

ความเสียหายทางกลของมะม่วงบรรจุในตาข่ายโฟมขนส่งโดยรถบรรทุกขนาดเล็ก

Mechanical Damage of Mango in Foam net Transported by Pick-up

ชาคริต มานยาธิ, อนุชา พรหมวังขวา*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 053-944416, โทรสาร: 053-944145, E-mail: anucha.cmu@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การวิเคราะห์ความเสียหายทางกลของมะม่วงบรรจุโฟมจากการจำลองการขนส่ง โดยทำการเก็บข้อมูลความหนาแน่นสเปกตรัม (PSD: Power Spectral Density) ของ 3 สภาพพื้นผิวถนน จากรถบรรทุกขนาดเล็ก ตามความต่างระดับความดันลมยาง จากการศึกษพบว่าค่า PSD (Hz) ช่วงแรก ความถี่จะอยู่ในช่วง 2.0 - 2.13 Hz ช่วงที่สอง ความถี่จะอยู่ในช่วง 5.73 - 6.13 Hz และช่วงสุดท้าย ค่าความถี่อยู่ในช่วง 8.13 - 8.67 Hz ซึ่งค่าความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าความดันลมยางและในแต่ละสภาพถนนนั้นจะไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับความดันและความถี่ ค่าแอมพลิจูดจะเกิดขึ้นสูงที่สุดในเส้นทางหลวงชนบท รองลงมาคือทางหลวงเทศบาล และทางหลวงแผ่นดิน ตามลำดับ ซึ่งแอมพลิจูดสูงสุดมีค่า 5.8 mm เกิดที่เส้นทางหลวงชนบท ที่ความดันลมยาง 35 psi และต่ำสุดมีค่า 0.05 mm เกิดที่เส้นทางหลวงแผ่นดิน ที่ความดันลมยาง 45 psi คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ 2 ชนิดคือ เนื้อมะม่วงและโฟม ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing เนื้อมะม่วงมีคุณสมบัติเป็น Plasticity material และโฟมมีคุณสมบัติเป็น Hyper elastic material ค่าคุณสมบัติที่ได้ถูกนำไปป้อนให้กับโปรแกรม LS-Dyna สำหรับการจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลมะม่วงบรรจุโฟมเพื่อหาความเค้นที่ผิวของผลมะม่วง พบว่าความเค้นที่ผิวมะม่วงแปรผันโดยตรงกับค่าแอมพลิจูดของการสั่น การบรรจุโฟมสามารถลดความเสียหายลงได้มากกว่าที่ไม่ได้บรรจุ การเปรียบเทียบความเสียหายทางกลจากการทดลองกับความเค้นที่ผิวจากวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความสอดคล้องกัน

คำหลัก: ไฟไนต์เอลิเมนต์ ความเสียหายทางกล การจำลองการสั่น การสั่นสะเทือนทางกล ความหนาแน่นสเปกตรัม

Abstract

Objectives of this study are to do experiment and to simulate mechanical damages of mango in foam package during transportation by one-ton pick-up. Vibration data is the sample vibration (PSD: Power Spectral Density) which is collected on 3 road surface conditions and various tire pressures. The analysis shown that the PSD (Hz) can be classified into 3 ranges: the frequency range of 2.0-2.13 Hz, 5.73-6.13 Hz and 8.13-8.67 Hz. These PSD frequencies slightly depend on road conditions and tire pressures. However, vibration amplitude is inversely proportional to tire pressure and PSD frequency. High vibration amplitude occurs in a rural road, while lower amplitude occurs in a highway. On the rural road, the average amplitude is 5.8 mm at tire pressure of 35 psi. On the highway, the average amplitude is 0.05 mm at tire pressure of 45 psi. Mechanical properties of mango and foam are tested on a Universal Testing Machine. Mango is Plasticity material, while foam is Hyper-elastic material. The properties are used as input for LS-Dyna program for finite element analysis. Non-linear vibration FE model coupled with impact/contact surfaces is

built for mango with foam package. Mango skin stress increases with vibration amplitude. Mango with foam package gives much less stress value as compare to mango without foam package. A good agreement between mechanical damages resulted from the experiment and the stress values resulted from finite element analysis.

