

การกระแทกและความชื้น

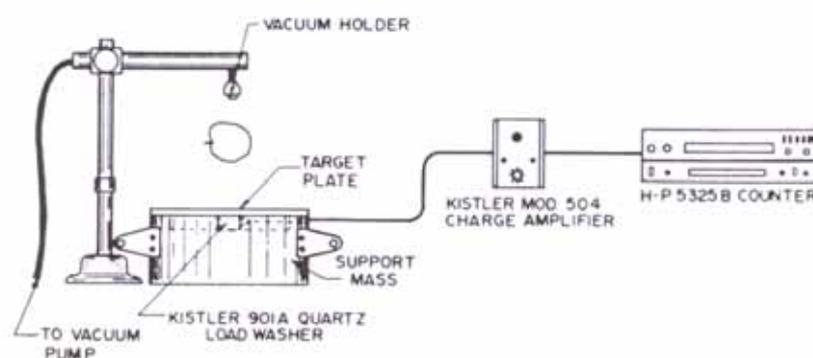
ปกติผักผลไม้จะถูกภาระการกระแทกกระทำระหว่างการจัดการหลังเก็บเกี่ยว การขนส่ง การกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภค Srivastava et al. (1993) รายงานว่า สิ่งแรก และสิ่งที่สำคัญที่สุดในการทำให้เกิดรอยช้ำน้อยที่สุด คือการทำให้เกิดพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) กับผลไม้น้อยที่สุดในทุก ๆ ขั้นตอน ระหว่างปฏิบัติกับเครื่องจักร มีนักวิจัยจำนวนมาก (Mohsenin et al., 1978; Mathew and Hyde, 1997; Bajema and Hyde, 1998; Jindal and Mohsenin, 1976; Holt and Schoorl, 1977) ได้พยายามศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผลไม้เมื่อถูกกระแทก การทดสอบการกระแทกมีหลายวิธีด้วยกัน (Mohsenin, 1986) ดังแสดงในภาพที่ 5 แต่วิธีที่นิยมหลัก ๆ มี 6 วิธี คือ



ภาพที่ 5 การทดสอบการกระแทกแบบต่าง ๆ

ที่มา: Mohsenin (1986) and Jarimopas (1984)

วิธีที่ 1 ได้แก่ Drop Test ทำได้โดยการปล่อยผลไม้ให้ตก (กระแทก) อย่างอิสระในแนวตั้ง ลงสู่พื้นเรียบแข็ง พลังงานกระแทกหาได้จากผลคูณน้ำหนักผลไม้ ความสูงของการปล่อยตก และค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง อย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถวัดหาพลังงานคืนกลับได้ (Mohsenin et al., 1986) การวัดพลังงานกระแทก (Impact Energy) และพลังงานคืนกลับ (Rebound Energy) สามารถวัดค่าได้อย่างละเอียดโดยใช้เครื่องมือในภาพที่ 6 (Diener, 1979)



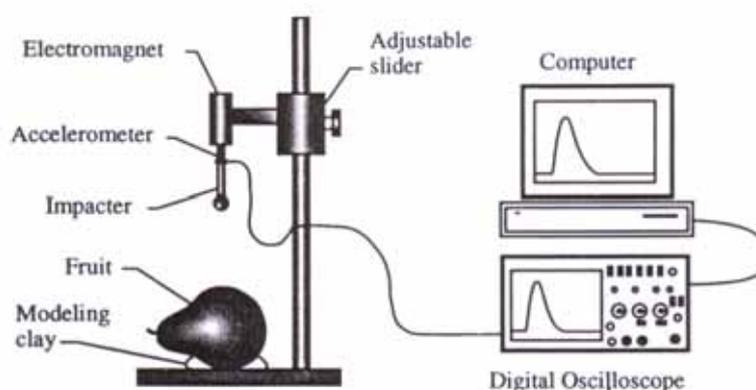
ภาพที่ 6 อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย target plate, load sensor, support mass, charge amplifier and time interval counter

ที่มา: Diener (1979)

การทำงานของเครื่องใช้หลักการวัดเวลาคืนกลับ (Rebound time) ด้วย Electric counter โดยใช้ Time-interval mode ผลไม้ถูกจับและปล่อยโดยหัวจับสุญญากาศ ซึ่งช่วยลดการหมุนในระหว่างการตกอย่างอิสระ กำหนดให้ระยะปล่อยผลไม้คงที่ และตกลง ณ บริเวณที่วาง Load cell ไว้ทุกครั้ง เมื่อผลไม้ถูกปล่อยตก Load cell จะส่งสัญญาณ ให้ตัวจับเวลาเริ่มทำงาน ตัวจับเวลาจะแสดงเวลาคืนกลับเป็นหน่วยมิลลิวินาที Chen et al. (1996) ได้กล่าวถึงข้อจำกัดของวิธีนี้ว่า แรงกระแทกเป็นฟังก์ชันของมวล และรัศมี ความโค้งของผลไม้ ดังนั้นตัวแปรสองตัวนี้จะมีผลต่อความแม่นยำการทดสอบ

วิธีที่ 2 ได้แก่ Falling Mass ทำได้โดยการวางผลไม้อยู่กับที่ แล้วปล่อยให้วัตถุตกลงอย่างอิสระในแนวตั้งสู่ผลไม้ การหาพลังงานจลน์ของผลไม้ อาจทำได้โดยติดอุปกรณ์วัดความเร่ง (Accelerometer) กับตัวกระแทก (Impactor) เมื่อเกิดการกระแทกขึ้น นำค่าสัญญาณความเร่งกับเวลาระหว่างการกระแทกมาพล็อตกราฟ พลังงานจลน์หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Chen et al. (1996)

ได้ใช้เทคนิคนี้ ในการหาค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ของผลไม้ โดยใช้ตัวกระแทก ที่มีน้ำหนักน้อย ~10 กรัม กระแทกใส่ผลแพร์ Conferencia และ Bartlett (ภาพที่ 7) ข้อดีของวิธีนี้คือ การวัด การสัญญาณกระแทกตอบกลับ (Impact acceleration response) เป็นอิสระจากมวล และรัศมีความโค้งของผลไม้ ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ต้องใช้ตัวกระแทกให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งถูกจำกัดโดยมวลของอุปกรณ์วัดความเร่ง และการควบคุมความเร็วในการกระแทกทำได้ยาก

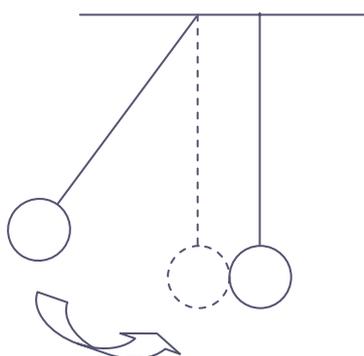


ภาพที่ 7 อุปกรณ์หาค่าความแน่นเนื้อ

ที่มา: Chen et al. (1996)

วิธีที่ 3 ได้แก่ Simple pendulum ทำได้โดยผูกผลไม้ไว้กับเชือก จากนั้นปล่อยให้ผลไม้เคลื่อนที่จากมุมที่กำหนดให้ไปกระแทกเข้ากับพื้นผิวเรียบและแข็ง ลักษณะการเคลื่อนที่ของผลไม้ คล้ายกับการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา Mathew and Hyde (1997) และ Bajema and Hyde (1998) ได้ใช้ Simple Pendulum ในการทดสอบการกระแทกมันฝรั่ง Pang et al. (1992) ได้ประยุกต์หลักการงานนี้ทดสอบการกระแทกอย่างอิสระของแอปเปิ้ลกับผลแอปเปิ้ล โดยใช้แอปเปิ้ลพันธุ์ Granny Smith สองผลแขวนไว้ด้วยกัน แล้วปล่อยให้แอปเปิ้ลสองผลกระแทกกันเองอย่างอิสระ โดยลูกหนึ่งอยู่กับที่ (ภาพที่ 8) พบว่าแอปเปิ้ลลูกหนึ่งมักชำรุดมากกว่าแอปเปิ้ลอีกลูกหนึ่ง บางครั้งแอปเปิ้ลชำเพียงลูกเดียว และยากมากที่แอปเปิ้ลจะชำเท่ากันทั้งสองลูก ซึ่งเขาแนะนำว่า ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจเกิดจากความแปรผันของความแข็งจุดครากของผลไม้ (variation of fruit physical yield strength) ของแอปเปิ้ลในแต่ละผล มากกว่าที่จะเกิดจากค่าความไวของการชำ (Bruise susceptibility) พลังงานกระแทกกับพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง และ ปริมาตรชำของแอปเปิ้ลสองผลมีความสัมพันธ์กับพลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy) แบบเป็น

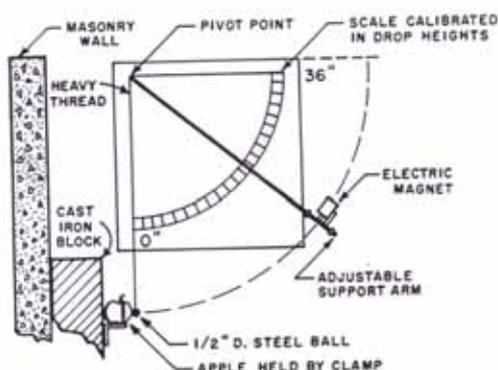
เส้นตรง สอดคล้องกับ บัณฑิต และคณะ (2543) ซึ่งรายงานว่า ปริมาตรซ้ำ เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพลังงานกระแทก และพลังงานดูดกลืน การทดสอบการกระแทกโดยวิธีนี้ มีข้อดีคือ มีการกระแทกเพียงด้านเดียว โดยไม่มีการกระจายแรงไปที่อื่นและการทดสอบวิธีนี้คล้ายการจำลอง การตกหล่นของผลไม้ในระหว่างขั้นตอนการเก็บเกี่ยว แต่มีข้อเสีย คือไม่สามารถกำหนดระดับ พลังงานกระแทกที่แน่นอนได้ เนื่องจากน้ำหนักของผลไม้ที่นำมาทดสอบไม่เท่ากัน



ภาพที่ 8 การซ้ำเสียโดยการกระแทกกันเองของแอปเปิ้ลสองผล

ที่มา: Pang et al. (1992)

วิธีที่ 4 ได้แก่ Compound pendulum ลักษณะตรงกันข้ามกับ Simple pendulum คือ วางผลไม้ อยู่กับที่ ปล่อยวัตถุที่มีลักษณะคล้ายคานแข็งไปกระแทกเข้ากับผลไม้ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุ คล้ายกับการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา Jindal and Mohsenin (1976) และ Mohsenin (1986) ได้เสนอ วิธีการทดสอบ Dynamic hardness test ที่ใช้หลักการของ Simple Pendulum (ภาพที่ 9) ชุดทดสอบ ประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric magnet) และ แขนยึด, สเกลวัดค่าความสูงของลูกตุ้ม, ลูกบอล เหล็ก และเชือกแข็ง (Heavy thread) และแท่นวางผลไม้

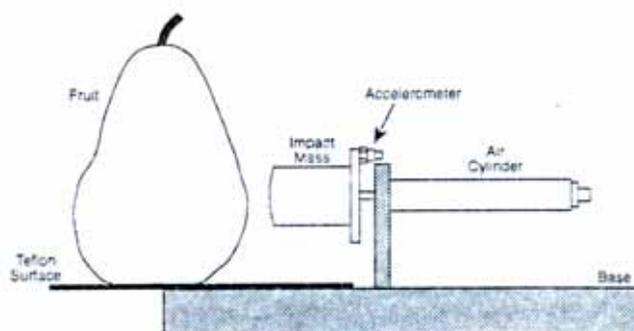


ภาพที่ 9 การทดสอบโดยใช้ Compound Pendulum

ที่มา: Mohsenin (1986)

ใช้ลูกบอลเหล็กขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว เป็นตัวกระแทก (Pendulum) และแม่เหล็กไฟฟ้ายึดลูกบอลเหล็กไว้ จากนั้นปรับองศาการกระแทกตามต้องการ เมื่อพร้อมแล้วตัดสัญญาณที่แม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้ลูกบอลเหล็กกระแทกเข้าสู่ผลไม้ การทดสอบการกระแทกโดยวิธีนี้มีข้อดีคือ บริเวณที่โดนกระแทกมีตำแหน่งที่แน่นอน, กำหนดระดับพลังงานการกระแทกได้อย่างแม่นยำ และการหาค่าพลังงานดูดกลืนทำได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ เป็นการกระแทกสองด้าน ดังนั้นจึงมีการกระจายแรงไปที่อื่นด้วย

วิธีที่ 5 คือ Impact Ram ทำงานโดยวางผลไม้อยู่กับที่ ใช้ Ram จากสปริง หรือนิวแมติกส์ หรือ อิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ กระแทกกับผลไม้ การทดสอบการกระแทกโดยวิธีนี้มีข้อดีคือ สะดวก ในการทดสอบ บริเวณที่โดนกระแทกมีตำแหน่งที่แน่นอน, แต่มีข้อเสียคือ เป็นการกระแทกสองด้าน ดังนั้นจึงมีการกระจายแรงไปที่อื่นด้วย นอกจากนี้แล้ว การกำหนดระดับพลังงานการกระแทกยังต้องนำผลจากความฝืด (Friction) ของชุด Impact Ram มาคำนวณด้วย Delwiche et al. (1996) ได้ใช้หลักการของ Impact Ram ในการหาค่าความแน่นเนื้อของผลแพร์ (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 การทดสอบโดยใช้ Impact ram

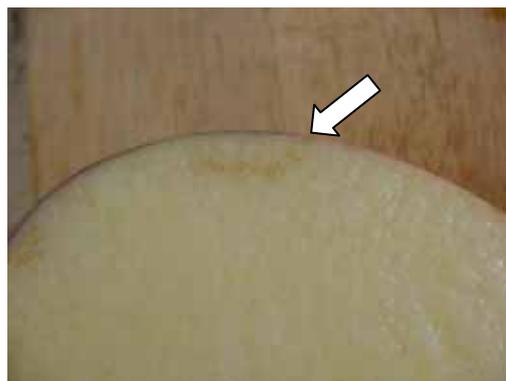
ที่มา: Delwiche et al. (1996)

วิธีที่ 6 คือ Ballistic Pendulum ทำงานโดย ปล่อยลูกตุ้มที่มุมตกกระทบใด ๆ ให้กระแทกเข้ากับผลไม้ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มคล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มนาฬิกา เมื่อลูกตุ้มกระแทกเข้ากับผลไม้แล้ว ลูกตุ้มจะสะท้อนกลับมาด้วยมุมสะท้อนหนึ่งๆ นำค่ามุมตกกระทบ, มุมสะท้อน และรอยช้ำของผลไม้ มาวิเคราะห์ผล หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเนื้อช้ำ (Bruise Volume) กับพลังงานกระแทก (Impact Energy) และพลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy) Jarimopas (1984) ได้ใช้ Ballistic Pendulum ในทดสอบกระแทกผลแอปเปิ้ล โดยใช้ Force transducer ร่วมด้วย ทำให้มีความแม่นยำในการวัดค่าพลังงาน แต่มีข้อเสีย คืออุปกรณ์มีราคาแพง

