

อิทธิพลของการวางตัวของเส้นใยสานต่อความหน่วงการสั่นสะเทือนทางวัสดุใน วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง

The Influence of Ply Orientation of Woven Fiber on Material Damping in Fiber-Reinforced Composites

สนติพีร์ เอ็มมณี^{1*} เอกชัย คล้ายวงศ์วาลย์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*E-mail: sontipee.aim@kmutt.ac.th

Sontipee Aimmanee^{1*} Ekkachai Klaiwongwan¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thung-kru, Bangkok 10140

*E-mail: sontipee.aim@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของการวางตัวของเส้นใยสานที่มีต่อความหน่วงการสั่นสะเทือนทางวัสดุในวัสดุคอมโพสิตเสริมแรง ซึ่งในกระบวนการทดสอบจะใช้ชิ้นงานที่มีการวางตัวของเส้นใยแก้ว 4 รูปแบบได้แก่ เส้นใยสานในทิศทาง (0°,90°) จำนวน 12 ชั้น, เส้นใยสานในทิศทาง (±45°) จำนวน 12 ชั้น, เส้นใยสานในทิศทาง (0°,90°) วางเรียงอยู่ตรงกลางจำนวน 6 ชั้นและประกบด้านบนด้านล่างด้วยเส้นใยสานในทิศทาง (±45°) จำนวนด้านละ 3 ชั้น, และเส้นใยสานในทิศทาง (±45°) วางเรียงอยู่ตรงกลางจำนวน 6 ชั้นและประกบด้านบนด้านล่างด้วยเส้นใยสานในทิศทาง (0°,90°) จำนวนด้านละ 3 ชั้น ชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบนี้ซึ่งอยู่ในลักษณะของโครงสร้างคานยึดปลายแน่นแบบคู่ (double cantilever beam) จะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาความหน่วงการสั่นสะเทือนทางวัสดุในรูปของตัวประกอบการสูญเสีย (loss factor) โดยใช้วิธีการป้อนสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่มให้กับชิ้นงาน จากผลการทดสอบพบว่าค่าตัวประกอบการสูญเสียขึ้นอยู่กับลักษณะการวางตัวของเส้นใยและมีความสัมพันธ์อย่างเป็นระบบกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานโดยที่ค่าตัวประกอบการสูญเสียมีค่าลดลงเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลจากการทดสอบซึ่งแสดงถึงความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานในโดเมนความถี่ยังสามารถนำมาคำนวณเพื่อทำนายค่าโมดูลัสการสะสม (storage modulus) ของวัสดุคอมโพสิตทั้ง 4 รูปแบบได้ การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสการสะสมเนื่องจากรูปแบบการวางเส้นใยที่แตกต่างกันเป็นไปในทิศทางที่จะตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบการสูญเสียที่เกิดขึ้น

คำหลัก ความหน่วงการสั่นสะเทือน, วัสดุคอมโพสิตเสริมแรง, ตัวประกอบการสูญเสีย, โมดูลัสการสะสม

Abstract

The purpose of this paper is to study influences of ply orientation of woven fiber on material damping in fiber reinforced composite. Four types of ply orientation of E-glass woven fiber, as the reinforcement, are used in composite specimens, i.e. all 12 layers of (0°,90°), all 12 layers of (±45°), six layers of (0°,90°) sandwiched between two sets of three layers of (±45°), and six layers of (±45°) sandwiched between two sets of three layers of (0°,90°). Specimens in each type, which are in double cantilever beam configuration, are tested to determine their material damping characteristic in the form of loss factor using random signal excitation. According to the test results, it is found that loss factors of the fiber-reinforced composite systematically relate to natural frequencies of the specimens; loss factors decrease when natural frequencies increase. Furthermore, as another result of the experiment, storage moduli of the four-type specimens can be calculated by employing values of the natural frequencies indicated in frequency domain. A change in value of the calculated storage moduli due to different ply orientation is in the opposite direction to that of the obtained damping factors.

Keywords: vibration damping, fiber-reinforced composite, loss factor, storage modulus

1. บทนำ

โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกลเชิงพลวัตของวัสดุ เช่นค่าโมดูลัสการสะสมและค่าความหน่วงการความสั่นสะเทือนทางวัสดุสามารถทดสอบหาได้ด้วยวิธีการสั่นสะเทือน (vibration method) หรือการแพร่ขยายของคลื่นในวัสดุ (wave propagation method) [1] วิธีการสั่นสะเทือนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกในการทดสอบและมีข้อมูลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของผลและสภาวะของการทดสอบเป็นจำนวนมาก วิธีการการสั่นสะเทือนนี้ยังสามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง เช่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยตามทิศทางที่ต้องการ ช่วงของความถี่ที่ใช้ในการทดสอบแบบสั่นสะเทือนโดยปกติจะอยู่ในช่วง 0.001-1000 Hz