Keywords: Finite element, Mechanical Damage, Vibration simulator, Mechanical vibration, Power spectral density

1. บทนำ

มะม่วงเป็นผลไม้เมืองร้อนที่ได้รับความนิยมมากเพราะรสชาติที่กลมกล่อมทำให้รู้สึกสดชื่นเมื่อบริโภค และอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร วิตามินและเกลือแร่ ความนิยมบริโภคมะม่วงจึงขยายตัวอย่างรวดเร็ว และตลาดก็ไม่ได้จำกัดเฉพาะมะม่วงสด แต่ขยายไปสู่มะม่วงแปรรูปในรูปแบบต่างๆ อย่างไรก็ตามผู้บริโภคมะม่วงในรูปผลไม้สดมากกว่าแปรรูป นอกจากนี้มะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งถือเป็นราชินีของมะม่วงมีข้อจำกัดตรงที่ผิวเปลือกบาง ต้องถนอมในการขนส่งแต่ราคาสูง โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นนั้น มีการนำเข้ามะม่วงน้ำดอกไม้จากไทยเป็นอันดับ 3 รองจากประเทศอื่นๆ และความต้องการยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

เนื่องจากการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีสาเหตุมากมาย อาทิ อันเนื่องมาจากการแทรกกันระหว่างการเก็บเกี่ยว การขนส่ง และการบรรจุเพื่อนำส่งขาย ส่งผลกระทบต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การขนส่งทางไกลจากการขนส่งผลไม้ทางรถยนต์ ส่งผลให้สินค้าเกิดความเสียหายได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากหลายปัจจัยคือ (1) ผิวฉนวน (2) ระบบช่วงล่างของรถ (3) ความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้น และ (4) การบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการพัฒนาบรรจุภัณฑ์นี้เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับประเทศไทย เพื่อใช้ในการยืดอายุของผลผลิตทางการเกษตร และเพิ่มมูลค่าการส่งออกได้อีกทาง

ในการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา 1) ค่า Power spectrum density (PSD) จากความขรุขระของพื้นผิวถนนต่อรถบรรทุกขนาดเล็ก 2) เพื่อศึกษาความเสียหายทางกลของผลมะม่วงที่บรรจุในตาข่ายโฟมและบรรจุภัณฑ์แบบธรรมดา (Typical package) จากการ

สั่นสะเทือนโดยจำลองการขนส่งและ 3) เพื่อศึกษาความเสียหายทางกลของมะม่วงจากความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิว โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์การชนแบบสั้น

2. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องด้วยปัญหาแบบชนกันแบบสั้น (Dynamic collision) โดยเฉพาะในกรณีวิเคราะห์การชนจากการชนระหว่างการขนส่งของผลผลิตทางการเกษตร จะพบว่าทั้งคุณสมบัติของวัสดุ การเสียรูป และการตอบสนองของตัวแปรที่สนใจในช่วงเวลาต่างๆ เหล่านี้ทำให้ปัญหามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นฟังก์ชันของวัตถุที่สนใจจะถูกกำหนดด้วยพิกัดลากรางเจียน (Lagrangian coordinate) สามารถเขียนสนามการกระจัด สนามความเร็ว และสนามความเร่งได้คือ

$$\vec{u}(\vec{X}, t) = \vec{\theta}(\vec{X}, t) - \vec{\theta}(\vec{X}, 0) = \vec{x} - \vec{X} \quad (2.1)$$

$$\vec{v}(\vec{X}, t) = \frac{\partial \vec{\theta}(\vec{X}, t)}{\partial t} = \dot{\vec{u}} \quad (2.2)$$

$$\vec{a}(\vec{X}, t) = \frac{\partial \vec{v}(\vec{X}, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{u}(\vec{X}, t)}{\partial t^2} = \ddot{\vec{u}} \quad (2.3)$$

และสมการควบคุมคือ

(ก) สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass equation)

$$\rho(\vec{X}, t)J(\vec{X}, t) = \rho_0(\vec{X}, t)J_0(\vec{X}, t) = \rho_0(\vec{X}) \quad (2.4)$$

(ข) สมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation of linear momentum equation)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \dot{v}_i \quad (2.5)$$

(ค) สมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of angular momentum equation)

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (2.6)$$

(ง) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy equation)

$$\dot{w}^{int} = D_{ij}\sigma_{ji} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho h \quad (2.7)$$

2.1 การแบ่งแยกไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element discretization)

ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าที่คำนวณที่จุดต่อของเอลิเมนต์ เมื่อพิจารณารูปร่างปัจจุบันและรูปร่างเริ่มต้น พิกัดจุดต่อของเอลิเมนต์จะกำหนดให้เป็น x_{ii} และ X_{ii} โดยตัวห้อย i ระบุหมายเลขของแกนมิติ และตัวห้อย I ระบุหมายเลขจุดต่อ ดังนั้นการจัดของจุดต่อจะเป็น

$$u_{ii}(t) = x_{ii}(t) - X_{ii} \quad (2.8)$$

สนามการกระจัด สนามความเร็ว และความเร่งของระบบ (Global) จะเป็นดังสมการ (2.9) (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

$$u_{ii}(t) = u_{ii}(t)N_{ii} \quad (2.9)$$

$$v_i(X, t) = v_{ii}(t)N_I(X) = \dot{u}_{ii}(t)N_I(X) \quad (2.10)$$

$$a_i(X, t) = \dot{v}_{ii}(t)N_I(X) = \ddot{u}_{ii}(t)N_I(X) \quad (2.11)$$

โดย $N_I(X)$ คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function)