ความช้ำ (Bruising) หรือการเกิดรอยช้ำ เกิดจากการที่เนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยเซลล์ระเบิดแตกออกไป จนน้ำในเซลล์ไหลออกมา เกิดการออกซิไดเซชันกับอากาศ เห็นเป็นรอยสีน้ำตาล (Jarimopas, 1984) ความเสียหายของผลแอปเปิ้ลส่วนใหญ่จะปรากฏในรูปของการช้ำ (Bollen et al., 1999) การเสียหายจากการช้ำเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียคุณภาพในการจำหน่ายผลแอปเปิ้ลสด และการช้ำส่วนใหญ่เกิดเป็นผลจากการกระแทก (Garcia, 1995)

จุดเริ่มเกิดรอยช้ำ (Bruise Threshold) คือ ความสูงของตัวอย่างทดสอบที่ปล่อยตกลงสู่พื้นผิวแข็งจนตัวอย่างทดสอบนั้นเกิดความเสียหาย (Bajema and Hyde, 1998) หรือ พลังงานกระแทกที่มากเพียงพอที่ทำให้รอยช้ำปรากฏโดยมีความน่าจะเป็น (Probability) หรือความเป็นไปได้ของการเกิดการช้ำเท่ากับ 1 (Schulte et al. 1992) การหาค่าจุดเริ่มเกิดรอยช้ำของกลุ่มตัวอย่างทดสอบทั้งหมด (ไม่ได้หาเฉพาะผลใดผลหนึ่ง) เรียกว่าการหาจุดเริ่มเกิดรอยช้ำแบบ Statistical Threshold ทำโดย

การปล่อยตัวอย่างทดลองจำนวนเท่าๆ ที่หลายๆ ระดับความสูง (เช่น ปล่อยแอปเปิ้ล 10 ผลต่อระดับความสูงที่ทำการทดสอบ, 10 ระดับความสูง) จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการชำรุดที่ทุกๆ ระดับความสูง (Schulte et al., 1992; Mathew and Hyde, 1997) ภาพที่ 11 แสดงลักษณะการเริ่มเกิดรอยชำรุดในผลแอปเปิ้ลเป็นสีน้ำตาลคล้ายใบไถ หงายเข้าหาบริเวณผิวสัมผัส (บัณฑิต, 2549)



ภาพที่ 11 ลักษณะรอยชำรุดของผลแอปเปิ้ล ณ จุดเริ่มเกิดรอยชำรุด

ที่มา: บัณฑิต (2549)

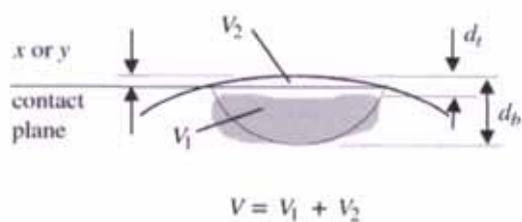
ความชำรุดมักถูกประเมินให้อยู่ในรูปของปริมาตรชำ (Bruise Volume, V_B) (Holt and Schoorl, 1977) Bollen et al. (1999) ได้เปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาตรชำแบบต่างๆ 5 วิธีด้วยกันคือ 1.) Bruise thickness method (ภาพที่ 12ก.), 2.) Full Depth method (ภาพที่ 12ข.), 3.) Enclosed volume method (ภาพที่ 12ค.), 4.) Unbruise volume removed method (ภาพที่ 12ง.) และ Ellipsoid method (ภาพที่ 12จ.) โดยใช้วิธีการทดสอบของ Mohsenin, 1986 ซึ่งเขาได้แนะนำวิธีที่เหมาะสม ดังนี้คือ ที่พลังงานกระแทกที่ระยะปล่อยตกน้อยกว่า 100 มิลลิเมตร วิธี Enclosed volume method มีความเหมาะสมที่สุด และที่พลังงานกระแทกที่ระยะปล่อยตกมากกว่า 100 มิลลิเมตร วิธี Bruise thickness method มีความเหมาะสมที่สุด



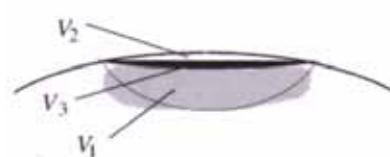
(ก) Bruise thickness method



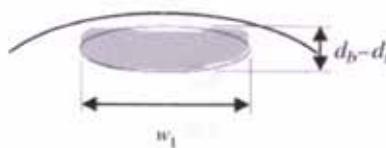
(ข) Full Depth method



(ค) Enclosed volume method



(ง) Unbruise volume removed method



(จ) Ellipsoid method

ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาตรซ้ำ

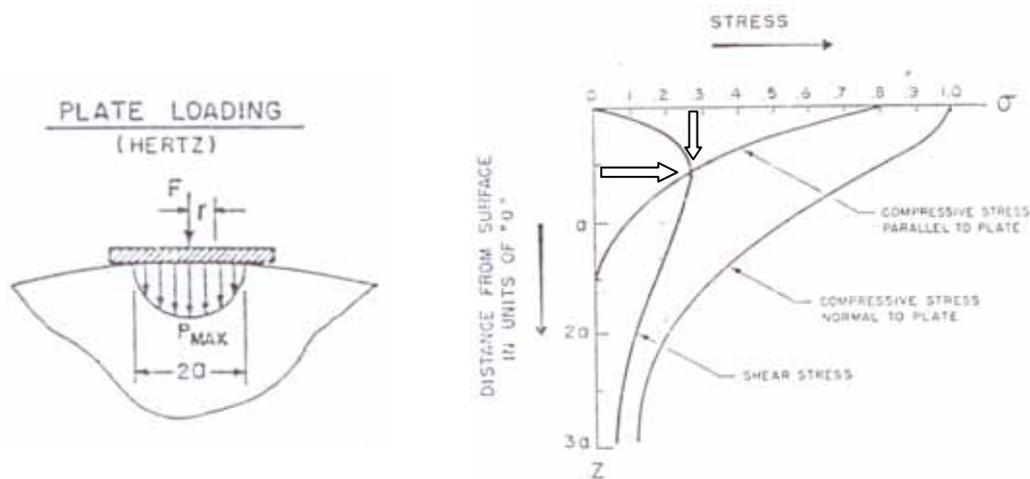
ที่มา: Bollen et al. (1999)

ความเค้นสัมผัส (Contact Stress)

เมื่อวัสดุแข็งที่มีผิวโค้ง สองชิ้นเกิดการสัมผัสกัน จะเกิดจุดสัมผัสขึ้นจุดหนึ่ง ซึ่งจุดที่สัมผัสกันนี้เป็นพื้นที่ที่น้อยมาก ดังนั้นความเค้นจะเกิดสูงสุดที่จุดนี้ แต่ในความเป็นจริงวัสดุไม่ใช่วัสดุแข็ง ดังนั้นในขณะที่วัสดุสัมผัสกันจะเกิดการยุบตัวรอบๆ จุดสัมผัส และเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสขึ้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสนี้เรียกว่า “ความเค้นสัมผัส” ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Hertz, Kosma and Cunningham (1962) ได้เสนอทฤษฎีความเค้นสัมผัสของวัสดุยืดหยุ่น โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

1. วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชิ้น (Homogeneous)
2. แรงที่กระทำเป็นแรงสถิต
3. อยู่ภายใต้กฎของฮุก (Hook's Law)
4. รัศมีความโค้งของวัสดุที่มาสัมผัสกันมีค่ามากกว่ารัศมีของจุดสัมผัสมาก
5. ความเค้นสัมผัสมีค่าเท่ากับศูนย์ ที่ผิววัสดุด้านตรงข้ามของจุดสัมผัส
6. ผิวที่สัมผัสกันเป็นผิวเรียบ

ทฤษฎีนี้ใช้หาพื้นที่ผิวสัมผัส, การยุบตัวของผิวสัมผัส และความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส ภาพที่ 13ก. และ 13ข. เป็นการอธิบายการกระจายความเค้นของวัสดุทรงกลมยืดหยุ่น ลึกลงไปใต้พื้นผิวสัมผัส ภายใต้การกดจากแผ่นเรียบ (Flat plate) โดยความเค้นหลักที่เกิดขึ้น คือความเค้นอัดตัวสูงสุด (Normal Compressive stress) ซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดกึ่งกลางของหน้าสัมผัสที่แรงกระทำ โดยความเค้นหลักนี้จะค่อย ๆ ลดลงตามระยะความลึก (Z) จากผิวสัมผัส และเกิดความเค้นเฉือนสูงสุดที่ระยะประมาณ $0.5a$ ตามความลึก Z จากผิวสัมผัส (ลูกศรชี้) โดยมีค่าประมาณ 0.27 เท่าของความเค้นหลักสูงสุด



(ก) การกดจากแผ่นเรียบ

(ข) การกระจายความเค้นตามความลึก

ภาพที่ 13 การกระจายความเค้นของวัสดุทรงกลมยืดหยุ่น ถัดลงไปใต้พื้นผิวสัมผัส

ที่มา: Mohsenin (1986)

นักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพ และเชิงกลของผลไม้ เมื่อเกิดการกระทบ และพบว่า การช้ำของผลไม้ (Bruising) มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง กับพลังงานกระทบ (Impact Energy) (Chen and Sun, 1981; Jarimopas, 1984; Pang et al., 1992; Schoorl and Holt, 1980) Schoorl and Holt (1980) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช้ำและพลังงาน โดยได้นิยามความลาดเอียงของกราฟปริมาตรช้ำ และพลังงาน ว่าเป็นความต้านทานการช้ำ (Bruise Resistance) ของวัสดุ

นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาความสามารถของวัสดุกันกระทบ ในการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลไม้ (บัณฑิต และคณะ 2543, 2546, 2547; Chonhenchob and Singh, 2003; Chonhenchob and Singh, 2004) เขาเหล่านั้นพบว่าวัสดุกันกระทบ สามารถลดความช้ำเสียหายของผลไม้ได้ บัณฑิต และคณะ (2543) ได้ศึกษาความสามารถของตาข่ายโพลีเม เมื่อถูกใช้ห่อหุ้มผลไม้ที่ถูกกระทำด้วยการกระทบจาก Ballistic Pendulum ต่อผลแอปเปิ้ล และผลฝรั่ง โดยเปรียบเทียบระหว่างผลไม้ที่ห่อหุ้ม และไม่ได้ห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลีเม พบว่า ตาข่ายโพลีเมสามารถลดความช้ำเสียหายจากการกระทบ ในแอปเปิ้ลเป็นปริมาณ 50% และในฝรั่งสามารถลดความช้ำเสียหายจากการกระทบเป็นปริมาณ 72% สอดคล้องกับ Chonhenchob and Singh (2003) ที่รายงานว่า การใช้ตาข่ายโพลีเมห่อหุ้มผลไม้

สามารถลดการช้ำของผลไม้ได้ และ Chonhenchob and Singh (2004) รายงานว่า โดยทั่วไปแล้ว วัสดุกันกระแทกสามารถลดความช้ำของมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Schoorl and Holt (1977) รายงานว่า bruise susceptibility จะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษามากขึ้น สอดคล้องกับ Chonhenchob and Singh (2004) รายงานว่า ปริมาตรช้ำเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บ Chonhenchob and Singh (2003) รายงานว่า ระยะสุกแก่ (Maturity stage) มากขึ้น ปริมาตรช้ำจะเพิ่มขึ้น และ bruise susceptibility จะมีความไวต่อตัวกระแทกที่เบากว่า

ถึงแม้ว่า จะมีการพบการใช้ประโยชน์จากเชือกกล้วย, ผักตบชวา และกระดาษลูกฟูก เป็นบรรจุภัณฑ์ แต่การใช้ในลักษณะเป็นวัสดุกันกระแทกในการห่อผลไม้สดยังไม่มีการนำมาใช้งานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบการกระแทกในการหาความสามารถในการปกป้องผลไม้ของวัสดุกันกระแทกเนื่องจากการกระแทกทำให้เกิดความเสียหายต่อผลไม้ได้มากที่สุด เลือกใช้เครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่าย อาศัยตัวแปรพื้นฐานในการคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น มวลของลูกตุ้ม, ความยาวเชือก, มุมในการกระแทก และมุมสะท้อนกลับไม่มีกลไกซับซ้อน และผลไม้ที่เลือกมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบ ได้แก่ แอปเปิ้ลจินพันธุ์ฟูจิ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการตรวจหาการช้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

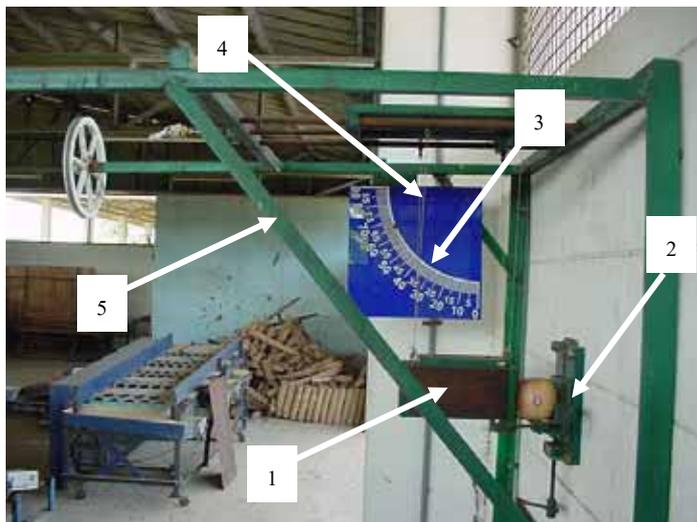
วัสดุ

1. เส้นตาข่ายโพลีเอทิลีนขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ขนาด 10 x 5 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว)
2. เส้นตาข่ายที่ถักจากผักตบชวา ขนาด 0.4 x 0.6 x 50 เซนติเมตร (หนา x กว้าง x ยาว)
3. เส้นตาข่ายที่ถักจากเชือกกล้วย ขนาด 0.4 x 0.6 x 50 เซนติเมตร (หนา x กว้าง x ยาว)
4. แผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนัง ขนาด 15 x 20 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว)
5. แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว ขนาด 15 x 20 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว)
6. ผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง: ผลแอปเปิ้ลจินพันธุ์ Fuji 2 ขนาด คือ เบอร์ 100 (แบ่งตามการนับ 100 ผล/ 20 กิโลกรัม, น้ำหนักเฉลี่ย 180 ± 20 กรัม/ผล) และ เบอร์ 80 (80 ผล/ 20 กิโลกรัม, น้ำหนักเฉลี่ย 240 ± 20 กรัม/ผล)

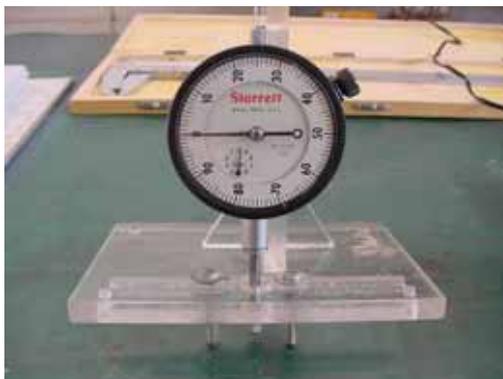
อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบการกระแทก (Ballistic Pendulum, ภาพที่ 14)
2. เครื่องวัดรัศมีความโค้ง (Radius of Curvature, ภาพที่ 15)
3. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก Sartorius รุ่น BA2100s

5. Laser Diode
6. มีด
7. ไม้บรรทัด
8. ตลับเมตร
9. ปากกาเขียนถาวร



ภาพที่ 14 เครื่องทดสอบการกระแทก (Ballistic Pendulum) ประกอบด้วย 1.) ตูมน้ำหนัก ขนาด 3.8 กิโลกรัม, 2.) ที่วางผลไม้, 3.) แผ่นวัดมุม, 4.) เชือกยาว 0.45 เมตร และ 5.) โครงเหล็ก