การทดสอบแบบวิธีการสั่นสะเทือนยังสามารถแบ่งออกได้ตามเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ [2] เทคนิคที่นิยมใช้กันคือเทคนิคการวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือน (modal analysis) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการหาคุณสมบัติทางกลเชิงพลวัตของวัสดุคอมโพสิต โดยเทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรซึ่งได้แก่ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency), รูปร่างโหมด (mode shape), และตัวประกอบความหน่วง (damping factor) กับค่าจากการทดสอบ [3]

การหาค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนของวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการสั่นสะเทือนโดยเทคนิคการวิเคราะห์โหมดได้มีการศึกษาจากนักวิจัยจำนวนหนึ่ง [4-11] อย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในการศึกษาดังกล่าวจะมีเส้นใยเสริมแรงอยู่ในลักษณะของเส้นใยยาวต่อเนื่อง (continuous fiber), และเส้นใยสั้นไม่ต่อเนื่อง (discontinuous short fiber) โดยที่ยังไม่มีงานวิจัยใดเท่าที่ผู้เขียนทราบที่ทำการทดสอบหาค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นใยสาน (woven roving) ดังนั้นบทความฉบับนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคูสมบัติทางกลเชิงพลวัตในระดับเบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยสานและวัสดุพื้นโพลีเมอร์เป็นองค์ประกอบ

2. ทฤษฎีความหน่วงการสั่นสะเทือนในคอมโพสิตโดยสังเขป

วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยและวัสดุพื้นโพลีเมอร์เป็นองค์ประกอบโดยทั่วไปจะมีค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนมากกว่าวัสดุที่เป็นโลหะ คุณสมบัตินี้จึงเป็นจุดเด่นอีกประการหนึ่งของวัสดุคอมโพสิตนอกเหนือจากที่มีความแข็งแรงมากกว่า, ความแข็งเกร็งมากกว่า, และเบากว่าวัสดุโลหะ พลังงานซึ่งสูญเสียไปในความหน่วงการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นมาจากหนึ่งหรือหลายปัจจัยที่เป็นไปได้ต่างๆ กันคือ

- (1) พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงหนืด (viscoelastic) ของเส้นใยและวัสดุพื้นโพลีเมอร์
- (2) การหน่วงการสั่นสะเทือนจากการยืดหยุ่นเชิงอุณหภูมิ (thermoelastic) เนื่องจากการหมุนวนและการไหลของความร้อนในการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุ
- (3) ค่าความเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและวัสดุพื้นในบริเวณที่ไม่มีการเชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์

- (4) การเกิดการแตกร้าวเสียหายของวัสดุคอมโพสิตในระดับจุลภาคและมหภาค

ปัจจัยที่ (1) และ (2) จะเป็นปัจจัยของวัสดุคอมโพสิตที่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุ และยังเป็นปัจจัยที่มีความนิยมแพร่หลายในการใช้เป็นสมมุติฐานขั้นต้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหน่วงการสั่นสะเทือนในวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยที่ (1) เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตโดยส่วนมากมีวัสดุพื้นเป็นโพลีเมอร์ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงหนืดอย่างเด่นชัด ดังนั้นการใช้แบบจำลองเพื่อทำนายการหน่วงการสั่นสะเทือนโดยอ้างอิงทฤษฎีของการยืดหยุ่นเชิงหนืด (viscoelasticity) จึงได้รับการยอมรับภายใต้สมมุติฐานที่กำหนด และแบบจำลองดังกล่าวนี้จะรู้จักกันในชื่อว่าเป็นแบบจำลองโมดูลัสเชิงซ้อน

2.1 แบบจำลองโมดูลัสเชิงซ้อน

โมดูลัสเชิงซ้อนของวัสดุ C_{pq}^* สามารถนิยามได้ตามความสัมพันธ์ในเชิงสัญกรณ์ลดรูป (contracted notation) ระหว่างความเค้น (stress) $\sigma_p(t)$ และความเครียด (strain) $\varepsilon_q(t)$ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ในรูปของสมการดังนี้

$$\sigma_p(t) = C_{pq}^*(\omega)\varepsilon_q(t) \quad (1)$$

โดยที่ p และ q เป็นเลขดัชนีแสดงส่วนประกอบของความเค้นและความเครียดซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1-6, t เป็นเวลา และ ω คือความถี่ของการสั่นสะเทือนซึ่งโมดูลัสเชิงซ้อนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความถี่ ω ในโดเมนของความถี่ (frequency domain)