เมื่อนำพจน์สนามความเร็วไปพิจารณาในสมการกำลังเสมือน จะได้

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial N_I}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega - \int_{\Omega} N_I \rho b_i d\Omega \\ - \sum_{i=1}^{N_{SD}} \int_{\Gamma_{t_i}} N_I t_i d\Gamma \\ + \int_{\Omega} N_I \rho \dot{v}_i d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

หากพิจารณาแต่ละพจน์ โดยนำพจน์ของกำลังภายในเสมือนมาพิจารณาจะได้

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{P}^{int} &= \delta v_{ii} f_{ii}^{kin} = \int_{\Omega} \frac{\partial (\delta v_i)}{\partial x_j} \sigma_{ij} d\Omega \\ &= \delta v_{ii} \int_{\Omega} \frac{\partial N_I}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.11) จะได้ค่าของแรงภายในของแต่ละจุดต่อ คือ

$$f_{ii}^{int} = \int_{\Omega} \frac{\partial N_I}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega \quad (2.14)$$

จะได้ค่าของแรงภายนอกและแรงเฉื่อย ดังนี้

$$f_{ii}^{ext} = \int_{\Omega} N_I \rho b_i d\Omega + \int_{\Gamma_{t_i}} N_I t_i d\Gamma \quad (2.15)$$

$$f_{ii}^{kin} = \int_{\Omega} N_I \rho \dot{v}_i d\Omega = M_{ijIJ} \dot{v}_{jj} \quad (2.16)$$

เมื่อ M_{ijIJ} คือ เมตริกซ์ของมวล (Mass matrix) ที่กระจายไปยังจุดต่อที่พิจารณาและใกล้เคียง เมื่อพิจารณาจากรูปร่างเริ่มต้น จะได้เมตริกซ์ของมวลคือ

$$M_{ijIJ} = \delta_{ij} \int_{\Omega_0} \rho N_I N_J d\Omega_0 \quad (2.17)$$

โดยที่ N_I คือ ฟังก์ชันรูปร่างของจุดต่อที่พิจารณา

และ N_J คือ ฟังก์ชันรูปร่างของจุดต่อใกล้เคียง

นำสมการ (2.14) (2.15) และ (2.16) กลับไปจัดรูปสมการกำลังเสมือนเสียใหม่ จะได้สมการแบ่งแยกย่อย (Semidiscrete equation) คือ

$$M_{ijIJ} \dot{v}_{jj} + f_{ii}^{int} = f_{ii}^{ext} \quad \text{หรือ} \quad (2.18)$$

$$Ma + f^{int} = f^{ext}$$

สมการ (2.18) มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากจะเป็นสมการสำหรับวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้น สำหรับการหาความเครียดที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการพิจารณาเกรเดียนท์ความเร็ว (Velocity gradient) คือ

$$L_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = v_{iI} \frac{\partial N_I}{\partial x_j} = v_{iI} B_{jI} ; B_{jI} = \frac{\partial N_I}{\partial x_j} \quad (2.19)$$

เมื่อเขียนในรูปเมตริกซ์จะได้

$$[L_{ij}] = [v_{iI}][B_{jI}] = [v_{iI}][B_{jI}]^T \quad (2.20)$$

จากนั้นความเครียดจึงจะถูกวิเคราะห์ในรูปของ อัตราการเสียรูปตามสมการ (2.18) โดยเมื่อจัดให้อยู่ในรูปของเกรเดียนท์ความเร็ว จะได้สมการดังแสดง

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(L_{ij}^T + L_{ij}) \quad (2.21)$$

เมื่อหาความเครียดที่เกิดขึ้นได้แล้วจึงอาศัยสมการความสัมพันธ์เพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นได้ต่อไป

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน

เก็บข้อมูลจากสภาพถนนจริงได้แก่ ทางหลวงชนบท ทางหลวงเทศบาล และทางหลวงแผ่นดิน ที่ความดันลมยาง 35 40 และ 45 psi เพื่อนำไปเป็นข้อมูลการทดสอบวัสดุ การทดลองการจำลองการสั่น และการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 1 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือน (Brüel & Kjaer รุ่น 4391) ในตำแหน่งใต้กระเบของรถ โดยทำการติดตั้งบนคัสซี แล้วทำการต่อสายสัญญาณจากหัววัดความสั่นสะเทือนมายัง Charge Amplifier (Brüel