ภาพที่ 15 เครื่องวัดรัศมีมีความโค้ง (Radius of Curvature)

เครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (ภาพที่ 14) มีอุปกรณ์ประกอบด้วย ลูกตุ้มน้ำหนัก 3.8 กิโลกรัม ถูกแขวนเข้ากับโครงเหล็กรูปตัว L ตรึงติดฝาผนังด้วยเชือกยาว 0.45 เมตร 4 เส้น ที่แต่ละมุมตุ้มน้ำหนัก ที่วางผลไม้ทำด้วยเหล็กแผ่นขนาด $7 \times 15 \times 0.8$ เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) สำหรับวางผลไม้ที่จะถูกกระแทก แผ่นวัดมุมเป็นองศาอยู่ด้านข้างตุ้มน้ำหนักสำหรับตั้งมุมตกกระทบ และวัดมุมสะท้อนของตุ้มน้ำหนัก การใช้งานทำได้โดยปล่อยลูกตุ้มที่มุมตกกระทบที่กำหนดให้ ให้กระแทกเข้ากับผลไม้ การเคลื่อนที่ของตุ้มน้ำหนักเป็น Curvilinear Translation คือ จุดศูนย์กลางเดินทางเป็นเส้นโค้ง แต่ผิวยังคงขนานกับแนวระดับระหว่างการเคลื่อนที่ เมื่อลูกตุ้มกระแทกเข้ากับผลไม้แล้ว ลูกตุ้มจะสะท้อนกลับมาด้วยมุมสะท้อนหนึ่ง ๆ นำค่ามุมตกกระทบ, มุมสะท้อน และรอยซ้ำของผลไม้ มาวิเคราะห์ผล หาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรเนื้อซ้ำ (Bruise Volume) กับพลังงานกระแทก (Impact Energy) และพลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy)

เครื่อง Ballistic Pendulum มีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ คือ

1. ความละเอียดในการอ่านค่าที่แผ่นวัดมุม เนื่องจากตัวแปรที่เครื่องหาได้ล้วนเป็นฟังก์ชันของมุม และเชือกที่ใช้มีขนาดใหญ่, แผ่นวัดมุม และสเกลบนแผ่นวัดมุมมีขนาดเล็ก ทำให้อ่านค่าความละเอียดสูงสุดได้เพียงช่องละ 5 องศา

2. ในขั้นตอนของการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนัก และการอ่านค่ามุมสะท้อน ต้องใช้สายตาเล็งผ่านเชือกไปยังแผ่นวัดมุม ซึ่งทำให้เกิดความแม่นยำได้ยาก โดยเฉพาะกรณีอ่านค่ามุมสะท้อนที่เชือกไม่ได้หยุดอยู่กับที่บนสเกลของแผ่นวัดมุม ต้องอ่านค่าด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างมาก ในกรณีที่ทดลองกับตัวอย่างจำนวนมากอาจทำให้เกิดสายตาล้า และอ่านผิดพลาดได้ง่าย

3. ลูกตุ้มขาดเสถียรภาพ เมื่อเกิดการกระแทกลูกตุ้มจะแกว่งมากทำให้การอ่านค่ามุมสะท้อนกลับของลูกตุ้ม ทำได้ยาก

จากข้อจำกัดข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum ให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด และแม่นยำยิ่งขึ้น รวมไปถึงการปรับปรุงให้ลูกตุ้มน้ำหนักมีเสถียรภาพอีกด้วย

วิธีการ

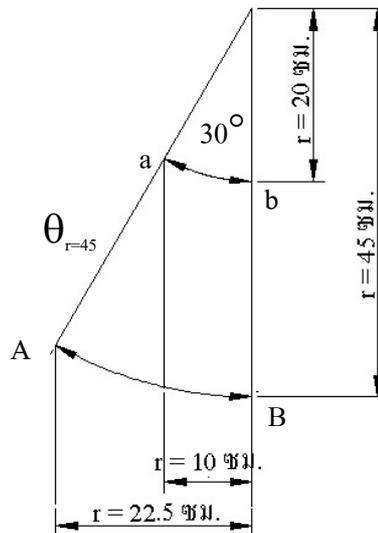
วิธีการในการวิจัยนี้แบ่งออกได้ดังนี้

1. การทดสอบเพื่อปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทก
2. การทดสอบการกระแทกเพื่อหาความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันผลแอปเปิ้ล การทดสอบนี้แบ่งออกเป็น
 - 2.1 การทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้หลังเริ่มเกิดรอยชำ (Beyond threshold)
 - 2.2 การทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้ก่อนและขณะเริ่มเกิดรอยชำ (Below threshold)
3. การทดสอบความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ
4. การวิเคราะห์ข้อมูล
5. การเลือกวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสมทดแทนดาข่ายโฟม

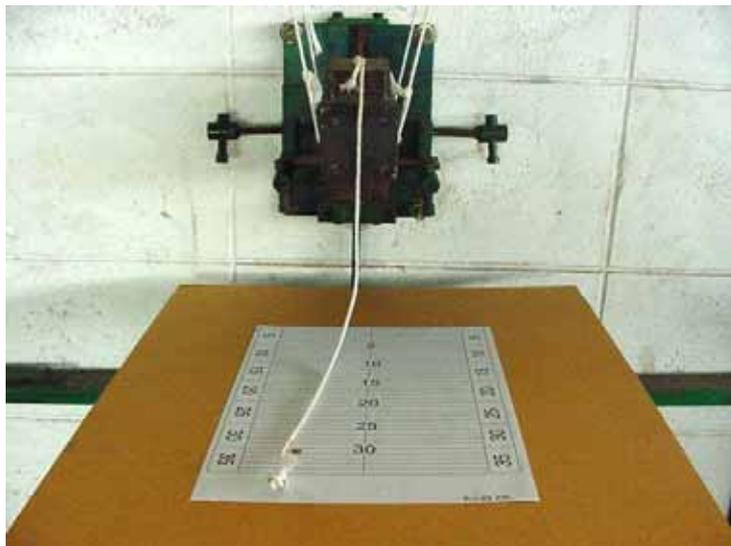
การทดสอบเพื่อปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทก

ก่อนที่จะทำการทดสอบเพื่อหาความสามารถของวัสดุกันกระแทก ต้องทำการปรับปรุงข้อจำกัดของเครื่องทดสอบการกระแทกก่อน การปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทกถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การปรับปรุงความละเอียดในการอ่านค่า เริ่มจากการขยายระยะสเกลจากเดิมซึ่งมีรัศมี 20 เซนติเมตร เป็น 45 เซนติเมตร (เท่ากับความยาวเชือก) (ภาพที่ 16) กำหนดให้มุมตกกระทบสูงสุดที่ 30 องศา จะได้อัตราส่วนในการขยาย AB/ab เท่ากับ 2.25 ทำให้สามารถอ่านค่าความละเอียดจากเดิมช่องละ 5 องศา เป็น 1 องศา เทียบเป็นระยะทางพื้นราบ เหลือ 1 องศา จาก 0.33 เซนติเมตร เป็น 0.75 เซนติเมตร ทำให้ได้ช่องว่างระหว่างสเกลมากขึ้น จากนั้นเปลี่ยนสเกลจากแผ่นวัดมุม ในแนวตั้งให้เป็นสเกลในแนวนอน (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 16 ขยายระยะสเกลจาก 20 เซนติเมตร เป็น 45 เซนติเมตร

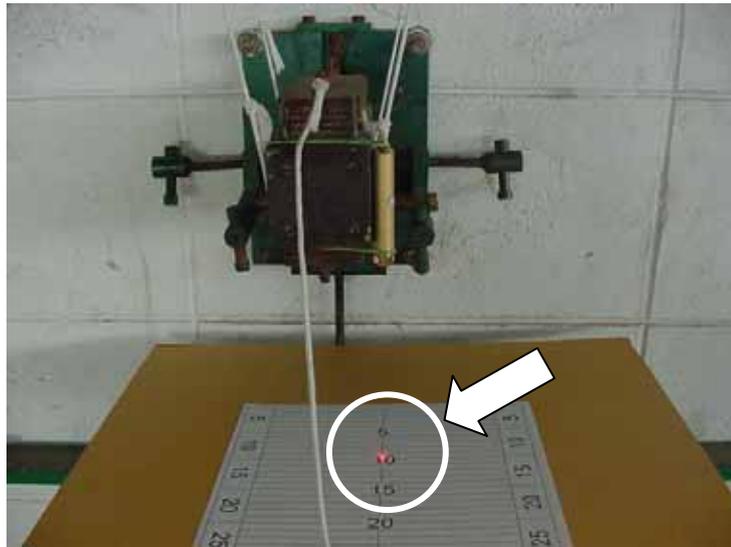


ภาพที่ 17 แผ่นวัดมุมให้อยู่ในแนวนอน

2. **การปรับปรุงความแม่นยำในการอ่านค่า** เครื่องทดสอบการกระแทกแบบเดิม ต้องใช้สายตาเล็งผ่านเชือกอ่านค่ามุมไปยังแผ่นสเกลในแนวตั้ง (ภาพที่ 18) ซึ่งการอ่านมุมเป็นสเกลองศาลำบากมาก จึงปรับปรุงโดยใช้การติดตั้ง Laser Diode ไว้ที่ท้ายลูกตุ้ม และใช้แสงจาก Laser Diode ในการชี้ในแนวตั้งลงบนสเกลในแนวระดับ (ภาพที่ 19) ทำให้อ่านค่าได้สะดวก ไม่ต้องเพ่งสายตาและแม่นยำขึ้น

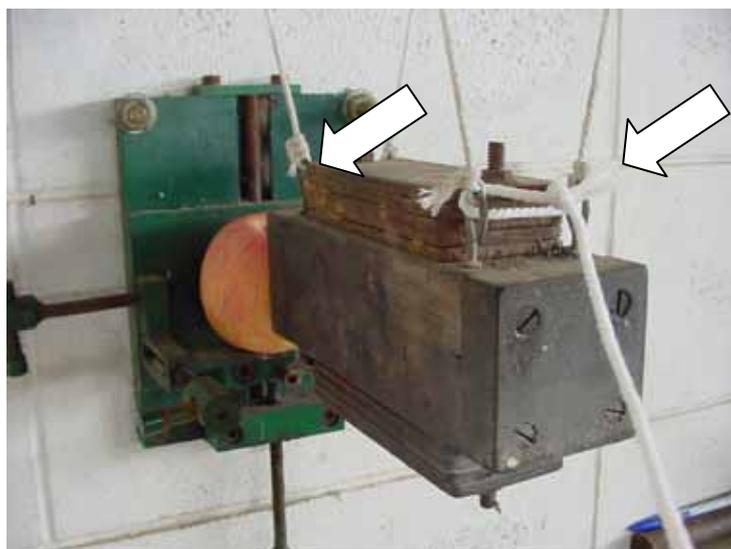


ภาพที่ 18 สายตาเล็งผ่านเชือกอ่านมุมบนสเกลในแนวตั้ง

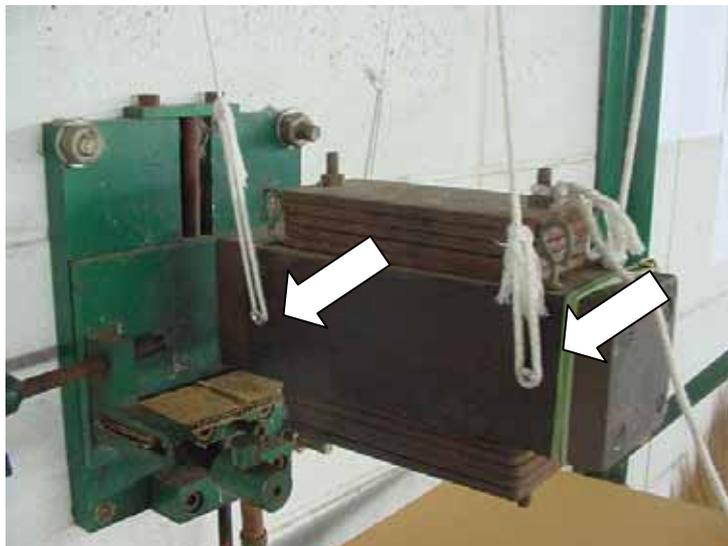


ภาพที่ 19 อ่าน โดยใช้ Laser Diode บนสเกลในแนวระดับ

3. **การปรับปรุงเสถียรภาพในการแกว่งของลูกตุ้ม** เมื่อลูกตุ้มน้ำหนักแบบเดิม (ภาพที่ 20) กระแทกเข้ากับผลไม้ จะเกิดการแกว่งขณะสะท้อนกลับ เป็นผลเนื่องจากเชือกที่ผูกอยู่สูงกว่าระดับจุดศูนย์ถ่วง ทำให้ลูกตุ้มขาดเสถียรภาพ จึงปรับปรุงโดยเจาะรูและผูกเชือกที่กึ่งกลางของลูกตุ้ม (ภาพที่ 21) ทำให้ลูกตุ้มมีเสถียรภาพมากขึ้น ส่งผลให้ลูกตุ้มแกว่งตัวหลังจากการกระแทกน้อยลง



ภาพที่ 20 ก่อนปรับปรุงการเสถียรภาพ



ภาพที่ 21 หลังปรับปรุงการเสถียรภาพ

เมื่อปรับปรุงความละเอียด, ความแม่นยำ และเสถียรภาพในการแกว่งของลูกตุ้มแล้ว นำลูกตุ้มที่ได้ปรับปรุงมาทดสอบการกระแทกกับแอปเปิ้ลจีนพันธุ์ Fuji เพื่อเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังปรับปรุง ทดสอบ 5 ซ้ำ/มุม ที่มุม 1-10, 15, 20, 25 และ 30 องศา

การทดสอบการกระแทกเพื่อหาความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลแอปเปิ้ล

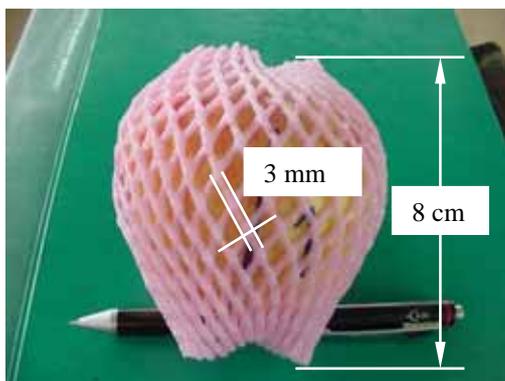
1. **การทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้หลังเริ่มเกิดรอยชำ**
วัสดุกันกระแทกทั้ง 2 กลุ่ม ได้แก่ เชือกกล้วย และฝักตบชวา (วิชพีช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร) และแผ่นกระดาษลูกฟูก และแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนัง ได้ถูกนำมาเป็นวัสดุกันกระแทก การทดสอบการกระแทก แบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ ดังนี้

1.1 ใช้ผลแอปเปิ้ลเปล่าไม่หุ้มวัสดุกันกระแทก (BF)

1.2 ใช้ผลแอปเปิ้ลห่อด้วยตาข่ายโฟม (FN) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

(ภาพที่ 22)

1.3 ใช้ผลแอปเปิ้ลห่อด้วยผักตบชวา แบ่งการหุ้มเป็น 2 รูปแบบ คือ ก.) สานแบบไขว้ (W1, ภาพที่ 23ก.) และ ข.) สานแบบชะลอม (W2, ภาพที่ 23ข.) โดยสานผักตบชวาให้หุ้มกับผลแอปเปิ้ลเลย



ภาพที่ 22 แอปเปิ้ลหุ้มด้วยตาข่ายโฟม



(ก) สานแบบไขว้



(ข) สานแบบชะลอม

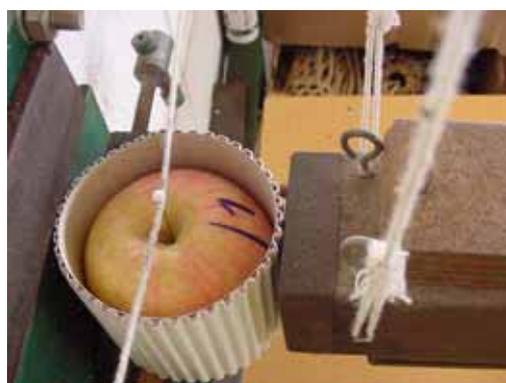
ภาพที่ 23 แอปเปิ้ลหุ้มด้วยผักตบชวา

1.4 ใช้ผลแอปเปิ้ลห่อด้วยเชือกกล้วย แบ่งการห่อเป็น 2 แบบ คือ เชือกกล้วยสานแบบไขว้ (B1) และ เชือกกล้วยสานแบบชะลอม (B2)

1.5 ใช้ผลแอปเปิ้ลห่อด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว แบ่งการห่อเป็น 2 แบบ คือ ก.) หั่นลอนลูกฟูกเข้าหาแอปเปิ้ล (SFI, ภาพที่ 24ก.) และ ข.) หั่นลอนลูกฟูกออกจากแอปเปิ้ล (SFO, ภาพที่ 24ข.)



