การหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

Determination of Elastic Constants of Composites by Using Line-focus Transducer

ปกรณ์ ปรีชาบูรณะ และ มนู เฟื่องฟุ้ง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

ศุภลักษณ์ อำลอย

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง พัทลุง 93110

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตร มอดูลัสเฉือน มอดูลัสของยัง และอัตราส่วนของปัวส์ซองของวัสดุสามารถหาได้จากแบบจำลองการวัด TRLFAM ซึ่งหลักการนี้ขึ้นอยู่กับการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการทดลองกับสัญญาณที่คำนวณขึ้นจากแบบจำลองจนกระทั่งค่าเบี่ยงเบนของเวลาหน่วงมีค่าน้อยที่สุด ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นนี้กับสเตนเลสสตีล ซึ่งใช้เป็นวัสดุมาตรฐานและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากการผสมกาวอีพ็อกซีกับผงทังสเตน ผลของค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือนของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Devaney และ Levine

คำสำคัญ: ค่าคงที่ยืดหยุ่น แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

Abstract

This paper presents the determining of the elastic constants of composites by using line-focus transducer. Bulk modulus, shear modulus, Young's modulus and Poisson's ratio of materials are determined from time-resolved line-focus acoustic microscopy (TRLFAM) measurement model. The principle is based on the comparison between measured and calculated waveforms until the deviation of time-delays is minimized. The method has been applied to determine elastic constants of stainless steel used as standard material and

composites prepared by mixing epoxy resin and tungsten power. The bulk modulus and shear modulus of composites are in good agreement with the results from Devaney and Levine model.

Key words: elastic constants, line-focus transducer

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้วัสดุคอมโพสิต (composites) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและด้านการแพทย์ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีข้อดีคือสามารถเปลี่ยนสมบัติของวัสดุตามที่ผู้ใช้ต้องการได้ง่าย ด้วยการเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาผสมกัน ตัวอย่างเช่น การเติมวัสดุที่เป็นยางลงไปในวัสดุพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น การเติมผงเงินลงในวัสดุพอลิเมอร์เพื่อให้มีสมบัติการนำไฟฟ้า และการเติมผงทังสเตนลงในกาวอีพ็อกซีเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิตโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์พอลิเมอร์ (polymer matrix composites) ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างวัสดุพอลิเมอร์กับผงของของแข็ง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของความยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้ ได้แก่ วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีทังสเตน วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีอลูมินา และวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีแกรไฟต์ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุที่นำมาผสม [1, 2] แต่งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีความคิดที่จะทำวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้ใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากทฤษฎี

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ผู้วิจัยได้สร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสและใช้ประยุกต์หาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุ จำพวกโลหะและแก้ว ได้แก่ สเตนเลสสตีล เหล็ก อลูมิเนียมและ แผ่นกระจก ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถกระตุ้นให้เกิดคลื่นเรย์ลีได้ง่าย จากนั้นจะใช้วิธีดีโฟกัสซิง (defocusing technique) เพื่อวัดค่าอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี และใช้วิธีสัญญาณพัลส์-สัญญาณสะท้อน (pulse-echo technique) เพื่อวัดอัตราเร็วของคลื่นตามยาวของวัสดุ เมื่อทราบค่าอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีและอัตราเร็วของคลื่นตามยาวแล้ว ก็สามารถคำนวณหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุได้แก่ ค่ามอดูลัสของยัง มอดูลัสเฉือน มอดูลัสเชิงปริมาตร และอัตราส่วนของปัวส์ซองได้ [3, 4]

ส่วนวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีน้อยกว่า 2720 m/s จึงไม่สามารถหาค่าคงที่ยืดหยุ่นโดยใช้คลื่นเรย์ลีและวิธีดีโฟกัสซิงได้ เนื่องจากมุมวิกฤตของเรย์ลี (Rayleigh critical angle) ของวัสดุคอมโพสิตเหล่านี้มีค่ามากกว่า 32 องศา ซึ่งมากกว่ามุม Θ_M (aperture angle) ของแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดคลื่นเรย์ลีบนวัสดุคอมโพสิตนี้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยวิธีการที่เรียกว่า TRLFAM (Time-Resolved Line-Focus Acoustic Microscopy) [5] เพื่อหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตแทน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากการผสมกาวอีพ็อกซีกับผงทังสเตน แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าที่คำนวณจากแบบจำลองของ Devaney และ Levine