& Kjaer) แล้วนำสัญญาณขาออก ไปเก็บบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ในรูปแบบสกุลไฟล์ *.wav ซึ่งใช้โปรแกรม Audio Recorder for free 12.8.2 โดยหลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธี FFT โดยเครื่อง Vibration Analyzer (Brüel & Kjaer รุ่น 2515) ทำการเก็บข้อมูลที่สภาพผิวถนน 3 ชนิด ได้ระดับค่า PSD (Hz) และแอมพลิจูด (mm)

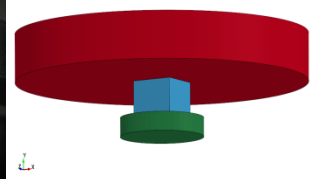
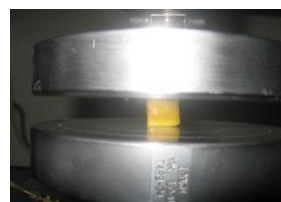
3.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 ทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกล

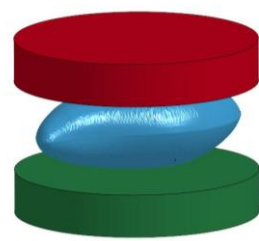
การหาคุณสมบัติของมะม่วง และโฟม นี้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบจริง เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะหด ความเค้นกับความเครียดและความเร่งและความถี่ โดยมีการทดสอบดังนี้

ก. สำหรับมะม่วง ทดสอบการอัดแบบ Uniaxial ด้วยเครื่อง Universal Testing ทั้งแบบชิ้นมะม่วงทดสอบและผลมะม่วงที่ความเร็ว 5.0 มม./นาที สำหรับโฟม (Polyethylene) ทดสอบทั้งการอัดที่ความเร็ว 2.0 มม./นาที และการสั่นของมวลติดโฟมที่ความถี่คงที่ 2.0 Hz ดังรูปที่ 2

(ก)



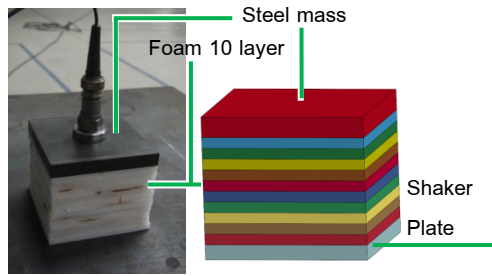
(ข)



(ค)



(ง)



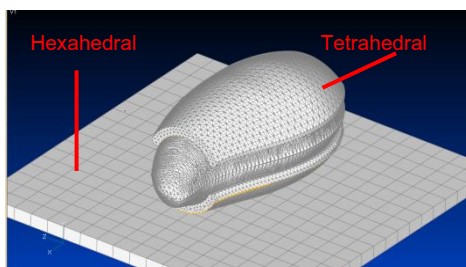
รูปที่ 2 แสดงการทดลองจริงกับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ (ก) การอัดขึ้นมะม่วง (ข) การอัดผลมะม่วง (ค) การอัดขึ้นโฟม และ (ง) การทดสอบการสั่น

ข. การสั่นของโฟมติดมวล ทำได้โดยจำลองการสั่นจากเครื่องเขย่าแบบปรับค่าความถี่ได้ ซึ่งใช้ความถี่หลักของการสั่นของข้อมูลค่า PSD

ค. ยืนยันผลการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงซึ่งเปรียบเทียบผลของความเค้นกับความเครียดสำหรับการอัดของขึ้นมะม่วงทดสอบ และขึ้นโฟมทดสอบ แรงกับระยะหดสำหรับการอัดผลมะม่วง และความเร่งกับความถี่สำหรับการสั่นของโฟมติดมวล

3.2.2 แบบจำลอง

กำหนดคุณสมบัติ และป้อนคำสั่งในโปรแกรม LS-Dyna: ซึ่งใช้ Element แบบ Solid 8 โหนด ชนิด Hexahedral ยกเว้นกรณีผลมะม่วงและโฟมที่ใช้แบบ Tetrahedral ใช้วัสดุของมะม่วงและโฟมเป็นแบบ *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY และ *MAT_LOW_DENSITY_FOAM ตามลำดับดังรูปที่