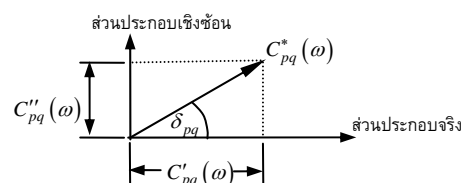
โมดูลัสเชิงซ้อนจะสามารถเขียนได้ในรูปสมการคือ

$$\begin{aligned} C_{pq}^*(\omega) &= C'_{pq}(\omega) + iC''_{pq}(\omega) \\ &= C'_{pq}(\omega)[1 + i\eta_{pq}(\omega)] \end{aligned} \quad (2)$$

ซึ่ง $C'_{pq}(\omega)$ คือโมดูลัสการสะสม (storage modulus) และเป็นส่วนประกอบจริงของโมดูลัสเชิงซ้อน, $C''_{pq}(\omega)$ คือโมดูลัสการสูญเสีย (loss modulus) และเป็นส่วนประกอบจินตภาพของโมดูลัสเชิงซ้อน, $\eta_{pq}(\omega)$ คือตัวประกอบการสูญเสีย (loss factor) ซึ่งมีค่าทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\eta_{pq}(\omega) = \frac{C''_{pq}(\omega)}{C'_{pq}(\omega)} = \tan \delta_{pq}(\omega) \quad (3)$$

จากสภาวะการเท่ากับของส่วนที่สองในสมการที่ (3) ตัวประกอบการสูญเสีย $\eta_{pq}(\omega)$ จึงสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent) โดยที่ $\delta_{pq}(\omega)$ คือมุมเฟสระหว่างความเค้น $\sigma_p(t)$ และความเครียด $\varepsilon_q(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วน i คือจำนวนจินตภาพซึ่งมีนิยามคือ $i^2 = -1$



รูปที่ 1 โมดูลัสเชิงซ้อนและมุมเฟส

โดยการใช้ความสัมพันธ์ constitutive relation ในสมการที่ (1) ระหว่างความเค้นและความเครียดของจุดจุดหนึ่งในวัสดุ แผ่นคอมโพสิตที่มีหนึ่งชั้นหรือหลายชั้นประกอบกันก็สามารถเขียนอยู่ในรูปของความแข็งเกร็งเชิงซ้อนได้ เช่น $E_1^*(\omega)$ และ $E_2^*(\omega)$ แสดงถึงค่าโมดูลัสเชิงซ้อนของคอมโพสิตตามแนวของวัสดุในทิศทาง 1 และ 2 ตามลำดับ หรือ $A_{ij}^*(\omega)$ และ $D_{ij}^*(\omega)$ แสดงถึงค่าความแข็งเกร็งเชิงซ้อนของแผ่นคอมโพสิตที่มีหลายชั้น (laminated) ในทิศทางตั้ง (หรือทก) และทิศทางดัด (หรือบิด) ตามลำดับ

ค่าโมดูลัสการสะสมและค่าตัวประกอบการสูญเสียจะถูกวัดจริงในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลเชิงพลวัต ส่วนค่าโมดูลัสการสูญเสียจะคำนวณได้มาจากการใช้สมการที่ (3) ยิ่งไปกว่านี้ค่าโมดูลัสเชิงซ้อนในทางปฏิบัติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนที่แสดงในเชิงคณิตศาสตร์ข้างต้น

2.2 วิธีการหาความหน่วงการสั่นสะเทือน

การทดสอบหาความหน่วงการสั่นสะเทือนในบทความนี้จะใช้วิธีเทคนิคการวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือน โดยในการทดสอบจะทำการศึกษาแอมพลิจูดและความถี่ที่โหมดต่างๆของความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างคานในแนวขวางแกนที่จะกล่าวในหัวเรื่องต่อไป ค่าที่ทำการศึกษาเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนของวัสดุคอมโพสิต เหตุผลที่เลือกศึกษาการสั่นสะเทือนของคานในโหมดของแนวขวางแกนเนื่องจากเป็นลักษณะทางกายภาพที่มีการใช้ในทางปฏิบัติอย่างแพร่หลาย [10] นอกจากนี้ในการทดสอบจะใช้วิธีการบังคับการสั่นสะเทือน (force vibration) เพื่อที่จะสามารถทำการควบคุมแอมพลิจูดและความถี่ที่ป้อนให้กับชิ้นงานได้ตามช่วงที่ต้องการ