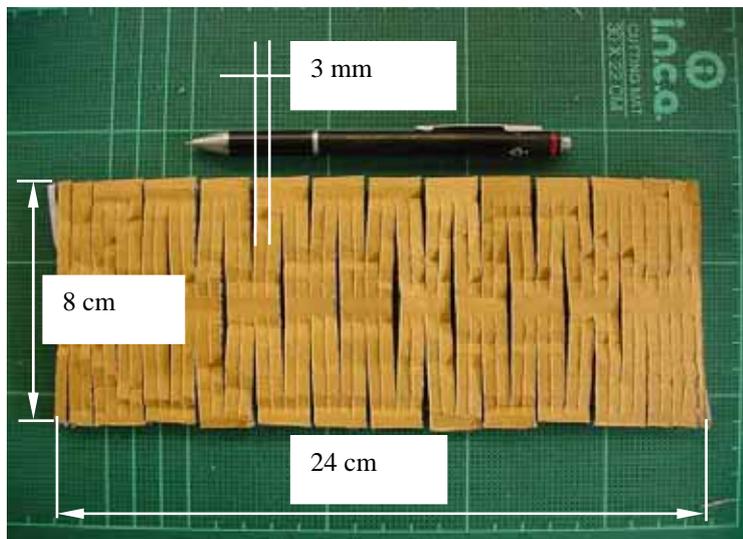
(ก) หั่นลอนลูกฟูกเข้าหาแอปเปิ้ล



(ข) หั่นลอนลูกฟูกออกจากแอปเปิ้ล

ภาพที่ 24 แอปเปิ้ลห่อด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว

1.6 ใช้ผลแอปเปิ้ลห่อด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนัง โดยตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกดังภาพที่ 25 แล้วนำมาห่อผลแอปเปิ้ลดังภาพที่ 26 แบ่งการห่อเป็น 2 แบบ คือ ก.) แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (NDW) และ ข.) แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (UDW)



ภาพที่ 25 การเตรียมแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนังสำหรับห่อผลแอปเปิ้ล

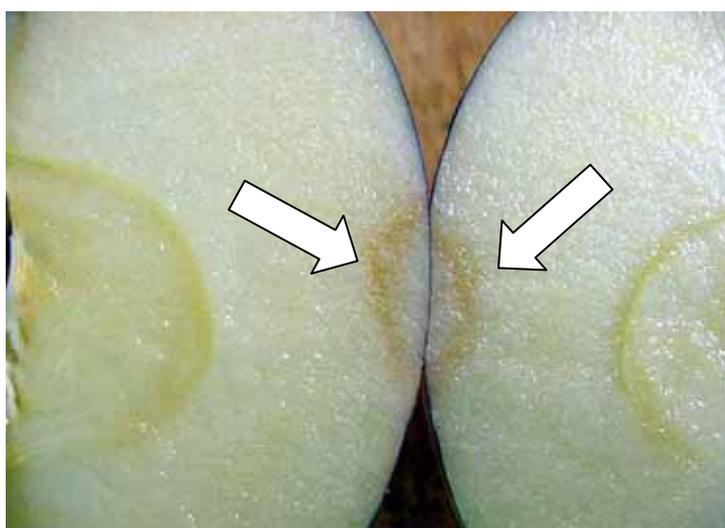


ภาพที่ 26 แอปเปิ้ลหุ้มด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนัง

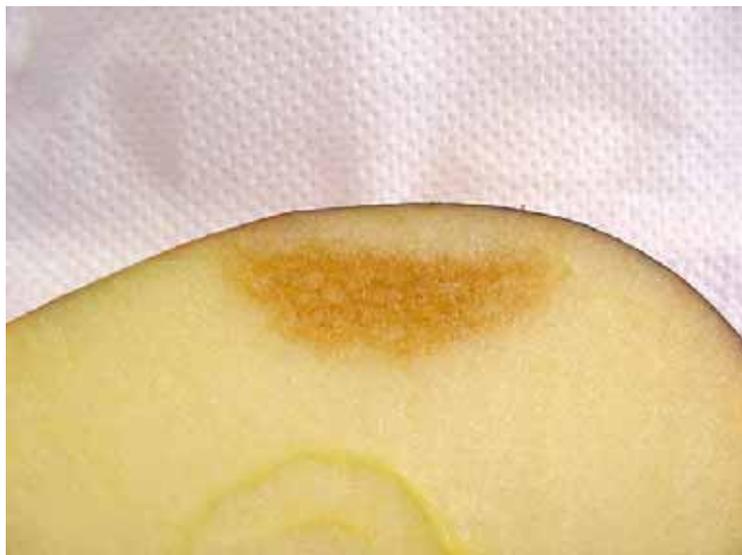
การทดสอบใช้พลังงานกระแทก 10 ระดับ ตั้งแต่ 0.02 จนถึง 2 จูล โดยทำการทดสอบ กระแทกแอปเปิ้ล 5 ผลต่อระดับพลังงาน และทดสอบกับแอปเปิ้ลสองขนาด คือ ขนาดเล็ก เบอร์ 100 (จำนวน 100 ผล/ 20 กิโลกรัม) และขนาดใหญ่ เบอร์ 80 (จำนวน 80 ผล/20 กิโลกรัม) เมื่อทำการ ทดสอบเสร็จ ทิ้งแอปเปิ้ลไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชม. เพื่อให้รอยช้ำของแอปเปิ้ลเกิดการเปลี่ยนสี ผ่านแอปเปิ้ลกลางบริเวณที่โดนกระแทก โดยผ่านานแกนขั้วของแอปเปิ้ล วัดความกว้าง และ ความลึกรอยช้ำ

2. การทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้ในขณะที่เริ่มเกิดรอยช้ำ

เมื่อผลไม้ได้รับภาระกระทำจากภายนอก หากภาระที่มากกระทำดังกล่าวนั้นมีค่าไม่สูงนัก(ต่ำกว่าค่า Bio-Yield Point ของผลไม้ชนิดนั้นๆ) ผลไม้จะไม่เกิดการช้ำเสียหาย แต่ถ้าภาระที่มากกระทำมีค่าสูงกว่า ค่า Bio-Yield Point ผลไม้จึงจะเริ่มเกิดการช้ำเสียหายขึ้น ระดับของพลังงาน ที่ทำให้ผลไม้เริ่มเกิด การช้ำนี้เรียกว่า Threshold Energy ซึ่งรอยช้ำที่เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานเริ่มช้ำนี้ จะมีลักษณะเป็นรอย เล็ก ๆ คล้ายผานไถ (Jarimopas, 1984) (ภาพที่ 27) แต่เมื่อให้ระดับพลังงานที่สูงขึ้นผลไม้จะช้ำ (Bruising) มากขึ้น (ภาพที่ 28) Threshold Energy ในการทดสอบนี้ถูกประเมินเป็น Statistical Threshold (Schulte et al., 1992; Mathew and Hyde, 1997) ซึ่งเป็นการหาค่าความน่าจะเป็น หรือ เปอร์เซนต์ ของการช้ำที่เกิดขึ้น มิใช่การหาค่า Bruise Threshold สำหรับแอปเปิ้ลแต่ละผล ดังนั้น ในการทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้ในขณะที่เริ่มเกิดรอยช้ำ จึงเป็นการทดสอบวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ แบบ Statistical Thresholding เพื่อหาระดับพลังงาน น้อยที่สุด ที่จะทำให้เริ่มเกิดการช้ำของผลไม้ขึ้น



ภาพที่ 27 รอยช้ำจาก Threshold Energy



ภาพที่ 28 รอยช้ำผลแอปเปิ้ลเมื่อได้รับพลังงานสูงกว่า Threshold Energy

การทดสอบทำได้โดยการนำวัสดุกันกระแทกไปห่อหุ้มกับผลแอปเปิ้ล แล้วนำไปทดสอบ กระแทก โดยพิจารณาจากจุดที่เริ่มช้ำของการทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทก ในการปกป้องผลไม้หลังเริ่มเกิดรอยช้ำ

การทดสอบใช้พลังงานกระแทก 10 ระดับ สำหรับแต่ละชนิดของวัสดุห่อหุ้ม ทดสอบจน เกิดการช้ำ (ที่ความน่าจะเป็น = 1) การทดสอบแบบไม่หุ้มวัสดุกันกระแทก ใช้พลังงานกระแทก ตั้งแต่ 0.02 จนถึง 0.25 จูล, ตาข่ายโพลีเอทิลีนใช้พลังงานกระแทก ตั้งแต่ 0.05 จนถึง 0.5 จูล วัสดุกลุ่ม กระดาษทั้งหมดใช้พลังงานกระแทก 0.25 จนถึง 0.75 ใช้แอปเปิ้ล 10 ผลสำหรับแต่ละระดับพลังงาน และกับแอปเปิ้ลสองขนาด คือ เบอร์ 100 และเบอร์ 80 เมื่อทำการทดสอบเสร็จ ทิ้งแอปเปิ้ลไว้ที่ อุณหภูมิห้อง 24 ชม. เพื่อให้รอยช้ำของแอปเปิ้ลเกิดการเปลี่ยนสี ผ่านแอปเปิ้ลกลางบริเวณที่โดน กระแทก โดยผ่านานแกนขั้วของแอปเปิ้ลวัดความกว้าง และความลึกรอยช้ำ

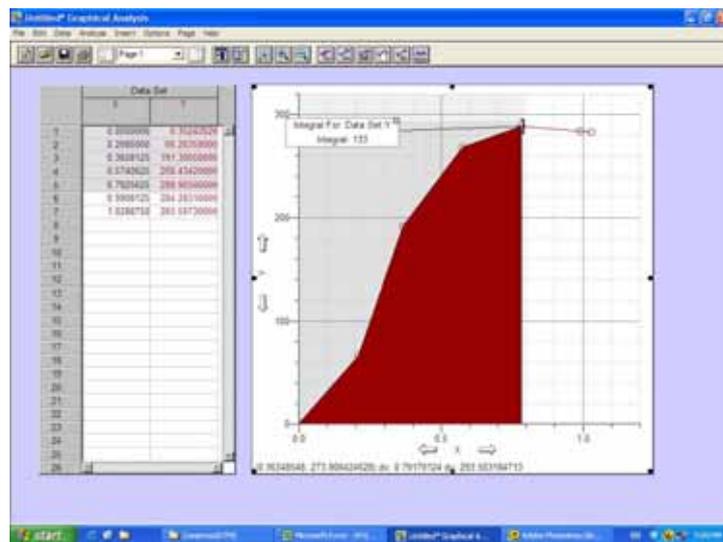
การทดสอบความสามารถในการดูดกลืนภาระของวัสดุกันกระแทก

เมื่อเกิดภาระกระทำกับผลไม้ อันเนื่องมาจากการเก็บเกี่ยว, เก็บรักษา, การบรรจุ, การขนส่ง รวมถึงการจัดการจำหน่ายไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของแรง หรือพลังงาน ทั้งในรูปแบบของการกระแทก, การกดทับ หรือการสั่นสะเทือน ผลไม้ก็จะเกิดการซ้ำขึ้น สาเหตุที่ผลไม้เกิดการซ้ำเป็นผลเนื่องมาจากผลไม้ได้รับพลังงานดังกล่าวเข้าไปโดยตรง ดังนั้นหากต้องการลดการซ้ำความเสียหายที่เกิดขึ้น จะต้องพยายามทำให้ผลไม้ได้รับพลังงานที่กระทำน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยนำวัสดุกันกระแทกมาห่อหุ้มผลไม้ เมื่อมีภาระกระทำเข้ากับผลไม้ วัสดุกันกระแทกจะทำหน้าที่ดูดกลืนภาระส่วนหนึ่งไว้ที่ตัวมันเอง (หรืออาจดูดกลืนไว้ทั้งหมดขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดกลืนของวัสดุกันกระแทก) และจะปล่อยภาระอีกส่วนหนึ่งให้กับผลไม้ ทำให้ผลไม้ได้รับภาระน้อยลง เป็นผลให้เกิดความซ้ำเสียหายน้อยลงไปด้วย

การหาความสามารถในการดูดกลืนภาระของวัสดุกันกระแทก(E_c) ทำได้โดยการนำวัสดุกันกระแทกไปทดสอบกดด้วยเครื่องทดสอบครอบจักรวาล (Universal Testing Machine, Instron model 5569) โดยทดสอบกดจนถึงจุดคราก (Yield Point) ของวัสดุนั้น ๆ จากนั้นพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง - การเปลี่ยนรูป เมื่อได้กราฟแล้ว นำกราฟดังกล่าวมาหาพื้นที่ใต้กราฟ ก็จะได้พลังงานที่วัสดุกันกระแทกดูดกลืนเอาไว้ การทดสอบทำได้โดยตัดชิ้นตัวอย่างของวัสดุกันกระแทกตาม TAPPI T 808 standard (Flat crush test of corrugated board) โดยตัดเป็นทรงกลมพื้นที่ 32.2 ตารางเซนติเมตร ชนิดละ 10 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปทดสอบกดอย่างช้า ๆ (Quasi-static Compression) (ภาพที่ 29) เมื่อทดสอบเสร็จแล้วจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง - การเปลี่ยนรูป นำกราฟดังกล่าวไปหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม Graphical Analysis (GA 3.0 Demo Version) (ภาพที่ 30) ก็จะได้ค่าพลังงานดูดกลืน