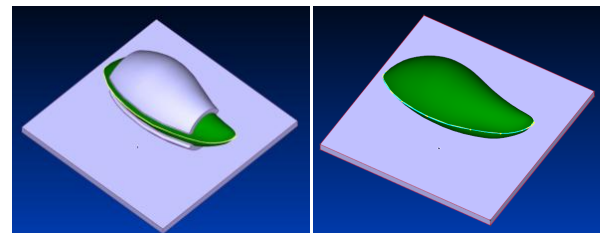
รูปที่ 3 แสดงเอลิเมนต์ของชนิด Hexahedral และ Tetrahedral ของแบบจำลองการสั่นมะม่วงหุ้มโฟม

3.2.3 การวิเคราะห์โดย LS-Dyna

ก. ใช้ LS-Dyna ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการทดสอบการอัด และการสั่นจริง เพื่อยืนยันความถูกต้อง และนำคุณสมบัติวัสดุไปใช้ในกรณีต่อไป สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะท้อนนั้น สมการป้อนการเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับน้ำหนักของเครื่องจำลองการสั่นโดยใช้คำสั่ง *BOUNDARY_PRESCRIBE_MOTION_RIGID โดยมีสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ดังนี้

$$x(t) = A_1 \sin(360 * f_1 * t) + A_2 \sin(360 * f_2 * t) + A_3 \sin(360 * f_3 * t) \quad (3.1)$$

ข. วิเคราะห์หาความเค้นที่ผิวของมะม่วงบรรจุโฟมหนา 4.5 มม. และไม่ได้บรรจุ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 4 ทำการวิเคราะห์แบบ Implicit Dynamic จำลองการสั่นสะท้อนตามข้อมูลป้อนสมการรูปไซน์ที่แอมพลิจูดมากที่สุดในแต่ละสภาพผิวถนนดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ความเค้นที่ผิวของผลมะม่วงหุ้มโฟมและไม่ได้หุ้มโฟม

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลค่า PSD ในแต่ละสภาพถนน

ถนน	f_n และ A_n	ลำดับความถี่การสั่น		
		n		
		1	2	3
หลวง	f (Hz)	2.00	6.00	8.40
แผ่นดิน	A (mm)	1.76	0.09	0.07
หลวง	f (Hz)	2.00	5.87	8.13
เทศบาล	A (mm)	3.87	0.23	0.13
หลวง	f (Hz)	2.00	6.00	8.40
ชนบท	A (mm)	5.80	0.28	0.19

f_n คือความถี่ที่ n=1, 2, 3

A_n คือแอมพลิจูดที่ n=1, 2, 3

3.3 การจำลองการขนส่ง

การจำลองการขนส่งนี้ทำได้โดยเครื่องจำลองการสั่นสะเทือน ที่ความถี่คงที่ 2.0 Hz เขย่าผลมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุโฟมในลังพลาสติกขนาดมาตรฐาน

จะเกิดขึ้นสูงที่สุดในเส้นทางหลวงชนบท รองลงมาคือทางหลวงเทศบาล และทางหลวงแผ่นดิน ตามลำดับ ซึ่งแอมพลิจูดสูงสุดมีค่า 5.8 mm เกิดที่เส้นทางหลวงชนบท ที่ความดันลมยาง 35 psi และต่ำสุดมีค่า 0.05

ตารางที่ 2 แสดงการเก็บข้อมูลค่า PSD ในแต่ละสภาพผิวถนน

ชนิดของถนน	ความดันลมยาง (psi)	ความถี่ (f) และแอมพลิจูด (A)					
		f (Hz)	A (mm)	f (Hz)	A (mm)	f (Hz)	A (mm)
ทางหลวงชนบท	35	2.00	5.800	6.00	0.280	8.40	0.190
	40	2.00	4.300	6.13	0.270	8.67	0.210
	45	2.00	2.620	5.73	0.280	8.27	0.050
ทางหลวงเทศบาล	35	2.00	3.870	5.87	0.230	8.13	0.130
	40	2.13	2.570	5.87	0.200	8.13	0.170
	45	2.00	2.100	6.13	0.180	8.30	0.090
ทางหลวงแผ่นดิน	35	2.00	1.760	6.00	0.090	8.40	0.072
	40	2.00	1.640	6.00	0.140	8.40	0.090
	45	2.00	1.610	5.73	0.120	8.53	0.050

ซึ่ง มีปริมาณน้ำหนักรวมในแต่ละลังเท่ากับ 5 kg เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 7 วันแล้วนำมาตรวจดูความเสียหาย โดยความเสียหายจะพิจารณาจากความกว้างมากที่สุดที่ผิว ระบุความเสียหายโดยใช้ตัวบ่งชี้ระดับ 1-5 ดังนี้ ขนาดตั้งแต่ 1-3 มม. = 1, 4-9 มม. = 2, 10-15 มม. = 3, 16-20 มม. = 4 และ 21 มม.ขึ้นไป. =5