ในกระบวนการทดสอบ สัญญาณแบบสุ่มบังคับจากเครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนจะถูกป้อนให้แก่ชิ้นงานในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง เครื่องวิเคราะห์สัญญาณด้วยซึ่งใช้วิธี FFT (Fast Fourier Transform) วิเคราะห์จะแสดงผลการทดสอบในรูปของกราฟการตอบสนองความถี่ (frequency response curve) กราฟนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแอมพลิจูดสัญญาณการสั่นสะเทือนส่งออกวัดจากชิ้นงานต่อแอมพลิจูดสัญญาณป้อนเข้ากับค่าความถี่ ในภาพรวมกราฟการตอบสนองความถี่จะบ่งบอกถึงค่าการตอบสนองของชิ้นงานที่ความถี่ค่าต่างๆ ตำแหน่งของความถี่ที่กราฟมีค่าการตอบสนองสูงสุดเมื่อเทียบความค่าการตอบสนองรอบข้างคือความถี่ธรรมชาติของชิ้นงาน และค่าสัดส่วนของแอมพลิจูดสัญญาณที่ตำแหน่งความถี่ธรรมชาติหรือที่รู้จักกันในชื่อตัวประกอบคุณภาพ Q (quality factor) จะนำมาใช้คำนวณระดับของความหน่วงการสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีจุดครึ่งกำลัง (half-power point or half-power bandwidth) [12] ค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบการสูญเสียหาได้จากสมการ

$$\eta_{flex} = 2\zeta = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (4)$$

โดยที่ η_{flex} คือค่าตัวประกอบการสูญเสียของคานในโหมดของแนวขวางแกนในแต่ละโหมด, ζ คือสัดส่วนความหน่วง (damping ratio)

f_n คือความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานที่โหมดๆนั้น และ Δf คือแบนด์วิดท์ของความถี่ที่จุดครึ่งกำลังของตัวประกอบคุณภาพหรือที่ $Q/\sqrt{2}$ การหาตัวประกอบความหน่วงการสั่นสะเทือนด้วยวิธีจุดครึ่งกำลังนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่าตัวประกอบความหน่วงมีค่าน้อยกว่า 0.1 หรือเทียบเท่ากับสัดส่วนความหน่วงน้อยกว่า 0.05 โดยประมาณ

2.3 วิธีการหาโมดูลัสการสะสม

นอกเหนือจากค่าตัวประกอบความหน่วงซึ่งคำนวณได้จากวิธีจุดครึ่งกำลังที่ตำแหน่งของความถี่ธรรมชาติของชิ้นงาน ค่าโมดูลัสการสะสมของชิ้นงานก็สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสการสะสมกับค่าความถี่ธรรมชาติที่โหมดต่างๆ เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นคานแบบยึดปลายแนบด้านหนึ่ง (cantilever beam) เมื่อพิจารณาเพียงครึ่งส่วนของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นคานคู่ยึดแน่นที่ตำแหน่งกลาง (double cantilever beam) (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) ดังนั้นค่าโมดูลัสการสะสม E' ในแนวตามยาวของชิ้นงานคานคอมโพสิตจะสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีคานของออยเลอร์-เบอร์นูลลี (Euler-Bernoulli beam theory) ดังสมการด้านล่าง [12]

$$E' = \frac{4\pi^2 f_n^2 L^4 \rho A}{(\beta_n L)^4 I} \quad (5)$$

L คือความยาวของคานที่พิจารณาเพียงครึ่งส่วนนับจากจุดยึดแน่นที่ตำแหน่งกลาง, ρ คือความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิต, A และ I คือพื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของคานซึ่งแสดงในสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ $\beta_n L$ คือพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือนโหมดต่างๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.875, 4.694, และ 7.854 สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนที่ 1, 2, และ 3 ของคานแบบยึดปลายแนบด้านหนึ่งตามลำดับ

$$A = Wt \quad (6)$$

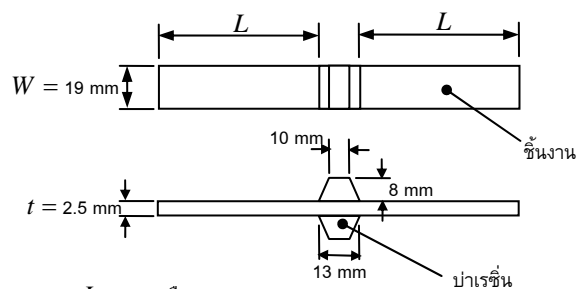
$$I = \frac{Wt^3}{12} \quad (7)$$

จากสมการข้างต้น W คือความกว้างของคาน และ t คือความหนาของคาน

3. กระบวนการทดสอบ

3.1 ชิ้นงานในการทดสอบ

ชิ้นงานในลักษณะของคานคู่ยึดแน่นที่ตำแหน่งกลาง (double cantilever beam) ดังแสดงในรูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วเป็นใยสานแบบทอ



Note: $L = 196$ หรือ 150 mm

รูปที่ 2 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

ละเอียดชนิด 200 g/m³ และวัสดุพื้นเป็นโพลีเอสเตอร์ (polyester) E355 ที่มีส่วนผสมของโมโนสไตรีน (monostyrene) 5% และสารเร่งปฏิกิริยา (catalyze) 2%