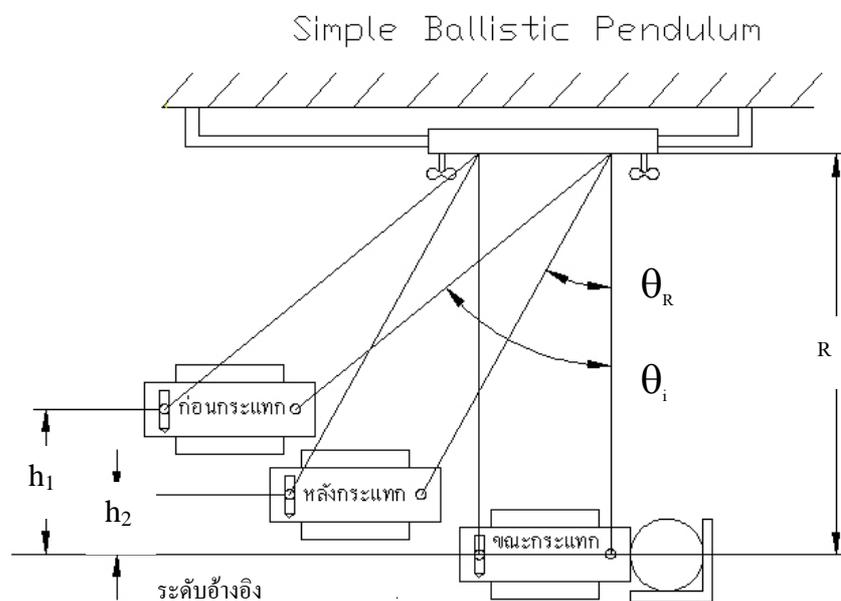
ภาพที่ 29 การกวดทดสอบหาพลังงานดูดกลืน



ภาพที่ 30 การหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม GA 3.0

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การทำงานของเครื่องทดสอบการกระแทก เครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum เป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่าย อาศัยตัวแปรพื้นฐานในการคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น มวลของ ลูกตุ้ม, ความยาวเชือก, มุมในการกระแทก และมุมสะท้อนกลับ (ภาพที่ 31) ไม่มีกลไกซับซ้อน สามารถหาตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ด้านสมบัติเชิงกลได้ดังนี้ (บัณฑิต และคณะ, 2543)



ภาพที่ 31 ตัวแปรพื้นฐานในการคำนวณค่าของเครื่องทดสอบการกระแทก

$$\text{พลังงานที่ใส่ให้ (Input Energy)} = mgh_1 = mgR(1-\cos\theta_i) \dots\dots\dots(1)$$

หรือ พลังงานกระแทก (Impact Energy)

$$\text{พลังงานคืนกลับ (Recovery Energy)} = mgh_2 = mgR(1-\cos\theta_R) \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy)} &= \text{Input Energy} - \text{Recovery Energy} \\ &= mgh_1 - mgh_2 \\ &= mgR(1-\cos\theta_i) - mgR(1-\cos\theta_R) \\ &= mgR(\cos\theta_R - \cos\theta_i) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

เมื่อ

m = มวลลูกตุ้ม (กิโลกรัม)

R = ความยาวเชือก (เมตร)

h_1 = ความสูงของตุ้มน้ำหนักก่อนปล่อย (เมตร)

h_2 = ความสูงของตุ้มน้ำหนักเมื่อสะท้อนกลับสูงสุด (เมตร)

θ_i = มุมที่เส้นเชือกทำกับแนวตั้งก่อนปล่อย (มุมตกกระทบ, องศา)

θ_R = มุมที่เส้นเชือกทำกับแนวตั้งเมื่อสะท้อนกลับสูงสุด (มุมสะท้อน, องศา)

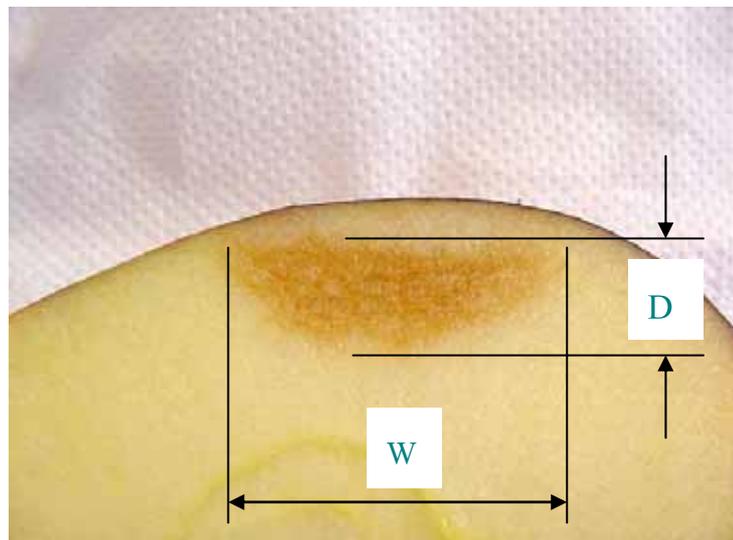
2. การหาปริมาตรเนื้อช้ำ (Chen and Sun, 1981)

ปริมาตรเนื้อช้ำ (Bruise Volume, ภาพที่ 32) = $(\pi/8) W^2 D$ (4)

เมื่อ

W = ความกว้างรอยช้ำ (มิลลิเมตร)

D = ความลึกรอยช้ำ (มิลลิเมตร)



ภาพที่ 32 ปริมาตรเนื้อช้ำ

3. ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ (Probability of Bruise Occurrence)

$$\text{ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ} = \frac{\text{จำนวนของผลแอปเปิ้ลที่เกิดการชำ}}{\text{จำนวนชำที่ทดลองในแต่ละระดับพลังงาน}}$$

ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ = 1 หมายถึง ผลแอปเปิ้ลที่ถูกทดสอบกระแทกชำทุกผล จุดเริ่มเกิดรอยชำหมายถึงพลังงานกระแทกที่น้อยที่สุด ที่ทำให้แอปเปิ้ลทุกผลที่ทำการทดสอบเกิดรอยชำ

4. การเลือกวัสดุที่เหมาะสมทดแทนตาข่ายโพลีเอทิลีน

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการปกป้องผลไม้ของเชือกกล้วย, ผักตบชวา และกระดาษลูกฟูก กับตาข่ายโพลีเอทิลีนเสร็จแล้ว จึงเลือกวัสดุที่เหมาะสมมาใช้ทดแทนตาข่ายโพลีเอทิลีน โดยพิจารณาจาก

4.1 ความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้หลังเริ่มเกิดรอยชำ (Beyond Threshold) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรชำ และพลังงานกระแทก โดยดูจากความต้านทานการชำ (Bruise Resistance) หรือความชันของกราฟ (Slope)

4.2 ความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้ขณะเริ่มเกิดรอยชำ (Below Threshold) โดยดูจากระดับพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดรอยชำสูงสุด (Threshold Energy) ที่ความน่าจะเป็นของการเกิดการชำ (Probability of Bruise) = 1

4.3 ระดับพลังงานสูงสุดที่วัสดุกันกระแทกสามารถดูดซับไว้ได้

4.4 ลักษณะของรอยชำที่เกิดขึ้น

ผลและวิจารณ์

การปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทก

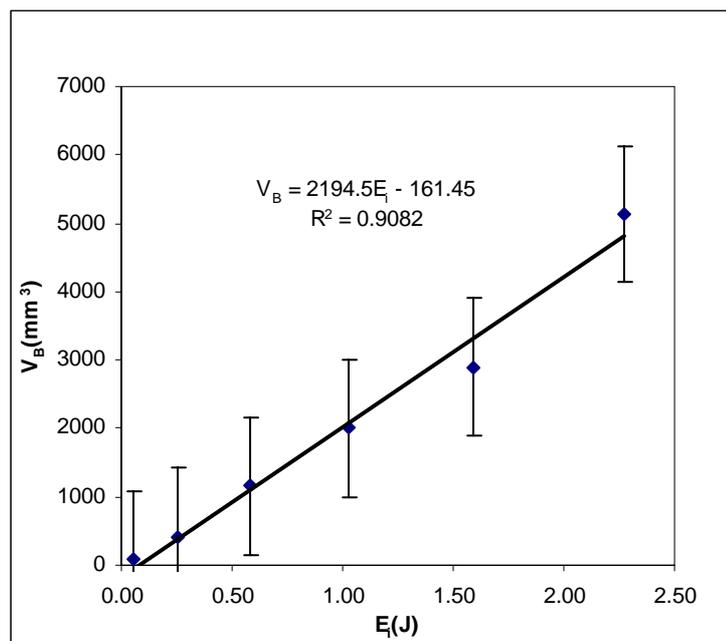
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum ก่อนและหลังการปรับปรุง

ก่อนการปรับปรุง					หลังการปรับปรุง				
มุมตก กระทบ (องศา)	มุม สะท้อน เฉลี่ย (องศา)	พลังงาน กระแทก (E _i) (จูล)	พลังงาน คืนกลับ เฉลี่ย(E _r) (จูล)	ปริมาตร ซ้ำ เฉลี่ย (ลบ. มม.)	มุมตก กระทบ (องศา)	มุม สะท้อน เฉลี่ย (องศา)	พลังงาน กระแทก (E _i) (จูล)	พลังงาน คืนกลับ เฉลี่ย(E _r) (จูล)	ปริมาตร ซ้ำ เฉลี่ย (ลบ. มม.)
5	2.8	0.064	0.032	75.87	1	-	0.0026	-	0
10	5.2	0.258	0.185	419.58	2	1.0	0.0103	0.008	0
15	7.4	0.578	0.435	1158.26	3	1.6	0.0232	0.023	0
20	10	1.024	0.763	2005.36	4	2.2	0.0413	0.028	55.19
25	14.4	1.588	1.053	2899.00	5	2.8	0.0644	0.041	79.36
30	17.4	2.276	1.490	5139.31	6	3.2	0.0928	0.066	141.30
-	-	-	-	-	7	3.8	0.1262	0.089	200.33
-	-	-	-	-	8	4.2	0.1648	0.119	306.15
-	-	-	-	-	9	4.6	0.2085	0.153	356.70
-	-	-	-	-	10	5.4	0.2573	0.187	425.70

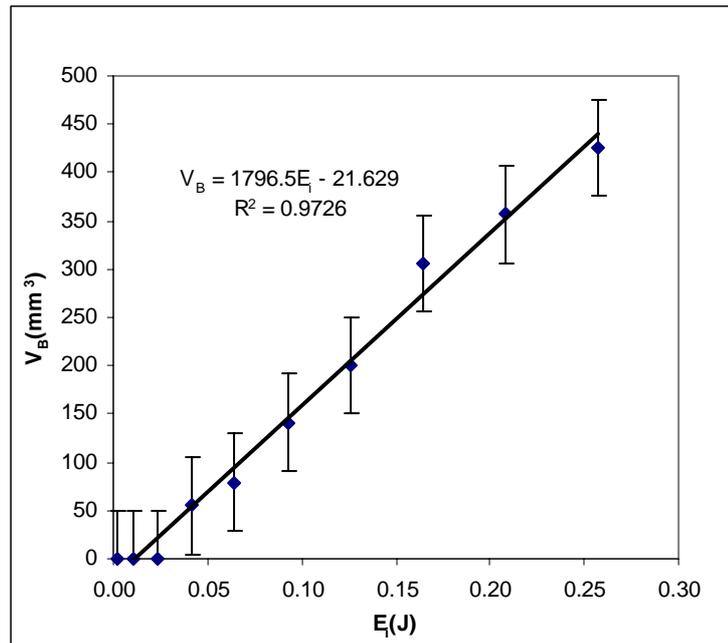
จากตารางที่ 2 พบว่า หลังการปรับปรุง เราสามารถติดตามวัด การเปลี่ยนแปลงปริมาตรซ้ำของผลแอปเปิ้ลจากการกระแทกที่ไม่ทำให้ผลแอปเปิ้ลซ้ำ (การกระแทกจากมุมตกกระทบเท่ากับหรือน้อยกว่า 3 องศา) จนกระทั่งกระแทกแรงขึ้น และผลของแอปเปิ้ลซ้ำ (การกระแทกที่มุมตกกระทบ 4 องศาหรือสูงกว่า) ในขณะที่ก่อนการปรับปรุง เราเริ่มกระแทกผลแอปเปิ้ลที่มุมต่ำสุด 5 องศา และผลไม้ซ้ำแล้วเครื่องทดสอบไม่สามารถกระแทกเบากว่านี้ และไม่สามารถวัดการกระแทกที่ไม่ทำให้ผลไม้ซ้ำได้เมื่อปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทกแล้ว เครื่องสามารถอ่านค่าได้ละเอียดขึ้น นำค่าปริมาตร

เนื้อหา พลังงานกระแทก (Impact Energy) และพลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy) ทั้งก่อน และ หลังปรับปรุงมาพล็อตกราฟจะได้ว่า

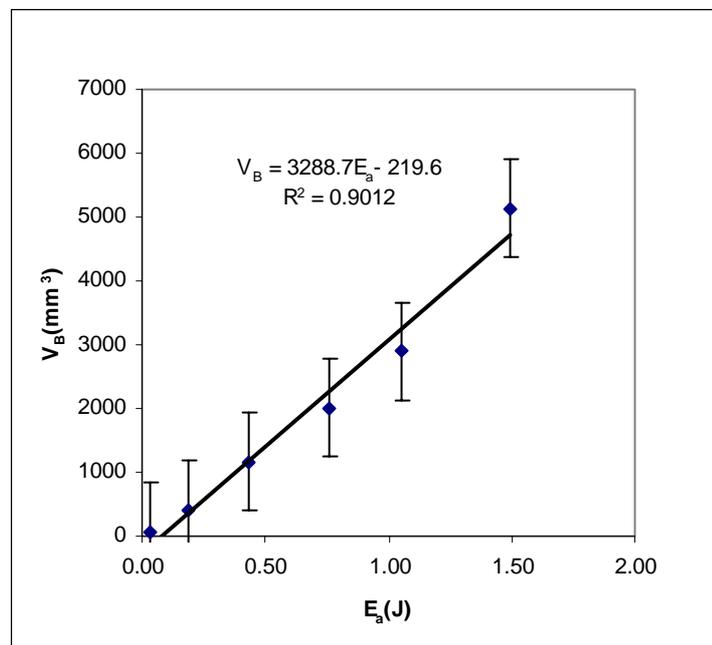
กราฟ E_i-V_B ก่อนปรับปรุง (ภาพที่ 33) เปรียบเทียบกับกราฟ E_i-V_B หลังปรับปรุง (ภาพที่ 34) พบว่าก่อนปรับปรุงต้องทดสอบการกระแทกด้วยมุม 5-30 องศา จึงสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E_i-V_B ได้ ในขณะที่หลังปรับปรุง ใช้มุมกระแทกเพียง 1-10 องศา ก็สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E_i-V_B ได้แล้ว สำหรับผลไม้ขนาดเล็ก การใช้มุมกระแทกสูง จะให้พลังงานกระแทกสูงอาจทำให้ผลไม้เกิดการเสียรูปมากเกินไป ก่อนจะได้ข้อมูลเพียงพอต่อการวิเคราะห์ นอกจากนี้แล้วความสัมพันธ์ระหว่าง E_i กับ V_B ดีขึ้น ดูได้จากค่า R^2 เพิ่มขึ้น จาก 0.9082 เป็น 0.9726 ซึ่งเป็นผลมาจากการอ่านค่ามุมตกกระทบได้ละเอียด แม่นยำขึ้น ทำให้จุด Co-ordinate ที่ได้เกาะกลุ่มชิดกันในกราฟภาพที่ 34 มากกว่าในกราฟภาพที่ 33