4. ผลการวิจัย

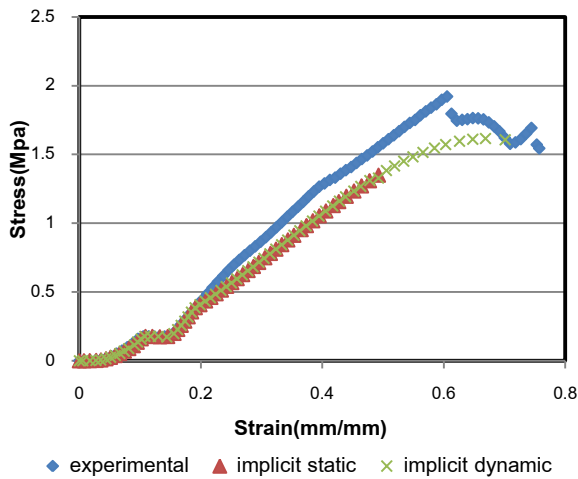
4.1 การเก็บข้อมูลค่า PSD จากสภาพผิวถนน

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลค่า PSD ของในแต่ละสภาพผิวถนน ที่ระดับความดันลมยาง 3 ระดับ พบว่าได้ค่า PSD และแอมพลิจูดดังนี้ ช่วงแรก ค่า PSD จะอยู่ในช่วง 2.0 - 2.13 Hz ช่วงที่สอง ความถี่จะอยู่ในช่วง 5.73 - 6.13 Hz และช่วงสุดท้าย ค่าความถี่อยู่ในช่วง 8.13 - 8.67 Hz ซึ่งค่าความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าความดันลมยางและในแต่ละสภาพถนนนั้นจะไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับความดันและค่า PSD ส่วนค่าแอมพลิจูด

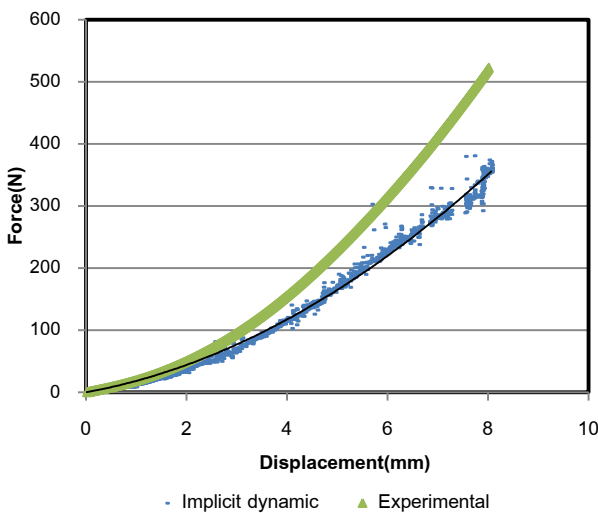
mm เกิดที่เส้นทางหลวงแผ่นดิน ที่ความดันลมยาง 45 psi ดังแสดงในตารางที่ 2

4.2 การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกล

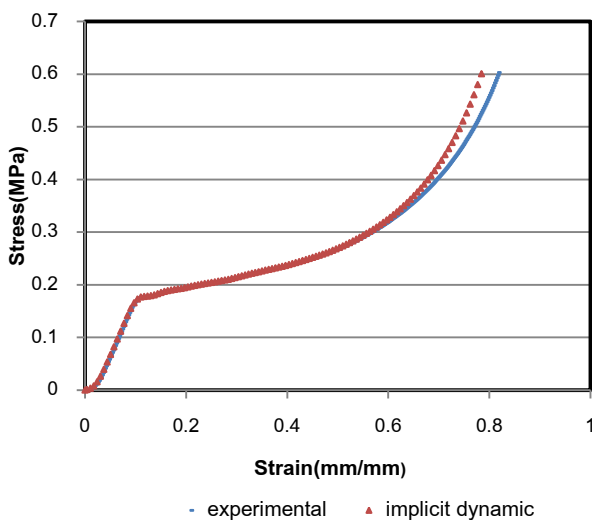
ทดสอบการอัดแบบสถิตย์ของชิ้นมะม่วงทดสอบและผลมะม่วงทดสอบแล้วเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แบบ Implicit Static และ Implicit Dynamic ดังรูปที่ 5 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับการทดลองเมื่อวิเคราะห์โดยวิธี Implicit Dynamic ใกล้เคียงกว่าแบบ Implicit Static และเมื่อวิเคราะห์การอัดผลมะม่วงเปรียบเทียบกับการทดลองพบว่ามีความผิดพลาดไม่เกิน 30 % ดังแสดงในรูปที่ 6 การทดสอบอัดชิ้นโฟมทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Implicit dynamic ดังรูปที่ 7 พบว่าคลาดเคลื่อนประมาณ 2.6 เปอร์เซ็นต์และเมื่อวิเคราะห์การสั่นของโฟมติดมวลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับทดสอบโดยเครื่องจำลองการสั่นได้ความคลาดเคลื่อนของแอมพลิจูด 36 % และความถี่ 1% ดังรูปที่ 8