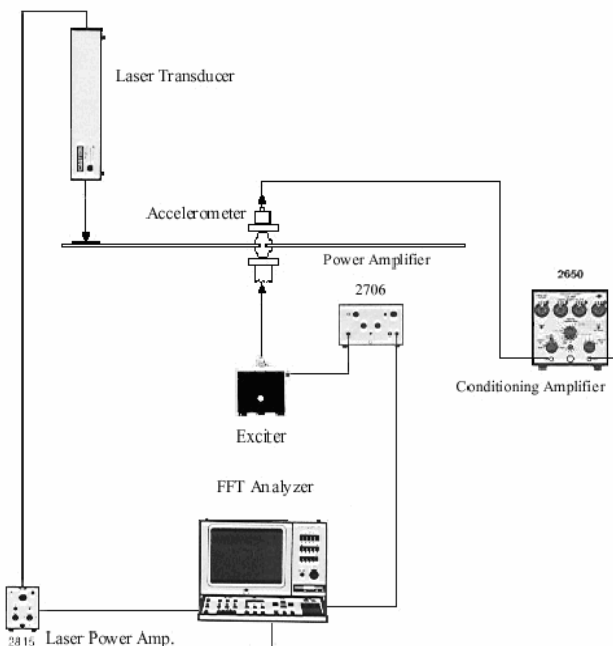
ชั้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีการวางมุมของเส้นใยสาน 4 รูปแบบซึ่งต่างกันตามตำแหน่งของลำดับชั้นที่เส้นใยวางตัวคือ

- (1) แบบ (0°,90°) จำนวนทั้งหมด 12 ชั้น (หรือ [(0°,90°)₁₂])
- (2) แบบ (±45°) จำนวนทั้งหมด 12 ชั้น (หรือ [(±45°)₁₂])
- (3) แบบ (±45°) จำนวน 3 ชั้นล่างสุด และ (0°,90°) จำนวน 6 ชั้นถัดมา และ (±45°) จำนวน 3 ชั้นบนสุด (หรือ [(±45°)₃/(0°,90°)₆/(±45°)₃])
- (4) แบบ (0°,90°) จำนวน 3 ชั้นล่างสุด และ (±45°) จำนวน 6 ชั้นถัดมา และ (0°,90°) จำนวน 3 ชั้นบนสุด (หรือ [(0°,90°)₃/(±45°)₆/(0°,90°)₃])

โดยที่มุมมองของทิศทางเส้นใยจะวัดเทียบกับแกนในแนวตามยาวของชิ้นงานคาน และในแต่ละรูปแบบ (1)-(4) ดังกล่าวข้างต้นชิ้นงานจะมีขนาดความยาว L อยู่ 2 ขนาดกล่าวคือ $L = 196$ mm และ 150 mm จำนวนชั้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีอย่างน้อย 6 ชั้นในแต่ละรูปแบบของการวางมุมเส้นใยและแต่ละขนาดความยาวเพื่อให้ได้ค่าการทดสอบทางสถิติที่เพียงพอในการสรุปผล

3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

การทดสอบจะทำที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และความดันบรรยากาศ ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดแน่นที่ตำแหน่งบารเอ็นชิ่งด้วยอุปกรณ์จับยึดของ vibration exciter (type 4809) (ดูรูปที่ 3 ประกอบ) ซึ่งเป็นตัวกำเนิดและป้อนสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่มให้แก่ชิ้นงาน สัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือ vibration exciter นี้จะถูกตรวจจับด้วย piezoelectric accelerometer (type 3470) และถูกปรับแต่งด้วย condition amplifier (type 2650) อย่างเหมาะสมเพื่อ



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้า (input signal) แก่ FFT analyzer (type 2035) ส่วนสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จะป้อนบอกถึงค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนของชิ้นงานจะวัดได้จากระยะโก่งตัวที่ปลายชิ้นงานด้วย laser transducer (type 8323) และขยายสัญญาณนี้อีกครั้งโดยใช้ laser power amplifier (type 2815) เพื่อใช้เป็นสัญญาณส่งออก (output signal) แก่ FFT analyzer ดังนั้น FFT analyzer จึงสามารถแสดงผลเป็นกราฟการตอบสนองความถี่โดยใช้สัญญาณป้อนเข้าและสัญญาณส่งออกที่ได้มานี้