3. แบบจำลองการวัด TRLFAM

หลักการของแบบจำลองการวัด TRLFAM ก็คือการจำลองสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส ($v(t,z)$) โดยสัญญาณเอาท์พุตนี้สามารถหาได้จากผลการแปลงฟูเรียร์แบบผกผันระหว่างสเปกตรัมของรูปคลื่นต้นกำเนิด ($s(f)$) และฟังก์ชันการถ่ายโอน(transfer function, $h(f,z)$) ของระบบการวัด [5] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v(t,z) = \mathrm{FFT}^{-1}\{s(f)h(f,z)\} \qquad (1)$$

3.1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ ($h(f,z)$) เป็นฟังก์ชันที่ใช้แทนระบบการวัด ซึ่งประกอบไปด้วยแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส ตัวกลางของคลื่นที่เป็นน้ำและวัสดุที่ต้องการหาค่าคงที่ยืดหยุ่น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h(f,z) = \int_0^{\theta_M} R(f,\theta) e^{i(4\pi f/V_w)z\cos\theta} d\theta \qquad (2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่

V_w คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงในน้ำ

z คือ ระยะดีโฟกัสซิง

$R(f,\theta)$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ซึ่งมีลักษณะดังนี้

$$R(f,\theta) = \frac{i\left(N^2 - M^2 - 1\right)}{2M + i\left(N^2 - M^2 + 1\right)} \qquad (3)$$

เมื่อ

$$N = \frac{V_L}{V_w}\frac{\rho_c}{\rho_w}\frac{\cos\theta}{\cos\theta_L}\frac{\cos^2 2\theta_T}{\sin\left(\frac{2\pi f d\cos\theta_L}{V_L}\right)} + \frac{V_T}{V_w}\frac{\rho_c}{\rho_w}\frac{\cos\theta}{\cos\theta_T}\frac{\cos^2 2\theta_T}{\sin\left(\frac{2\pi f d\cos\theta_T}{V_T}\right)}$$

$$M = \frac{V_L}{V_w}\frac{\rho_c}{\rho_w}\frac{\cos\theta}{\cos\theta_L}\frac{\cos^2 2\theta_T}{\tan\left(\frac{2\pi f d\cos\theta_L}{V_L}\right)} + \frac{V_T}{V_w}\frac{\rho_c}{\rho_w}\frac{\cos\theta}{\cos\theta_T}\frac{\cos^2 2\theta_T}{\tan\left(\frac{2\pi f d\cos\theta_T}{V_T}\right)}$$

V_L และ V_T คือ อัตราเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในวัสดุคอมโพสิตตามลำดับ

ρ_c และ ρ_w คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตและน้ำ

f คือ ความถี่

d คือ ความหนาของวัสดุคอมโพสิต

θ คือ มุมตกกระทบของคลื่นเสียง

θ_T และ θ_L คือ มุมหักเหของคลื่นตามขวางและคลื่นตามยาวในวัสดุคอมโพสิตตามลำดับ

3.2 การหารูปคลื่นต้นกำเนิด

การจำลองสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสให้ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดนั้น จะทำให้ค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุที่หาจากวิธี TRLFAM มีความคลาดเคลื่อนน้อย เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) ซึ่งใช้จำลองสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสจะเห็นว่าถ้าต้องการผลการจำลองที่ดี ต้องมีรูปคลื่นต้นกำเนิดที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการหารูปคลื่นต้นกำเนิดโดยเริ่มจากการให้ แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส ซึ่งเป็นแทรนสดิวเซอร์แบบเดียวกับที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [3] วัดสัญญาณจากวัสดุที่มีผิวหน้าเรียบมาก ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นกระจกเป็นวัสดุดังกล่าว จากนั้นทำการปรับค่าตัวแปรในสมการที่ใช้เป็นแบบจำลองแทนรูปคลื่นต้นกำเนิดในโดเมนของเวลา ($s(t)$) ดังสมการที่ (4) จนลักษณะของสัญญาณทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด แล้วใช้