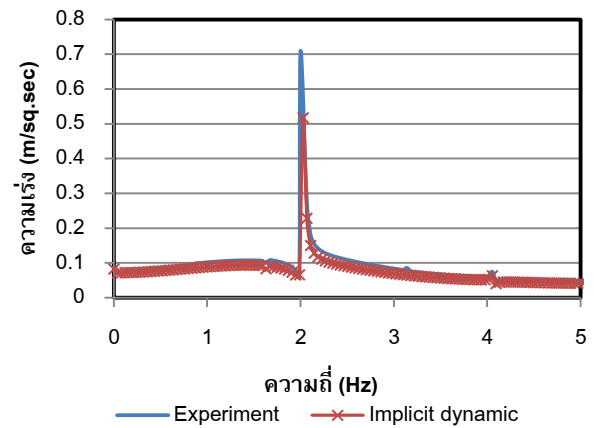
รูปที่ 5 เปรียบเทียบการอัดขึ้นมะม่วงทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการอัดผลมะม่วงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



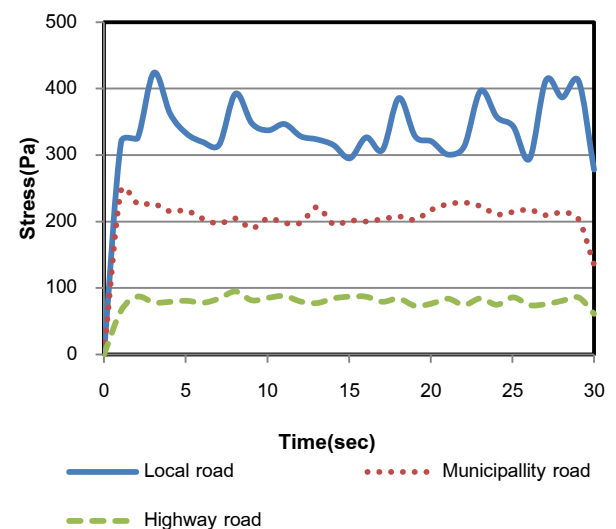
รูปที่ 7 เปรียบเทียบการอัดโฟมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



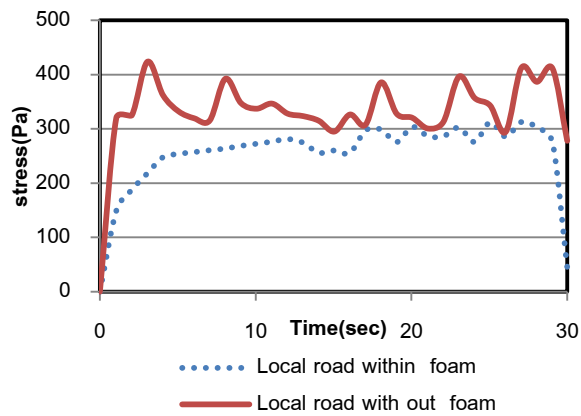
รูปที่ 8 เปรียบเทียบการสั่นของมวลติดโฟมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3 การวิเคราะห์หาความเค้นที่ผิวของมะม่วง

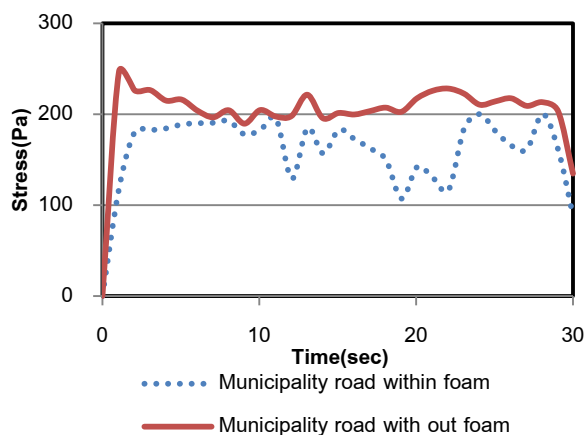
ในการวิเคราะห์หาความเค้นที่ผิวของมะม่วงนี้ เป็นการประเมินความเสียหายอันเนื่องมาจากความเค้นจากการสั่นสะเทือนของผลมะม่วงที่ไม่ได้บรรจุโฟม ที่ผิวถนนซึ่งมีค่าแอมพลิจูดสูงจะเกิดความเค้นเนื่องจากการสั่นมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 9 ส่วนหากบรรจุโฟมก็สามารถลดค่าความเค้นที่ผิวลงได้อีก รูปที่ 10 11 และ 12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเค้นที่ผิวของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุ เมื่อรองรับการสั่นของสภาพผิวถนนทางหลวงชนบท ถนนเทศบาล และถนนทางหลวงแผ่นดิน พบว่าความเค้นลดลงประมาณ 26.32 18.85 และ 6.14 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