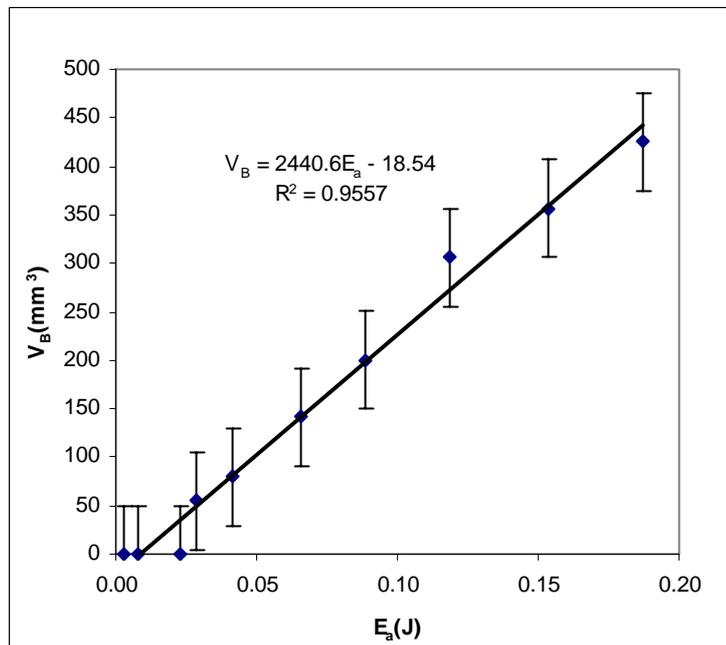
ภาพที่ 33 กราฟ E_i-V_B ก่อนปรับปรุง



ภาพที่ 34 กราฟ E_i - V_B หลังปรับปรุง



ภาพที่ 35 กราฟ E_a - V_B ก่อนปรับปรุง



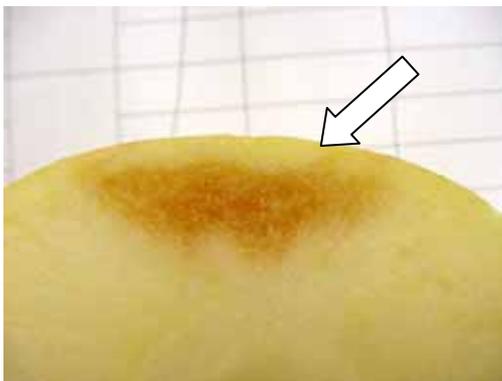
ภาพที่ 36 กราฟ E_a - V_B หลังปรับปรุง

ทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณากราฟพลังงานดูดกลืน - ปริมาตรซ้ำ E_a - V_B ก่อนปรับปรุง (ภาพที่ 35) เปรียบเทียบกับ กราฟ E_a - V_B หลังปรับปรุง (ภาพที่ 36) พบว่า ค่า R^2 เพิ่มขึ้นจาก 0.9012 เป็น 0.9557 ซึ่งเป็นผลมาจากการแกว่งของลูกตุ้มน้ำหนักในขณะที่สะท้อนกลับลดลง และการอ่านค่าบนสเกลได้ละเอียดขึ้น มากกว่าการคาดคะเนด้วยสายตา

ความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลแอปเปิ้ล

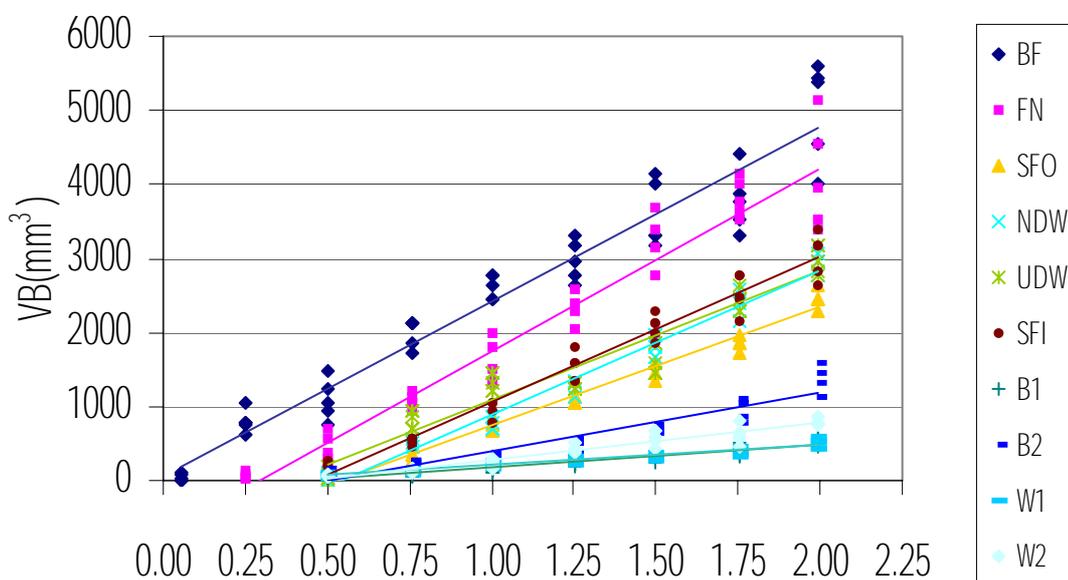
ผลการทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้เลยจุดเริ่มเกิดรอยซ้ำ (Beyond Threshold)

จากการตรวจสอบผลแอปเปิ้ลที่โดนกระแทก พบว่า เนื้อแอปเปิ้ลมีความเสียหายเห็นเป็นสีน้ำตาล ปรากฏอยู่ได้เปลือกเป็นระยะประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เป็นกลุ่มก้อน (ภาพที่ 37) ตำแหน่งของความเสียหายนี้สอดคล้องกับตำแหน่งของความล้มเหลวของเนื้อเยื่อของแอปเปิ้ล ที่รายงานไว้โดย Jarimopas, 1984 และสอดคล้องกับทฤษฎีความเค้นสัมผัสที่ Maximum shear stress เป็นตัวที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในวัสดุ ซึ่งตำแหน่งนี้ปรากฏต่ำกว่าผิวสัมผัสเล็กน้อย เป็นระยะครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้งงอของผิวสัมผัส



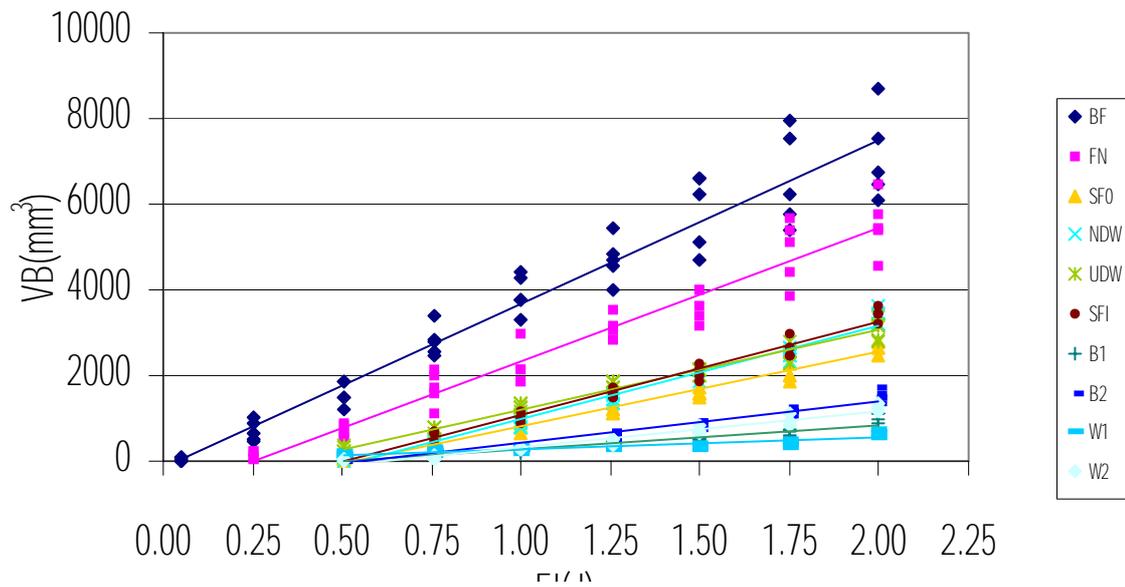
ภาพที่ 37 ลักษณะรอยช้ำตามทฤษฎีความเค้นสัมผัส

เมื่อนำปริมาณเนื้อช้ำ และพลังงานกระแทกจากการทดสอบการกระแทก แอปเปิ้ลผลเปล่า และแอปเปิ้ลหุ้มวัสดุกันกระแทกทั้ง 5 ชนิดมาพล็อตกราฟ (ภาพที่ 38) พบว่าปริมาณช้ำเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อพลังงานกระแทกเพิ่มสูงขึ้น



(ก) แอปเปิ้ลขนาด 100

ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อช้ำ และพลังงานกระแทกของแอปเปิ้ลเมื่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ



(ข) แอปเปิ้ลขนาด 80

ภาพที่ 38 (ต่อ)

ตารางที่ 3 แสดงค่าสมการรีเกรสชันเส้นตรง $V_B = AE_i + B$ และค่า R^2 ของผลแอปเปิ้ลห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกแบบต่าง ๆ ปริมาตรเนื้อซ้า และพลังงานกระแทกมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงอย่างดี วัสดุที่มีค่าความชันของกราฟ A น้อย หมายถึงมีค่าความต้านทานการซ้ามาก เพราะทำให้เกิดปริมาตรซ้า น้อย จากพลังงานกระแทก 1 หน่วยเดียวกัน แต่ถ้า A มีค่ามาก แสดงว่าเกิดปริมาตรเนื้อซ้ามาก จากพลังงานกระแทก 1 หน่วยเดียวกัน แสดงว่าความต้านทานการซ้า น้อย วัสดุกันกระแทกในกลุ่มวัชพีช และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ผักตบชวาसानแบบไขว้ (W1) มีค่าความชันของกราฟ $E_i - V_B$ ต่ำที่สุดเท่ากับ 268.55 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 284.03 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ที่ R^2 เท่ากับ 0.88 และ 0.78 ตามลำดับ วัสดุกันกระแทกในกลุ่มแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีค่า A ต่ำที่สุด ได้แก่ แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวแบบหันลอนออกด้านนอก (SFO) โดยมีค่า A เท่ากับ 1595.3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 1748.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ที่ R^2 เท่ากับ 0.98 สำหรับแอปเปิ้ลทั้งสองขนาด ส่วนค่า A สูงที่สุด ได้แก่ แอปเปิ้ลเปล่า (BF) มีค่าเท่ากับ 2350 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล และ 3812.5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และขนาด 80 ที่ R^2 เท่ากับ 0.94 และ 0.93 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังพบว่า ค่า A ของแอปเปิ้ลขนาด 80

มีค่ามากกว่า ค่า A ของแอปเปิ้ลขนาด 100 ในทุก ๆ วัสดุกันกระแทก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอปเปิ้ลขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะเกิดการชำรุดได้ง่ายกว่าแอปเปิ้ลขนาดเล็ก

ตารางที่ 3 สมการรีเกรสชันเส้นตรงระหว่างปริมาตรชำรุดกับพลังงานกระแทกของแอปเปิ้ลเมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ

Cushioning material	Apple size 100		Apple size 80	
	$V_B = AE_i + B^*$	R^2	$V_B = AE_i + B$	R^2
W1	$V_B = 268.55E_i - 60.627$	0.88	$V_B = 284.03E_i - 14.473$	0.78
B1	$V_B = 315.3E_i - 145.05$	0.90	$V_B = 564.43E_i - 266.43$	0.90
W2	$V_B = 502.47E_i - 213.82$	0.92	$V_B = 834.64E_i - 508.64$	0.95
B2	$V_B = 790.15E_i - 395.95$	0.90	$V_B = 981.95E_i - 560.74$	0.95
SF0	$V_B = 1595.3E_i - 854.26$	0.98	$V_B = 1748.1E_i - 945.93$	0.98
UDW	$V_B = 1741.5E_i - 663.97$	0.93	$V_B = 1877.5E_i - 682.14$	0.97
NDW	$V_B = 1946.9E_i - 1051.1$	0.97	$V_B = 2179.4E_i - 1196.3$	0.97
SFI	$V_B = 1960.1E_i - 905.99$	0.96	$V_B = 2188.1E_i - 1117$	0.98
FN	$V_B = 2465.6E_i - 732.95$	0.93	$V_B = 3113.2E_i - 772.83$	0.94
BF	$V_B = 2350E_i + 62.415$	0.94	$V_B = 3812.5E_i - 145.18$	0.93

* เมื่อ V_B = ปริมาตรเนื้อชำรุด และ E_i = พลังงานกระแทก A, B = ค่าคงที่

สาเหตุที่วัสดุกันกระแทกในกลุ่มวัชพืชและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีค่า A ต่ำ เนื่องจากลักษณะการसानของวัสดุกันกระแทก ซึ่งพยายามสานแบบไม่ให้มีปม อย่งไรก็ตาม การสานดังกล่าวก็ทำให้เกิดผิวที่ไม่เรียบ มีส่วนที่นูนออกมา เมื่อวัสดุกันกระแทกสัมผัสกับ ผลแอปเปิ้ลและมีแรงภายนอกกระทำ จึงเกิดภาวะกระทำแบบ Contact Loading ที่กระแทกด้วยหัว plunger เล็ก ๆ คือส่วนที่นูนออกมา ซึ่งมีหลายจุด และเกิดรอยชำรุดแบบเป็นจุดจ้ำ ๆ กระจายทั่วผิวสัมผัส (ภาพที่ 39) การตัดผ่ากลางรอยกระแทกสัมผัสผลแอปเปิ้ลทำให้สามารถวัดได้บางจุดชำรุดซึ่งไม่รวมครบทุกจุดทำให้เกิดค่าปริมาตรชำรุดต่ำกว่าเป็นจริง

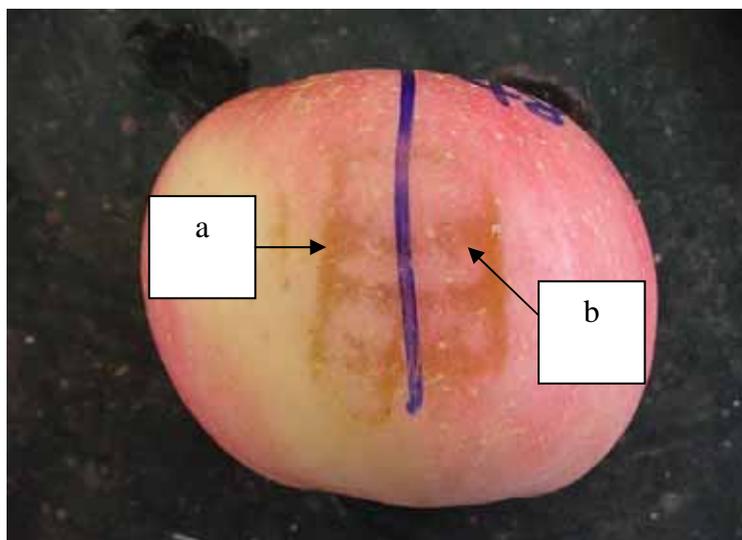


ภาพที่ 39 รอยซ้ำของแอปเปิ้ลเมื่อห่อหุ้มด้วยวัสดุเกษตร

ในทางปฏิบัติ หากนำวัสดุกันกระแทกกลุ่มวัสดุพีชและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาใช้ห่อแอปเปิ้ล เมื่อผู้บริโภครอยซ้ำที่เกิดขึ้น ผู้บริโภคจะต้องตัดส่วนที่เป็นเนื้อซ้ำทิ้งก่อนที่จะบริโภค ซึ่งการตัดนั้นผู้บริโภคต้องตัดเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ (เพื่อให้ครอบคลุมรอยซ้ำเล็ก ๆ ที่กระจายอยู่ให้หมด) ทำให้เสียเนื้อแอปเปิ้ลบริเวณที่ไม่ซ้ำไปด้วย ซึ่งเนื้อแอปเปิ้ลที่ถูกตัดออกโดยไม่ซ้ำนี้ เมื่อรวมกับเนื้อแอปเปิ้ลซ้ำแล้ว อาจมากกว่าเนื้อซ้ำของแอปเปิ้ลที่ไม่ห่อหุ้มวัสดุกันกระแทก ดังนั้นวัสดุพีชและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรถึงแม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดโดยความชันของกราฟ E_1-V_B ต่ำที่สุด แต่ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ห่อหุ้มผลแอปเปิ้ล