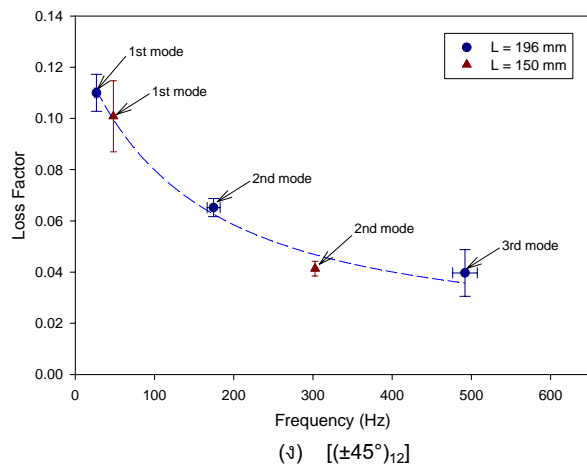
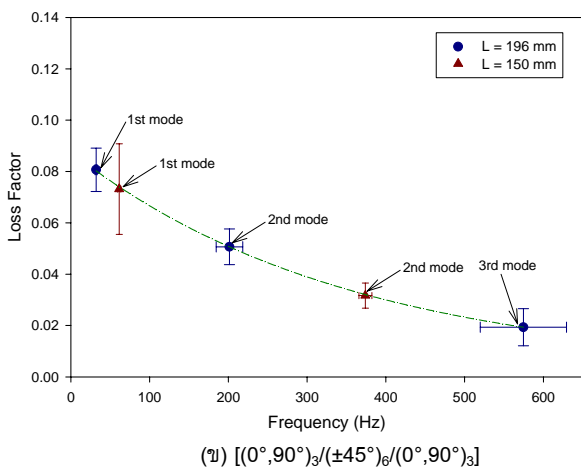
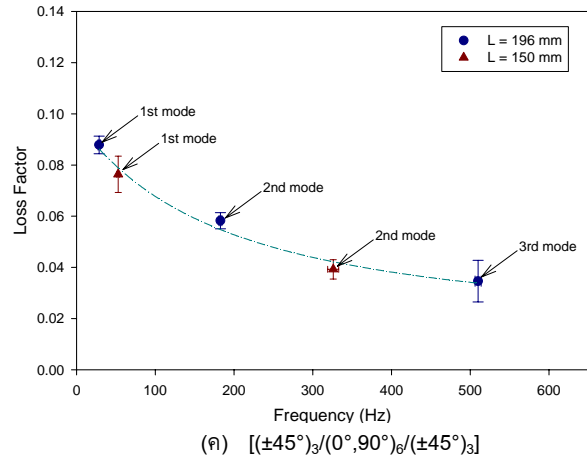
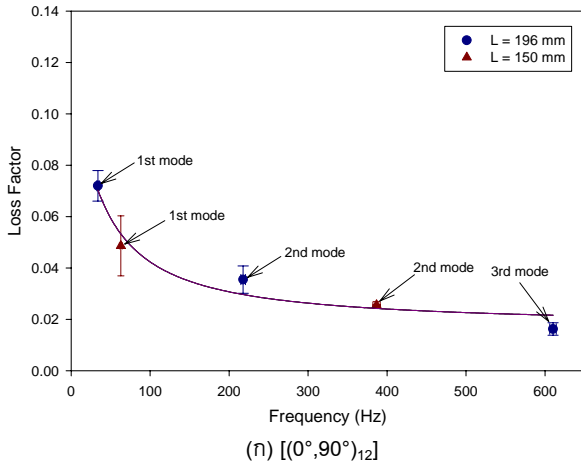
อนึ่งผลจากการทดสอบจะอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าความหน่วงเบี่ยง (parasitic damping) ที่เกิดจากแรงต้านของอากาศในการสั่นสะเทือนของชิ้นงานมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหน่วงที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ปลายชิ้นงานที่เกิดขึ้นต่อความหนา t มีค่าต่ำกว่า 0.5 ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบนี้มีค่าที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม [1,10]

4. ผลการทดสอบ

4.1 ค่าตัวประกอบการสูญเสีย

จากกราฟการตอบสนองความถี่ที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบค่าตัวประกอบการสูญเสียของชิ้นงานจะสามารถคำนวณหาได้ด้วยวิธีจุดครึ่งกำลังดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวเรื่องข้อที่ 2 ซึ่งสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการสูญเสียกับความถี่ธรรมชาติที่โหมดต่างๆ ของชิ้นงานดังรูปที่ 4(ก)-(ง) ด้านล่าง ความสัมพันธ์ในรูปทั้ง 4 โดยรวมแสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบการสูญเสียซึ่งแสดงถึงความหน่วงการสั่นสะเทือนจะมีคาลดลงเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุหลักมาจากวัสดุพื้นหรือโพลีเอสเตอร์ เนื่องจากค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนของวัสดุคอมโพสิตเกิดจากพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงหนืดของวัสดุพื้นเป็นหลัก ซึ่งโพลีเอสเตอร์จะแสดงคุณสมบัตินี้เมื่ออยู่ในสภาวะที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (glass transition temperature) [13] ซึ่งมีค่าประมาณ 70 องศาเซลเซียสหรืออีกนัยหนึ่งเมื่อโพลีเอสเตอร์อยู่ในสถานะแก้ว (glassy state)