ผลการแปลงฟูเรียร์เพื่อให้ได้สเปกตรัมของรูปคลื่นต้นกำเนิดในโดเมนของความถี่ ($s(f)$) ตามที่ต้องการ

$$s(t) = A\cos(2\pi f_0 t)e^{\frac{-(t-T_C)^2}{2\sigma^2}} \qquad (4)$$

เมื่อ A, T_C , σ และ f_0 เป็นตัวแปรที่ผู้วิจัยจะต้องปรับค่าจนสัญญาณที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณจากการทดลอง และได้แสดงรูปคลื่นต้นกำเนิดที่หาได้ในรูปที่ 1

4. การหาค่าคงที่ยืดหยุ่น

การหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุโดยวิธี TRLFAM เป็นวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical simulation) โดยการจำลองสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสแล้วปรับค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองไปเรื่อย ๆ จนสัญญาณที่ได้มีความเหมือนกับสัญญาณจากการทดลอง (ได้ใช้ระบบการวัดสัญญาณตามรูปที่ 2) ก็จะได้ค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุซึ่งเป็นค่าสุดท้ายที่ใส่เข้าไปในแบบจำลอง ทั้งนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากสมการที่ (3) โดยเริ่มเดาค่า V_L และ V_T ของวัสดุก่อน

2. คำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ $h(f,z)$ โดยใช้สมการที่ (2)

3. คำนวณหาสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสโดยใช้สมการที่ (1)

4. เปรียบเทียบสัญญาณจากข้อ 3. กับผลการทดลองที่ได้แล้วหาค่าการเบี่ยงเบน (deviation, D) ระหว่างสัญญาณทั้งสองจากสมการ

$$D = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|\frac{t_n^{(c)} - t_n^{(m)}}{t_n^{(m)}}\right| \qquad (4)$$

เมื่อ $t_n^{(c)}$ และ $t_n^{(m)}$ คือ ผลต่างของเวลาหน่วงระหว่างพัลส์สัญญาณ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองตามลำดับ

N คือ จำนวนข้อมูล

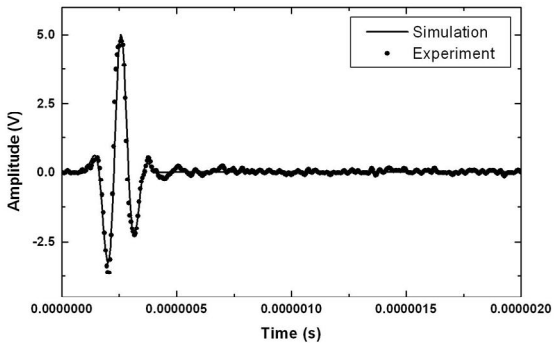
5. ตรวจสอบค่าการเบี่ยงเบนต้องมีค่าน้อยที่สุด เพื่อยืนยันความเหมือนของสัญญาณที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขกับสัญญาณจากการทดลอง ถ้าค่าเบี่ยงเบนมีค่าน้อยสุดแล้วจะได้ค่า V_L และ V_T ของวัสดุ ถ้าค่าเบี่ยงเบนไม่ใช่ค่าน้อยสุดให้กลับไปทำที่ข้อ 1. โดยปรับค่า V_L และ V_T ใหม่

6. คำนวณหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุโดยใช้สมการในเอกสารอ้างอิง [4]

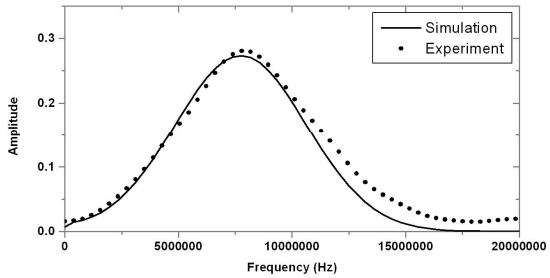
ทั้งนี้ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งหมดเพื่อจำลองสัญญาณเอาท์พุตจากแทรนสดิวเซอร์ไลน์-ฟัสที่ทำในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรม Mathcad รุ่น 14.0 ในการคำนวณ

5. ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้หาค่าคงที่ของวัสดุไอโซ-ทรอปิก โดยใช้สเตนเลสสตีลเป็นวัสดุทดสอบความถูกต้องของผลการวัดค่าคงที่ยืดหยุ่นด้วยวิธี TRLFAM เนื่องจากผู้วิจัยทราบค่าคงที่ยืดหยุ่นมาตรฐานของสเตนเลสสตีลจากเอกสารอ้างอิง [6] และยังมีข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุด้วยวิธีดีโฟกัสซิง [4] เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ ส่วนวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำนวน 5 ชิ้น ได้เตรียมขึ้นจากการผสมกาวอีพ็อกซีของบริษัท Loctite รุ่น EPX-1 กับผงทังสเตนของบริษัท Scharlau ที่สัดส่วนโดยปริมาตรของผงทังสเตนต่อกาวอีพ็อกซีเท่ากับ 0 % 5.5 % 11% 16.5 % และ 22% ตามลำดับ

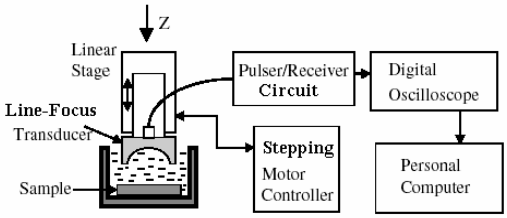


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 รูปคลื่นต้นกำเนิดใน (ก) โดเมนของเวลา (ข) โดเมนของความถี่



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงระบบวัดค่าคงที่ยืดหยุ่นโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

และได้แสดงค่าความหนาแน่นกับความหนาของวัสดุในตารางที่ 1 จากนั้นจึงหาอัตราเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่เกิดขึ้นในสเตนเลสสตีลและวัสดุคอมโพสิตทั้ง 5 ชิ้น โดยวิธี TRLFAM (ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4) ที่ระยะดีโฟกัสเท่ากับ 1.5 2.0 และ 2.5 mm ได้แสดงผลการทดลองของสเตนเลสสตีลและวัสดุคอมโพสิตไว้ในรูปที่3 และรูปที่ 4 ถึง 8 ตามลำดับและได้สรุปค่าคงที่ยืดหยุ่นไว้ในตารางที่ 2

ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตสามารถเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของ Devaney และ Levine ซึ่งสามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือนของวัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากการผสมระหว่างวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์กับผงของของแข็งดังแสดงในสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ [1]

$$K = K_1 + V_2 \frac{(3K+4G)(K_2-K_1)}{3K+4G+3(K_2-K_1)} \tag{5}$$

$$G = G_1 + V_2 \frac{5(3K+4G)G(G_2-G_1)}{(15K+20G)G+6(K+2G)(G_2-G_1)} \tag{6}$$

เมื่อ K และ G คือ ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือนของวัสดุผสม

K_1 G_1 และ V_1 คือ ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรมอดูลัสเฉือนและสัดส่วนปริมาตรของกาวอีพ็อกซี

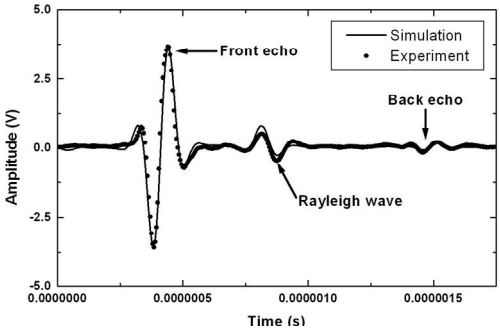
K_2 G_2 และ V_2 คือ ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรมอดูลัสเฉือนและสัดส่วนปริมาตรของผงทังสเตน

จากนั้นหาค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมจากสมการ

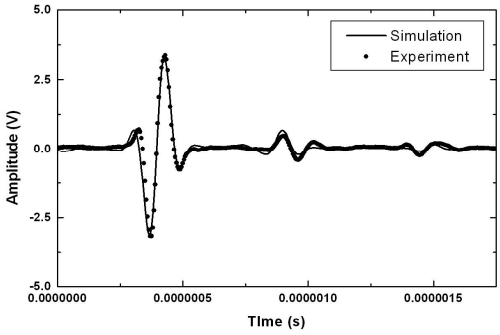
$$\rho = V_1\rho_1 + V_2\rho_2$$

เมื่อ ρ_1 และ ρ_2 คือ ความหนาแน่นของกาวอีพ็อกซีและทังสเตนตามลำดับ

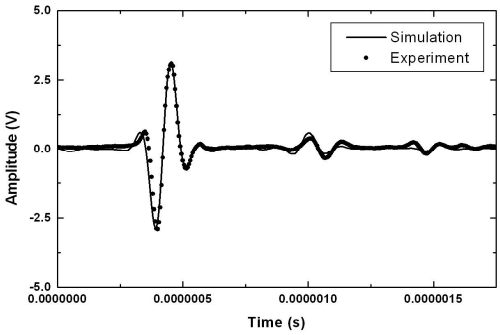
ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือน ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Devaney และ Levine และที่ได้จากผลการทดลองด้วยวิธี TRLFAM แสดงไว้ในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลจากทฤษฎีกับผลการทดลอง