สำหรับวัสดุกันกระแทกในกลุ่มแผ่นกระดาษลูกฟูก พบว่า ค่า A ของแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนังที่ยังไม่ได้ใช้ (NDW) มีค่าเท่ากับ 1946.9 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 2179.4 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ($R^2 = 0.97$ ทั้งสองขนาด), ค่า A ของแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนังแบบใช้แล้ว (UDW) มีค่าเท่ากับ 1741.5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 1877.5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ($R^2 = 0.93$ และ 0.97 ตามลำดับ) และเมื่อกระแทกผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนังทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูกใช้แล้ว และยังไม่ได้ใช้ จะเกิดรอยซ้ำ (ภาพที่ 40) รอยซ้ำจากการใช้วัสดุกันกระแทกประเภทนี้เป็นรอยซ้ำของ Contact Loading แบบ Flat Plate เสริมด้วยรอยซ้ำเนื่องจากขอบของกระดาษ อันเนื่องมาจากรอยตัดของกระดาษในแนวตั้ง (a) และรอยของลอนลูกฟูกใน

แนวนอน(b) รอยซ้ำในลักษณะเช่นนี้ ทำให้กระดาษลูกฟูกสองผนังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ห่อหุ้มผลไม้



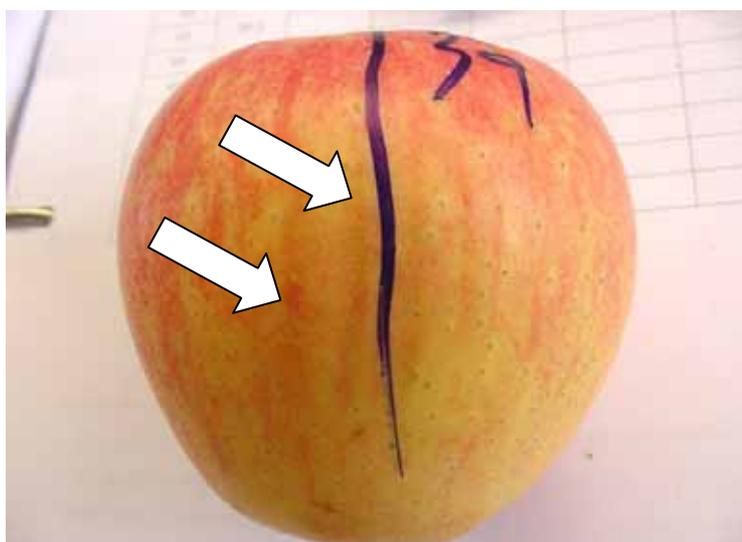
ภาพที่ 40 รอยซ้ำของแอปเปิ้ลเมื่อเปิดเมื่อห่อหุ้มด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกสองผนัง ทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูกใช้แล้ว และยังไม่ได้ใช้

จากการทดสอบการกระแทกแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวแบบหันลอนเข้าข้างใน (SFI) พบว่า ค่า A เท่ากับ 1960.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 2188.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ($R^2 = 0.96$ และ 0.98 ตามลำดับ) ค่า A ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวแบบหันลอนออกด้านนอก (SFO) เท่ากับ 1595.3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 1748.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ($R^2 = 0.98$ ทั้งสองขนาด)

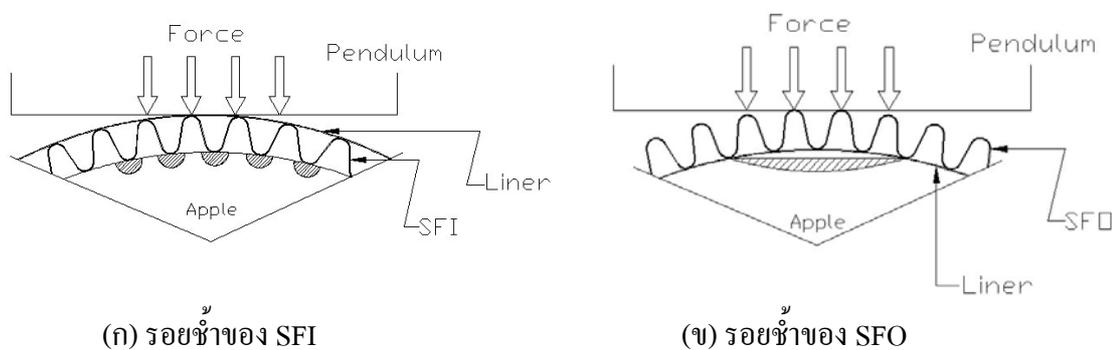
เมื่อเปรียบเทียบรอยซ้ำของแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวแบบหันลอนเข้าข้างใน (SFI) และ แบบหันลอนออกด้านนอก (SFO) พบว่ารอยซ้ำของ SFO มีลักษณะปกติตามสมมติฐาน Contact Loading ของ Flat Surface แต่รอยซ้ำของ SFI มีลักษณะเป็นแนวทแยง (ภาพที่ 41) เป็นผลเนื่องจากแรงที่กระทำจากลูกตุ้มจะส่งผ่านกระดาษทำผิว (Liner) ผ่านไปยังลอนลูกฟูก จะกระทำต่อผิวแอปเปิ้ลตลอดแนวสัมผัสที่เป็นลอนเป็นสัน เป็น Contact Loading ด้วยผิววนุนที่มีรัศมีความโค้งเล็กกว่าแอปเปิ้ลมาก ความเสียหายจึงเกิดเป็นแนวสัมผัสหลายแนว (ภาพที่ 42ก.)

เมื่อเปรียบเทียบกับ SFO ซึ่งตรงกันข้ามกัน คือ แรงที่กระทำจากลูกตุ้มจะผ่านลอนลูกฟูก ไปยังกระดาษทำผิว ๆ จะกระจายแรงไปกดแอปเปิ้ล (ภาพที่ 42ข.)

จากการทดสอบการกระแทกแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยตาข่ายโพลีเอทิลีน (FN) พบว่า ค่า A เท่ากับ 2465.6 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 3113.2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 80 ($R^2 = 0.93$ และ 0.94 ตามลำดับ)



ภาพที่ 41 รอยซ้ำของแอปเปิ้ลเมื่อห่อหุ้มด้วยกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (หันลอนเข้าด้านใน) และลูกศรแสดงรอยซ้ำที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 42 รอยซ้ำของแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว เปรียบเทียบระหว่างหันลอนเข้าข้างใน และหันลอนออกด้านนอก

ในการพิจารณาความสามารถในการป้องกันของวัสดุกันกระแทก ต้องพิจารณาความต้านทานการซ้ำ (ค่า A) และ รอยซ้ำของผลไม้ควบคู่กัน ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการทดลองแล้ว พบว่าวัสดุกันกระแทกในกลุ่มวัชพีช และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ เนื่องจากรอยซ้ำที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นจุดกระจายอยู่ทั่ว (ถึงแม้ว่าจะมีค่าความชันของกราฟ E_i-V_B ต่ำก็ตาม), ในกลุ่มแผ่นกระดาษลูกฟูก NDW, UDW และ SFI มีค่า A สูง และเกิดรอยซ้ำหลายแห่งดูน่าจะรุนแรงกว่าจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้

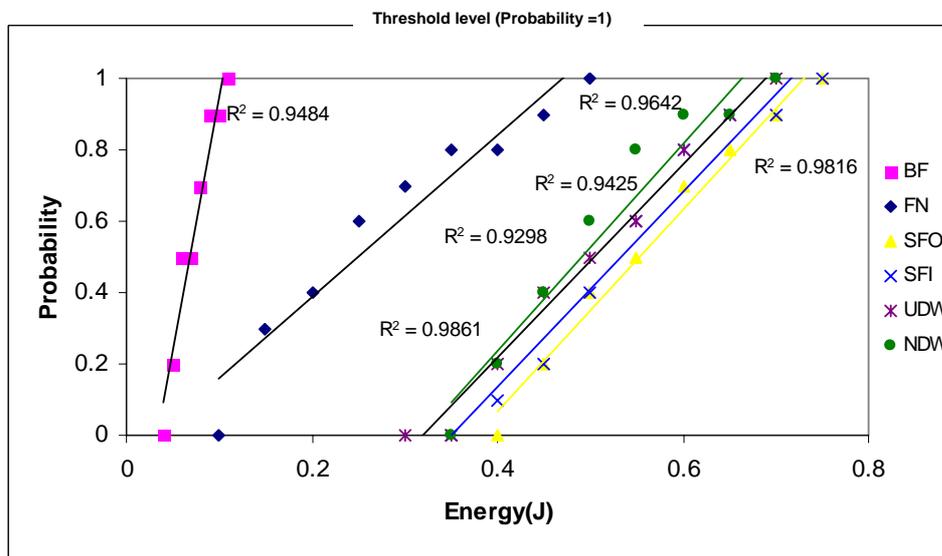
เมื่อเทียบความสามารถในการป้องกันของ SFO กับ BF พบว่า SFO มีความสามารถในการป้องกัน (ลดการซ้ำ) เป็น 32% และ 54% ของ BF ขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ ดังนั้นวัสดุกันกระแทกที่มีความสามารถในการป้องกันดีที่สุดได้แก่ SFO

ผลการทดสอบความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้ในขณะเริ่มเกิดรอยซ้ำ (Below and at Threshold)

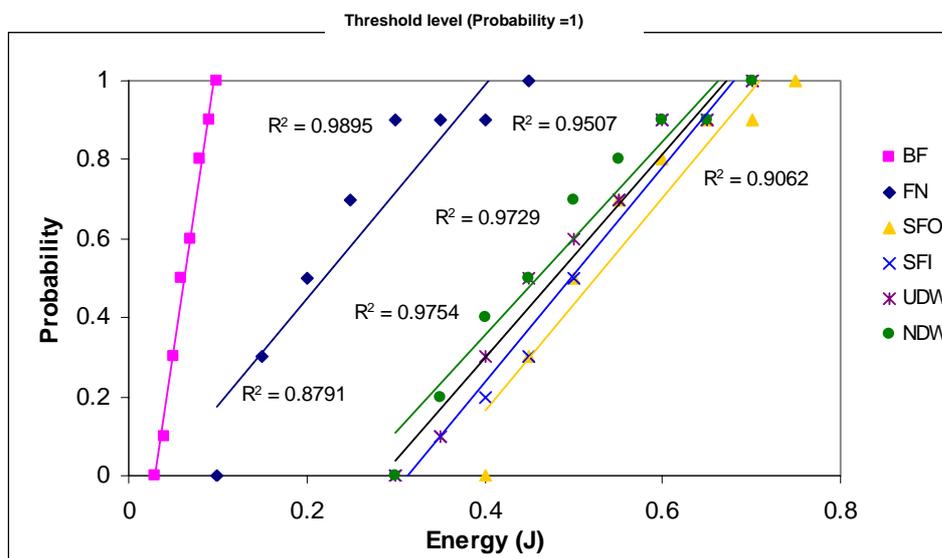
จากการทดสอบวัสดุกันกระแทกที่ผ่านมาทั้ง 2 กลุ่ม ได้แก่ วัชพีช และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและแผ่นกระดาษลูกฟูก พบว่าวัสดุกันกระแทกในกลุ่มวัชพีช และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เชือกกล้วย และผักตบชวาไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ ดังนั้นในการทดสอบความสามารถในการปกป้องผลไม้ในขณะเริ่มเกิดรอยซ้ำ (Threshold) และการหาความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุกันกระแทกในครั้งนี้ จึงไม่นำวัสดุกันกระแทกดังกล่าวมาทำการทดสอบ

Schulte et al. (1992) and Bollen et al. (2001) ได้ใช้กราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำ กับพลังงาน ในการแสดงถึงค่าเริ่มเกิดการซ้ำของแอปเปิ้ล (Bruise Threshold) ภาพที่ 43 แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการซ้ำกับพลังงานกระแทกที่ความน่าจะเป็น (Probability) = 1 ของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ พบว่าค่าของพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำ (Threshold Energy) ของวัสดุกันกระแทกแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยแอปเปิ้ลที่ได้รับการห่อหุ้มจะสามารถรับพลังงานได้มากกว่าแอปเปิ้ลผลเปล่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวัสดุกันกระแทกจะทำหน้าที่เหมือนเป็นเกราะป้องกันผลแอปเปิ้ล ที่คอยดูดกลืนพลังงานจากภายนอกเอาไว้ ถ้าดูดกลืนพลังงานไว้ได้น้อย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านไปกระทำกับผลแอปเปิ้ล ทำให้ค่าพลังงานเริ่มเกิดการซ้ำมีค่าต่ำ ในทางกลับกัน ถ้าวัสดุกันกระแทกสามารถดูดกลืน

พลังงานไว้ได้สูง พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่าน ไปกระทำกับผลแอปเปิ้ลน้อย ทำให้พลังงานเริ่มเกิดการชำรุดมีค่าสูง



(ก) แอปเปิ้ลขนาด 100



(ข) แอปเปิ้ลขนาด 80

ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดการชำรุดกับพลังงานกระแทก ที่ความน่าจะเป็น (Probability) = 1 ของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ