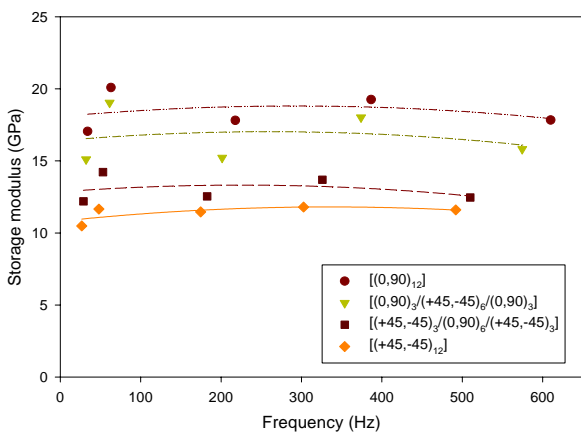
เมื่อพิจารณารูปที่ 4(ก)-(ง) ในรายละเอียดจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการวางมุมเส้นใยแบบ (0°,90°) ทุกชั้นจะมีค่าตัวประกอบการสูญเสียต่ำสุด เมื่อชิ้นงานมีการวางมุมของเส้นใยในทิศทางทำมุม 45° กับแกนในแนวยาวของชิ้นงานค่าตัวประกอบการสูญเสียจะสูงขึ้นกว่าการวางมุมเส้นใยแบบ (0°,90°) โดยที่เมื่อชั้น (±45°) จำนวน 6 ชั้นอยู่ตรงกลางจะมีค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนต่ำกว่าเมื่อชั้น (±45°) จำนวน 3 ชั้นอยู่ทั้งด้านบนและล่าง และชิ้นงานที่มีการวางมุมเส้นใยแบบ (±45°) ทุกชั้นจะมีค่าตัวประกอบการสูญเสียสูงสุด ปรากฏการณ์นี้จะคล้ายกับผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวประกอบการสูญเสียในวัสดุคอมโพสิตที่ซ้อนกันเป็นชั้น แต่จากแบบจำลองดังกล่าวในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยเส้นใยสั้นที่วางตัวไปในทิศทางเดียวกัน (unidirectionally aligned short fiber) แทนที่จะเป็นชั้นของเส้นใยสานที่ใช้ในการทดสอบนี้ [13,14]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการสูญเสียกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ

4.2 ค่าโมดูลัสการสะสม

ค่าโมดูลัสการสะสมของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในการทดสอบสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (5) โดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติที่โหมดการสั่นสะเทือนต่างๆ ในกราฟการตอบสนองของความถี่ ผลการคำนวณค่าโมดูลัสการสะสมซึ่งแสดงในรูปที่ 5 บ่งชี้ว่าค่าโมดูลัสการ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการสะสมกับความถี่ธรรมชาติ

สะสมมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากจนเป็นนัยสำคัญเมื่อค่าความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป การพิจารณาผลการคำนวณในรูปที่ 5 ยังแสดงถึงการแปรผันตามกันของค่าโมดูลัสการสะสมของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบการวางตัวของเส้นใยกับค่าความแข็งเกร็งดัด (bending stiffness) ของชิ้นงานรูปแบบนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากค่าโมดูลัสการสะสมของชิ้นงานที่มีการวางเส้นใยรูปแบบ $[(0^\circ, 90^\circ)_{12}]$, $[(0^\circ, 90^\circ)_3/(\pm 45^\circ)_6/(0^\circ, 90^\circ)_3]$, $[(\pm 45^\circ)_3/(0^\circ, 90^\circ)_6/(\pm 45^\circ)_3]$ และ $[(\pm 45^\circ)_{12}]$ จะมีค่าจากสูงไปต่ำซึ่งเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับค่าความแข็งเกร็งดัดของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบเพราะทิศทาง $(0^\circ, 90^\circ)$ ของเส้นใยจะให้ความแข็งเกร็งดัดตามแนวยาวของคานมากกว่าทิศทาง $(\pm 45^\circ)$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทิศทาง $(0^\circ, 90^\circ)$ อยู่ที่ชั้นบนและชั้นล่างในการวางซ้อนกันเป็นชั้นของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้รูปที่ 5 ยังแสดงให้เห็นว่าลำดับของค่าของโมดูลัสการสะสมในรูปแบบการวางแนวเส้นใยทั้ง 4 จะตรงข้ามกันกับลำดับของค่าของตัวประกอบการสูญเสียที่ค่าความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่ง กล่าวคือเมื่อค่าโมดูลัสการสะสมมีค่ามาก ค่าตัวประกอบการสูญเสียจะมีค่าน้อย (ดูรูปที่ 4 และ 5 ประกอบ) ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเกร็งเชิงดัดมากกว่าจะมีจุดเด่นของคุณสมบัติของเส้นใยมากกว่าคุณสมบัติของวัสดุ

พื้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียไม่สูงเท่ากับชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยกว่าและมีค่าคุณสมบัติของวัสดุพื้นเด่นกว่า