(ก)

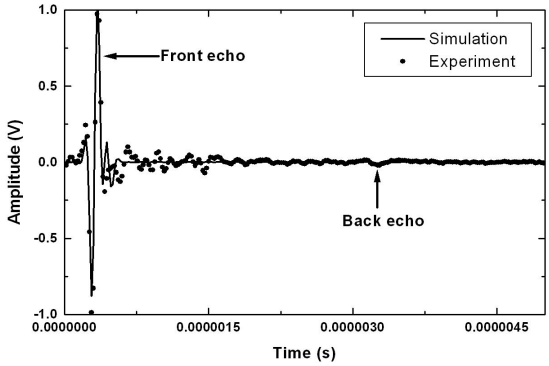


(ข)

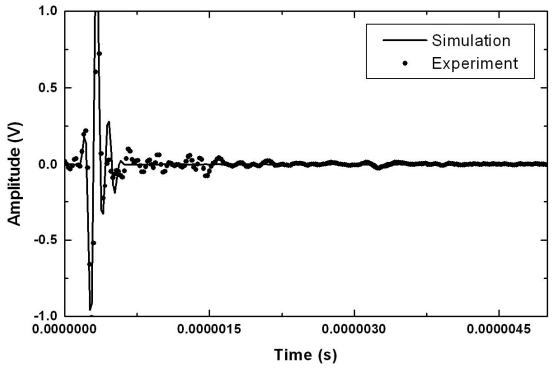


(ค)

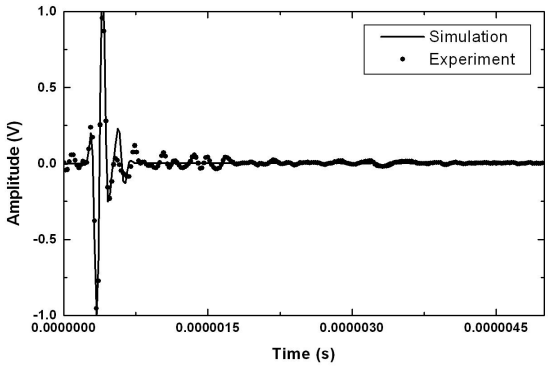
รูปที่ 3 ผลการทดลองของสเตนเลสสตีล (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



(ก)

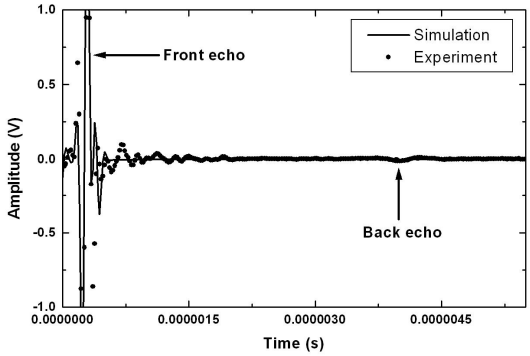


(ข)

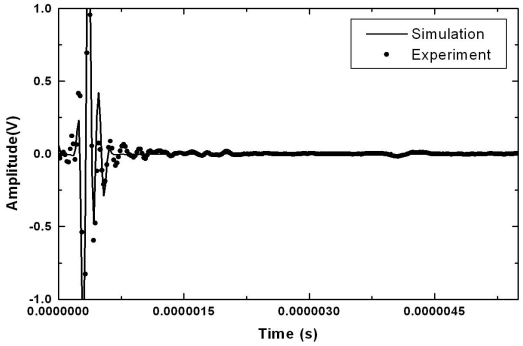


(ค)