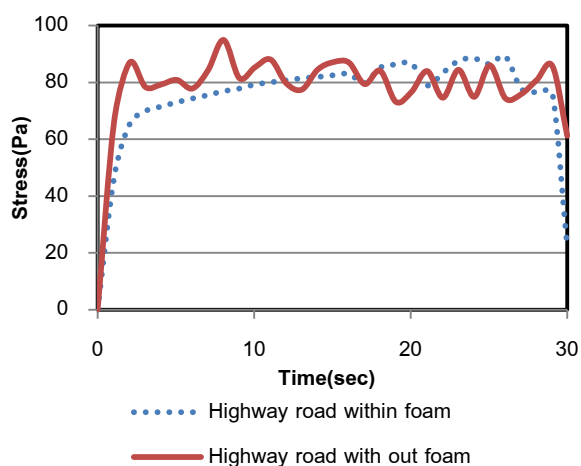
รูปที่ 9 เปรียบเทียบความเค้นที่ผิวในแต่ละสภาพถนน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุของทางหลวงชนบท



รูปที่ 11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุของทางหลวงเทศบาล



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุของทางหลวงแผ่นดิน

4.4 ทดลองการจำลองการขนส่งของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุโฟม

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ความถี่คงที่ 2.0 Hz ทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากทดสอบแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 7 วัน เกิดรอยชำรุดผิวเนื่องจากความเค้นจากการสั่นสะเทือน วัดระดับความเสียหายมากที่สุดที่ระดับ 4 และ เมื่อบรรจุโฟมสามารถลดรอยชำรุดลงได้ระดับที่ 2 ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงความชำรุดของมะม่วงบรรจุโฟมและไม่ได้บรรจุโฟม

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 การเก็บข้อมูลค่า PSD

จากการทดลองเก็บข้อมูลสภาพผิวถนนพบว่าค่า PSD ในแต่ละสภาพผิวถนนนั้นไม่ต่างกันมาก แต่ค่าแอมพลิจูดนั้นแปรผกผันกันระหว่างความดันลมยางและค่าความถี่ จะสังเกตได้ว่าค่าแอมพลิจูดมากที่สุดเมื่อความดันลมยาง 35 psi

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ผิวของมะม่วงบรรจุโฟมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไม่ได้บรรจุโฟมกับความเสียหายจากการจำลองการขนส่ง

เมื่อทำการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามข้อมูลสมการป้อนของทั้งสามพื้นผิวถนนที่ความดันลมยางต่ำนั้น ความเค้นที่ได้มากที่สุดแปรผันตรงกับแอมพลิจูดของการสั่นที่ความถี่หลักของผิวถนน และมีความสัมพันธ์อย่างสอดคล้องระหว่างความเค้นกับความเสียหายจากการทดลองจริงของมะม่วงหุ้มโฟมและไม่ได้หุ้ม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุน
ทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสงค์ อิงสุวรรณ 2535. *การสั่นสะเทือนเชิงกล*.
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] Singiresu, S. Rou. 2005. *Mechanica Vibration*,
SI ed. Singapore: Prentice-Hall, Inc.
- [3] G. L. Barchi., et al., "*Damage to Loquats by
Vibration-simulating Intra-state
Transport*", Biosystems Engineering, 82
(3), pp.305–312, 2002
- [4] K. Alibas., et al., "*Mechanical Damage to Apple
during Transport in wooden crate*", Biosystem
Engineering, 96(2) 4, pp.239–248, 2006
- [5] Ran Zhou, et al., "*Effect of transport vibration
levels on mechanical damage
and physiological responses of Huanghua
pears (Pyrus pyrifolia Nakai, cv.
Huanghua)*", Postharvest Biology and
Technology, 46, pp.20–28, 2007
- [6] Bundit Jarimopas., "*Post-harvest damage and
performance comparison of Sweet
Tamarind packaging*", Journal of Food
Engineering, 88, pp.193–201, 2008
- [7] Edward Dintwa., "*Finite element analysis of the
dynamic collision of apple
Fruit*", Postharvest Biology and Technology, 49,
pp.260–276, 2008