จากตารางที่ 4 พบว่าที่ความน่าจะเป็นของการซ้ำ = 1 ปริมาตรซ้ำของแอปเปิ้ลขนาดใหญ่ มีค่ามากกว่าปริมาตรซ้ำของแอปเปิ้ลขนาดเล็ก ในทุก ๆ วัสดุกันกระแทก และแอปเปิ้ลผลเปล่า และพบว่าผลแอปเปิ้ลเปล่าทั้งสองขนาด มีค่าพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำ (Threshold Energy) ต่ำที่สุด ที่ระดับพลังงาน 0.11 และ 0.1 จูล โดยมีค่าปริมาตรซ้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 161 ± 30 และ 165 ± 40 ลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ สาเหตุที่พลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำต่ำที่สุด และมีค่าปริมาตรซ้ำต่ำที่สุดด้วยนั้น เป็นผลเนื่องมาจากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้รับการห่อหุ้ม เมื่อมีภาระกระทำเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดการซ้ำแล้ว เมื่อภาระที่มากกว่านั้นย่อยรอยซ้ำที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาตรน้อยด้วย ผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วย FN มีค่าพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำที่ 0.5 และ 0.45 จูล มีค่าปริมาตรซ้ำเท่ากับ 447 ± 50 และ 481 ± 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ, ผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วย NDW มีค่าพลังงาน 0.7 และ 0.7 จูล ค่าปริมาตรซ้ำ 411 ± 55 และ 424 ± 60 ลูกบาศก์มิลลิเมตร, ผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วย UDW มีค่าพลังงาน 0.7 และ 0.7 จูล ค่าปริมาตรซ้ำ 379 ± 70 และ 398 ± 45 ลูกบาศก์มิลลิเมตร, ผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วย SFI มีค่าพลังงาน 0.75 และ 0.7 จูล ค่าปริมาตรซ้ำ 419 ± 25 และ 453 ± 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และผลแอปเปิ้ลที่ห่อหุ้มด้วย SFO มีค่าพลังงานที่ทำให้เริ่มเกิดการซ้ำสูงที่สุด 0.75 และ 0.75 จูล, ค่าปริมาตรซ้ำ 280 ± 50 และ 307 ± 60 ลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแอปเปิ้ลขนาด 100 ที่ห่อหุ้มด้วย SFI และ SFO มีค่า Threshold Energy เท่ากัน แต่ค่าปริมาตรซ้ำเฉลี่ยของ SFO มีค่าน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก SFO มีลักษณะปกติตามสมมติฐาน Contact Loading ของ Flat Surface แต่รอยซ้ำของ SFI มีลักษณะเป็น Contact Loading ด้วยผิววนหลายจุด เมื่อได้รับแรงกระแทกจึงเกิดความเสียหายประกอบด้วยปริมาตรซ้ำหลายจุด และมีปริมาณมากกว่า

ตารางที่ 4 ปริมาตรซ้ำ และพลังงานกระแทกที่ระดับเริ่มเกิดรอยซ้ำ (Threshold Energy)

ที่ความน่าจะเป็นของการซ้ำ = 1 ของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ

วัสดุกันกระแทก	ค่าปริมาตรซ้ำเฉลี่ย		Apple Threshold energy(J)**
	± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	(ลูกบาศก์มิลลิเมตร)		
	100*	80*	
SFO	280 ± 50	307 ± 60	0.75
UDW	379 ± 70	398 ± 45	0.70
NDW	411 ± 55	424 ± 60	0.70

ตารางที่ 4 (ต่อ)

วัสดุกันกระแทก	ค่าปริมาตรซ้ำเฉลี่ย		Apple Threshold energy(J)**
	± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	(ลูกบาศก์มิลลิเมตร)		
	100*	80*	
SFI	419 ± 25	453 ± 50	0.725±0.026
FN	447 ± 50	481 ± 50	0.475±0.026
BF	161 ± 30	165 ± 40	0.105±0.005

* 100 คือ แอปเปิ้ลขนาดเล็ก (จำนวน 100 ผล/ 20 กิโลกรัม) และ 80 คือ แอปเปิ้ลขนาดใหญ่ (จำนวน 80 ผล/20 กิโลกรัม)

** ระดับ Threshold energy ของแอปเปิ้ลทั้งสองกลุ่ม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ผลการทดสอบความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ

ตารางที่ 5 พลังงานดูดกลืนของวัสดุกันกระแทกชนิดต่างๆ

วัสดุกันกระแทก	พลังงานดูดกลืน(E_c) (จูล/ตารางเซนติเมตร)
SF0	0.110 ± 0.012
UDW	0.090 ± 0.008
NDW	0.094 ± 0.008
SFI	0.110 ± 0.012
FN	0.075 ± 0.008

ตารางที่ 5 แสดงพลังงานดูดกลืนของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ ภายใต้การทดสอบแบบ Quasi-static Compression (E_c) ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีระหว่างค่าพลังงานที่วัสดุกันกระแทกสามารถดูดกลืนไว้ได้ กับค่าพลังงานเริ่มเกิดการซ้ำ กล่าวคือ ผลแอปเปิ้ลที่ถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุกันกระแทกที่มีพลังงานดูดกลืนสูง จะทำให้ผลแอปเปิ้ลที่มีวัสดุกัน

ซึ่ำนั้ สามารถรับพลังงานกระแทกได้สูงซึ่ำนั้, SFO ซึ่ำนั้มีค่าพลังงานดูดกลืนมากที่สุดที่ 0.11 จูล/ตารางเซนติเมตร สอดคล้องกับค่าพลังงานเริ่มซึ่ำนั้ ที่สูงสุดคือ 0.75 จูล/ตารางเซนติเมตร วัสดุกันกระแทกชนิดอื่น ๆ ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นหมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานได้น้อยลง ก็จะมีค่าพลังงานเริ่มซึ่ำนั้ลดลง และสามารถป้องกันผลแอปเปิ้ลซึ่ำนั้ได้น้อยลง ในการทดสอบนี้ วัสดุกันกระแทกที่มีความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลดีที่สุดได้แก่ SFO

ผลการเลือกวัสดุที่เหมาะสมทดแทนตาข่ายโพลี

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันผลไม้ของเชือกกล้วย, ผักตบชวา และกระดาษลูกฟูกกับตาข่ายโพลีแล้ว พบว่าวัสดุที่เหมาะสมมาใช้ทดแทนตาข่ายโพลี โดยพิจารณาจากความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการปกป้องผลไม้หลังเริ่มเกิดรอยซึ่ำนั้ (Below threshold) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระแทก และปริมาตรซึ่ำนั้ โดยดูจากความต้านทานการซึ่ำนั้ (Bruise Resistance) หรือความชันของกราฟ $E_i - V_B$ ได้แก่ SFO โดยมีค่าความต้านทานการซึ่ำนั้สูงสุดเท่ากับ 1595.3 และ 1748.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ สำหรับความสามารถของ SFO ในการปกป้องผลไม้ขณะเริ่มเกิดรอยซึ่ำนั้ (Beyond Threshold) พบว่ามีค่าพลังงานสูงสุดที่ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดรอยซึ่ำนั้เท่ากับ 1 เท่ากับ 0.75 จูล ซึ่ำนั้มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุกันกระแทกชนิดอื่น

ระดับพลังงานที่ SFO สามารถดูดกลืนได้ เท่ากับ 0.110 ± 0.012 จูล/ตารางเซนติเมตร ซึ่ำนั้มากที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุกันกระแทกชนิดอื่น ลักษณะของรอยซึ่ำนั้ที่เกิดขึ้นของ SFO เป็นตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ เป็น Contact Loading แบบ Flat Plate (เกิดรอยซึ่ำนั้เพียงจุดเดียว บริเวณจุดที่วัสดุกันกระแทกสัมผัสกับแอปเปิ้ลและโดนกระแทก) ดังนั้น SFO จึงเป็นวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ทดแทนตาข่ายโพลี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทก

จากการปรับปรุงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum พบว่า

1. สามารถอ่านค่าความละเอียดของสเกล เพิ่มมากขึ้นจากเดิมช่องละ 5 องศา เป็น 1 องศา เทียบเป็นระยะทางพื้นราบเฉลี่ย 1 องศา จาก 0.33 เซนติเมตร เป็น 0.75 เซนติเมตร
2. มีความสะดวกในการใช้งานดีขึ้น เปลี่ยนจากที่ใช้สายตาเล็งผ่านเชือกไปยังแผ่นวัดมุม เป็นใช้แสงจาก Laser Diode ในการชี้ตำแหน่ง และมีความแม่นยำในการอ่านค่าดีขึ้น
3. สามารถทำการทดสอบการกระแทกได้ที่พลังงานกระแทกต่ำ ๆ (มุมกระแทกน้อย ๆ)
4. ลูกตุ้มมีเสถียรภาพในการแกว่งหลังจากกระแทกดีขึ้น (ลูกตุ้มแกว่งน้อยลง)
5. ค่า R^2 ของ $E_i - V_B$ เพิ่มขึ้นจาก 0.9082 เป็น 0.9726 และค่า R^2 ของ $E_a - V_B$ เพิ่มขึ้นจาก 0.9012 เป็น 0.9557

การทดสอบการกระแทกเพื่อหาความสามารถของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันผลไม่ก่อนเกิดการชำรุด (Below Threshold) และหลังเกิดการชำรุด (Beyond Threshold)

จากการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันผลไม่ของเชือกกล้วย, ผักตบชวา และกระดาษลูกฟูกกับตาข่ายโพลี พบว่า วัสดุกันกระแทกที่มีความสามารถในการป้องกันผลแอปเปิ้ล จากการกระแทกก่อน และหลังเกิดการชำรุดได้เหมาะสมที่สุด ได้แก่ SFO โดยมีค่าพลังงานเริ่มเกิดการชำรุด (Threshold Energy) เท่ากับ 0.75 จูล สำหรับแอปเปิ้ลทั้งสองขนาด และค่าความต้านทานการชำรุดที่กำหนดโดยความชันของกราฟ $E_i - V_B$ เท่ากับ 1595.3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล และ 1877.5

ลูกบาศก์มิลลิเมตร/จูล สำหรับแอปเปิ้ลขนาด 100 และ 80 ตามลำดับ ดังนั้น SFO จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่นำมาใช้ทดแทนตาข่ายโพลี

การทดสอบความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุกันกระแทกชนิดต่าง ๆ

จากการทดสอบพบว่า SFO มีค่าพลังงานดูดกลืนสูงสุดที่ 0.11 จูล/ตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันอย่างดีระหว่างค่าพลังงานที่วัสดุกันกระแทกสามารถดูดกลืนไว้ได้ที่สูงขึ้นกับค่าพลังงานเริ่มเกิดการชำรุดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดสอบนี้ วัสดุกันกระแทกที่มีความสามารถในการป้องกันดีที่สุด ได้แก่ SFO

ข้อเสนอแนะ

1. หากออกแบบเครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Ballistic Pendulum ให้มีกลไกในการปล่อยลูกตุ้ม จะทำให้การทดสอบมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. **สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2548**. แหล่งที่มา:

http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_report.cfm?task=report2548,
9 ตุลาคม 2549

คณะอนุกรรมการส่งเสริมการตลาด ภายใต้คณะกรรมการอำนวยการ หนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์

แห่งชาติ. 2549. **สินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์**. แหล่งที่มา: [http://otop.moc.go.th/](http://otop.moc.go.th/Front/TH/index.html)
/Front/TH /index.html, 12 กุมภาพันธ์ 2549

งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2541. **การใช้ประโยชน์จากใบตองและกาบกล้วย**, น. 18–20. ใน การสัมมนา
และนิทรรศการกล้วยครบวงจร วันที่ 15-17 มกราคม 2541 ณ สำนักพิพิธภัณฑสถานและ
วัฒนธรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

จักรกรี บรรลุประสงค์ และ ศุภโชค แสงสว่าง. 2539. **การนำผักตบชวามาเป็นวัสดุภัณฑ์**.

โครงการนิทรรศการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กำแพงแสน นครปฐม.

ชาติชาย ยมะคุปต์. 2544. **การใช้ประโยชน์ผักตบชวาในรูปบรรจุภัณฑ์**. **เกษตรก้าวหน้า**

14 (4): 67-77.

บัณฑิต จริโมภาส. 2549. **เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุ**

ผลไม้. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น.

_____, ัญญา เปี่ยมคล้า และ ปวีณา สว่างเนตร. 2546. **การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของ**

โพนตาข่ายในการป้องกันผลแอปเปิ้ลจากการกระแทก. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตร**
แห่งประเทศไทย 10 (1): 44-49.

_____, ชาริณี มหายศนันท์ และ นงเยาว์ ศรีเอนก. 2547. **การศึกษาความสามารถของตาข่าย**

ที่ทำจากเชือกกล้วยเพื่อป้องกันผลแอปเปิ้ลจากการกระแทก. **วิศวกรรมสาร มก.**

17 (51): 9-16.

- บัณฑิต จริโมภาส, วสันต์ แสงนิล และศุภลักษณ์ วรรณพงษ์. 2543. การศึกษาการใช้
ตาข่ายโพลีเอทิลีนห่อหุ้มผลไม้ที่ถูกกระทำด้วยภาระการกระแทก. **วารสารวิชาการเกษตร**
18 (2): 126 - 136.
- รุ่งรัตน์ เหลืองนทีเทพ. 2520. การศึกษาด้านสัณฐานวิทยาและเซลล์วิทยาของพืชในวงศ์
PONTERIACEAE ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชัย หลุทัยธนาสันต์. 2541. การใช้ประโยชน์และการแปรรูปกล้วย, น. 16-17. ใน การสัมมนาและ
นิทรรศการกล้วยครบวงจร วันที่ 15-17 มกราคม 2541 ณ สำนักพิพิธภัณฑน์และวัฒนธรรม
การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2545. คู่มือการใช้กระดาษเพื่อ
การหีบห่อ. อรุณการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- Bajema, R.W. and G.M. Hyde. 1998. Instrumented Pendulum for Impact Characterization of
Whole Fruit and Vegetable Specimens. **Trans. ASAE**. 41 (5): 1399-1405.
- 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.
- Bollen, A.F., N.R. Cox, B.T. Dela Rue and D.J. Painter. 2001. A Descriptor for Damage
Susceptibility of a Population of Produce. **J. Agr. Eng. Res.** 78 (4): 391-395.
- Chen, P., M. Ruiz-Altisent and P. Barreiro. 1996. Effect of Impacting Mass on Firmness Sensing
of Fruits. **Trans. ASAE**. 39 (3): 1019-1023.
- _____. and Z. Sun. 1981. Impact Parameters Related to Bruise Injury in Apples.
ASAE. Paper No. 81-3041.

- Chonhenchob, V. and S.P. Singh. 2003. A Comparison of Corrugated Boxes and Reusable Plastic Containers for Mango Distribution. **Packag. Tech. Sci.** 16: 231-237.
- 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.
- Diener, R.G., K. C. Elliott, P. E. Nesselroad, M. Tngle, R.E. Adams and S. H. Blizzard. 1979. Bruise Energy of Peaches and Apples. **Trans. ASAE.** 22 (2): 287-290.
- 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.
- Jindal, V.K. and N.N. Mohsenin. 1976. Analysis of a Simple Pendulum Impacting Device for Determining Strength of Selected Food Material. **Trans. ASAE.** 19 (4): 766-770.
- Kosma, A. and H. Cunningham. 1962. Tables for Calculating the Compressive Surface Stresses and Deflections in the Contact of Two Solid Elastic Bodies Whose Principle Planes of Curvature Do Not Coincide. **J. Ind. Math.** 12 (1): 31-40.
- Jarimopas, B. 1984. **Failure of Apple under Dynamic Loadings.** Unpublished D.Sc. Dissertation. Faculty of Agricultural Engineering, Israel Institute of Technology, Technion, Haifa, Israel.

- Levy, G.M. 2000. **Packaging, Policy and the Environment**. Aspen Publisher, Inc. Gaitherburg, Maryland, USA.
- Mathew, R. and G.M. Hyde. 1997. Potato Impact Damage Thresholds. **Trans. ASAE**. 40 (3): 705-709.
- Mohsenin, N.N. 1986. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc, New York, USA. 742 p.
- _____, V. K. Jindal and A. Manor. 1978. Mechanics of Impact of Fruit on a Cushioned Surface. **Trans. ASAE**. Vol. 21: 594-600.
- Pang, W., C.J. Studman and G.T. Ward. 1992. Bruising Damage in Apple-to-Apple Impact. **J. Agr. Eng. Res.** 52: 229-240.
- 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.