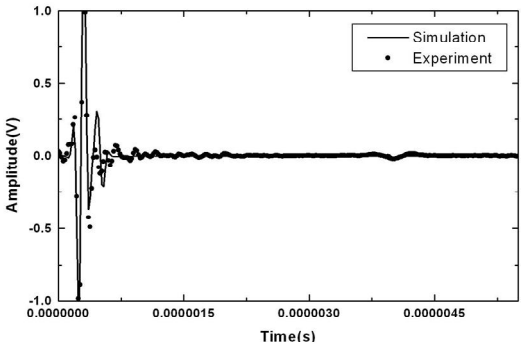
รูปที่ 4 ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 0% (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



(ก)

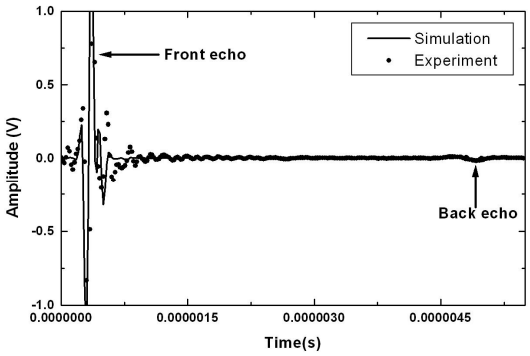


(ข)

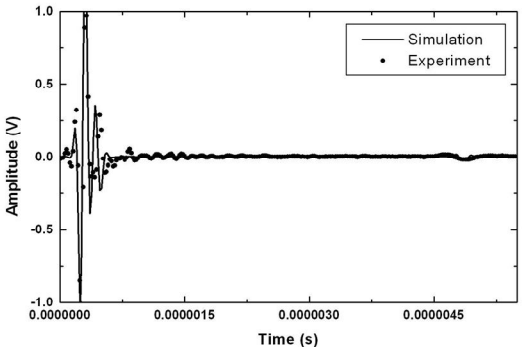


(ค)

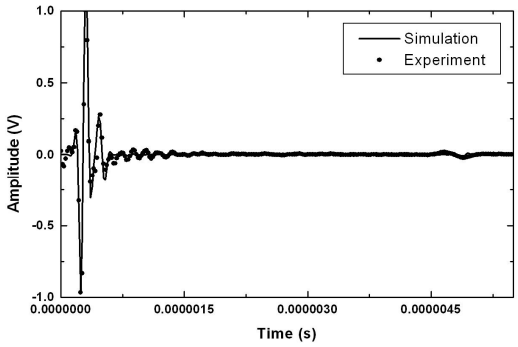
รูปที่ 5 ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 5.5% (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



(ก)

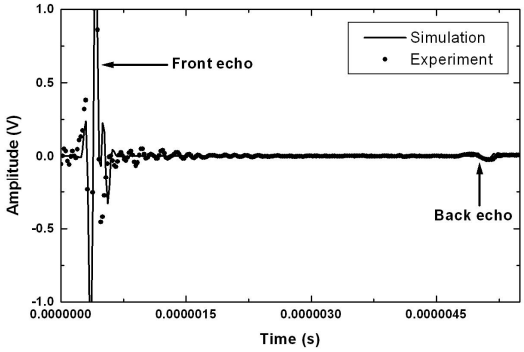


(ข)

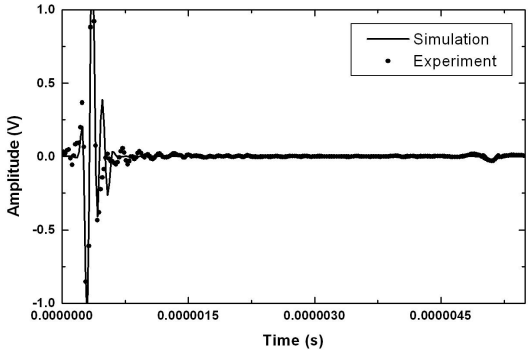


(ค)

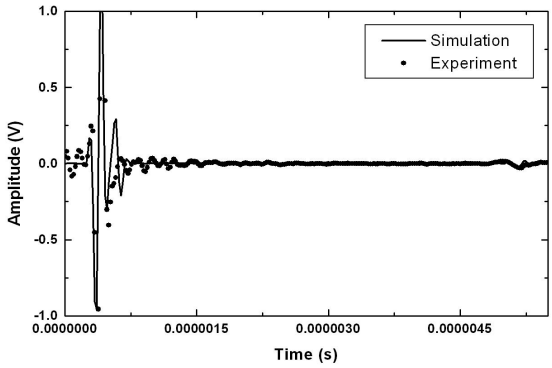
รูปที่ 6 ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 11% (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



(ก)

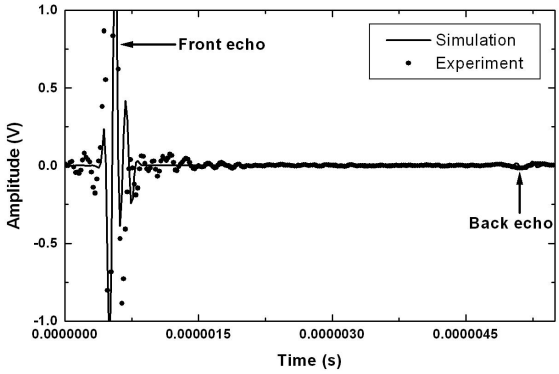


(ข)

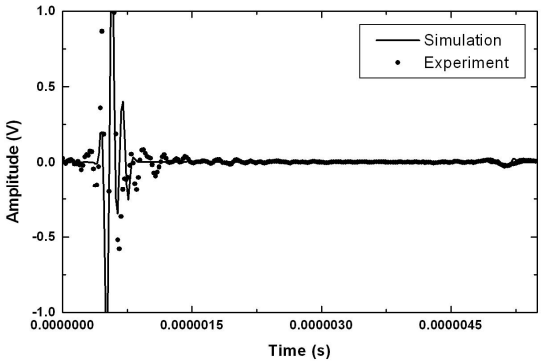


(ค)

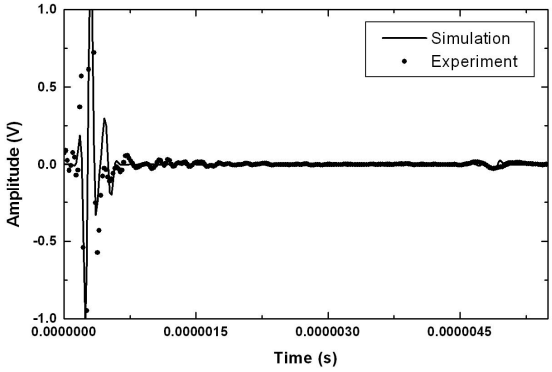
รูปที่ 7 ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 16.5% (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



(ก)

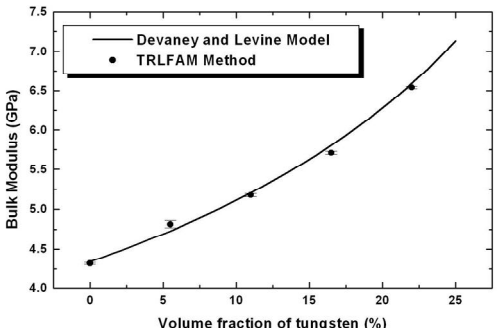


(ข)

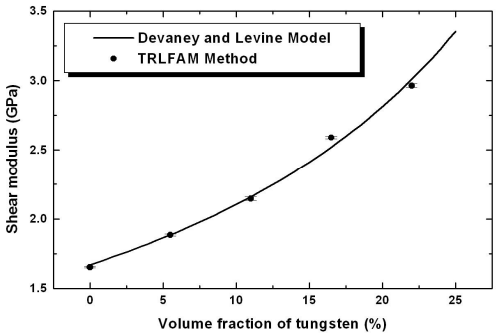


(ค)

รูปที่ 8 ผลการทดลองของวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 22% (ก) z = 1.5 mm (ข) z = 2.0 mm (ค) z = 2.5 mm



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรของวัสดุคอมโพสิต ที่ได้จากทฤษฎีกับผลการทดลอง



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสเฉือนของวัสดุคอมโพสิต ที่ได้จากทฤษฎีกับผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นกับความหนาของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ความหนาแน่น $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	ความหนา (mm)
<u>วัสดุทดสอบ</u>		
สเตนเลสสตีล	7790	3.14
<u>วัสดุคอมโพสิต</u>		
ทังสเตน 0%	1167	3.40
ทังสเตน 5.5%	2123	3.30
ทังสเตน 11%	3259	3.41
ทังสเตน 16.5%	4253	3.50
ทังสเตน 22%	4998	3.27

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุ

วัสดุ	**ค่าคงที่ยืดหยุ่น (GPa)**			**อัตราส่วนปัวส์ซอง**	**ที่มาของข้อมูล**
	K	***G***	***E***		
<u>วัสดุทดสอบ</u>					
สเตนเลสสตีล	162.5	78.7	203.3	0.292	วิธี TRLFAM
	162.7	84.0	214.9	0.280	วิธีดีโฟกัสซิง[4]
	166.0	83.9	215.3	0.293	ค่ามาตรฐาน[6]

วัสดุ	ค่าคงที่ยืดหยุ่น (GPa)			อัตราส่วนปัวส์ซอง	ที่มาของข้อมูล
	K	*G*	*E*		
<u>วัสดุคอมโพสิต</u>					
ทังสเตน 0%	4.32	1.65	4.40	0.331	วิธี TRLFAM
	4.34	1.67	-	-	แบบจำลองของ Devaney และ Levine
ทังสเตน 5.5%	4.81	1.88	5.01	0.327	วิธี TRLFAM
	4.73	1.89	-	-	แบบจำลองของ Devaney และ Levine
ทังสเตน 11%	5.18	2.15	5.66	0.318	วิธี TRLFAM
	5.21	2.16	-	-	แบบจำลองของ Devaney และ Levine
ทังสเตน 16.5%	5.71	2.59	6.75	0.303	TRLFAM
	5.81	2.52	-	-	แบบจำลองของ Devaney และ Levine
ทังสเตน 22%	6.54	2.96	7.73	0.303	วิธี TRLFAM
	6.59	3.01	-	-	แบบจำลองของ Devaney และ Levine

5. สรุปผล

จากผลของการวัดค่าคงที่ยืดหยุ่นของสเตนเลสสตีล พบว่าวิธี TRLFAM สามารถใช้หาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุได้ ซึ่งผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับวิธีดีโฟกัสซิง และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธี TRLFAM กับค่ามาตรฐานพบว่ามีความแตกต่างของค่ามอดูลัสเชิงปริมาตร มอดูลัสเฉือน มอดูลัสของยังและอัตราส่วนของปัวส์ซองประมาณ 2 % 6 % 6 % และ 0.3 % ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตกับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากแบบจำลองของ Devaney และ Levine พบว่าค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือนของวัสดุคอมโพสิตทั้ง 5 ชิ้นมีความแตกต่างกับค่าจากทฤษฎีมากที่สุดไม่เกิน 2 % และ 3 % ตามลำดับโดยค่าความแตกต่างที่มากที่สุดของทั้งค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรและมอดูลัสเฉือนนั้นมาจากวัสดุคอมโพสิตที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของผงทังสเตนเท่ากับ 16.5 % ผู้วิจัยคาดว่าอาจเกิดจากขั้นตอนการเตรียมที่ทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของผงทังสเตนคลาดเคลื่อนจากสัดส่วนที่ต้องการ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ประเภทบุคคล) ประจำปี 2550 และผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือสำหรับใช้ในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Haifeng, W., Tim, R., Wenwu, C. and Kirk, S., High Frequency Properties Passive Mate-rials for Ultrasonic Transducers, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., Vol. 48, pp. 78-84, 2001.

[2] Pal, R., New Models for Effective Young's Modulus of Particular Composites, Compo-sites: Part B, Vol. 36, pp. 513-523, 2005.

[3] Preechaburana, P., Rattanathammapan, K., Amloy, S., Fuangfoong, M. and Eaiprasertsak, K., The Construction of PVDF Lens-Less Line-Focus Transducer, Laos Journal on Applies Science, Vol. 1, pp. 183-188, 2006.

[4] Preechaburana, P., Amloy, S., Fuangfoong, M. and Eaiprasertsak, K., The Measurement of Elastic Modulus of Materials by Using Lens-Less Line-Focus Transducer, Laos Jour-nal on Applies Science, Vol. 1, pp. 189-196, 2006.

[5] Li, W. and Achenbach, Jan. D., Determination of Elastic Constants by Time-Resolved Line-Focus Acoustic Microscopy, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., Vol 44, pp. 681-687, 1997.

[6] Kaye, G. W. C. and Laby, T. H., Tables of Physical and Chemical Constants., Longman, New York, 1986.