5. สรุป

การทดสอบทางพลวัตโดยการวิเคราะห์โหมดของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตในลักษณะของโครงสร้างคานจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของวัสดุดังกล่าว ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบนี้คือค่าตัวประกอบการสูญเสียและค่าโมดูลัสการสะสมของชิ้นงานเมื่อมีลักษณะการวางตัวของเส้นใยแก้วแบบใยสานต่างๆ กัน 4 รูปแบบ จากการทดสอบจะสามารถสรุปโดยทั่วไปได้ว่าการวางตัวของใยสานที่มุมแตกต่างกันจะส่งผลถึงตัวประกอบการสูญเสียและโมดูลัสการสะสมอย่างชัดเจนเนื่องจากผลของค่าความแข็งแรงเชิงดัดของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน มุมของเส้นใยที่ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงจะส่งผลให้ตัวประกอบการสูญเสียมีค่าน้อยและโมดูลัสการสะสมมีค่ามาก นอกจากนี้ค่าตัวประกอบการสูญเสียยังมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือตัวประกอบการสูญเสียหรือในอีกนัยหนึ่งค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสการสะสมจะมีพฤติกรรมที่ต่างออกไปคือจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เด่นชัดหรือมีค่าเกือบคงที่ในช่วงความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ. ดร. สุรเชษฐ์ ชูติมา และ อ. ธรรมรัตน์ กิตติพิงศ์พัฒนา ซึ่งทั้งสองท่านเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำแนะนำทางเทคนิคในขณะทำการทดสอบซึ่งมีผลช่วยทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณนายไกรวิช สุขสงเคราะห์ นายจิรวุฒิ วงษ์ทศรัตน์ และนายชาย บรรพตพเพ่า นักศึกษาระดับปริญญาตรีของผู้เขียน สำหรับการสร้างชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต จัดตั้งอุปกรณ์และการดำเนินการทดสอบให้เป็นไปอย่างถูกต้องเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

[1] R.F. Gibson, "Vibration-Test Methods for Dynamic-Mechanical-Property Characterization," Manual on Experimental Methods of Mechanical Testing of Composites, Society for Experimental Mechanics, First Edition 1989, Second Ed. 1998.

[2] C.W. Bert, "Composite Materials: A Survey of the Damping Capacity of Fiber Reinforced Composites." in P.J. Torvik Ed., Damping Applications for Vibration Control, ASME, New York, 1980, pp. 53-63.

[3] F.H. Chu, and B.P. Wang, "Experimental Determination of Damping in Materials and Structure," in P.J. Torvik Ed., Damping Applications for Vibration Control, ASME, New York, 1980, pp. 113-122.

[4] R.D. Adams, and D. G. C. Bacon, "The Dynamic Properties of Unidirectional Fibre Reinforced Composites in Flexure and Torsion," Journal of Composite Materials, Vol. 7, 1973, pp. 53-67.

[5] R.D. Adams, and D.G.C. Bacon, "Measurement of the Flexural Damping Capacity and Dynamic Young's Modulus of Metals and Reinforced Plastics," Journal of Physics D- Applied Physics, Vol. 6, No. 1, 1973, pp. 27-41.

[6] R.G. Ni, and R.D. Adams, "The Damping and Dynamic Moduli of Symmetric Laminated Composite Beams-Theoretical and Experimental Results," Journal of Composite Materials, Vol. 18, 1984, pp. 104-121.

[7] S.A. Suarez, R.F. Gibson, and L.R. Deobald, "Random and Impulse Techniques for Measurement of Damping in Composite Materials," Experimental Techniques, Vol. 8, No. 10, 1984, pp. 19-24.

[8] D.X. Lin, R.G. Ni, and R.D. Adams, "Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastic Plates," Journal of Composite Materials, Vol. 18, 1984, pp. 132-150.

[9] R.F. Gibson, A. Yau, E.W. Mende, and W.E. Osborn, "The Influence of Environmental Conditions on the Vibration Characteristics of Chopped-Fiber-Reinforced Composite Materials," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 1, 1982, pp. 225-241.

[10] R.F. Gibson, and R. Plunkett, "A Force-vibration Technique for Measurement of Material Damping," Experimental Mechanics, Vol. 11, No. 8, 1977, pp. 297-302

[11] S.A. Suarez, R.F. Gibson, C.T. Sun, and S.K. Chaturvedi, "The Influence of Fiber Length and Fiber Orientation on Damping and Stiffness of Polymer Composite Materials," Experimental Mechanics, Vol. 26, No. 2, 1986, pp. 175-184.

[12] S.S. Rao, Mechanical Vibrations, Addison-Wesley, USA, 1995.

[13] C.T. Sun, and Y.P. Lu, Vibration Damping of Structural Elements, Prentice Hall PTR, USA, 1995.

[14] C.T. Sun, J.K. Wu, and R.F. Gibson, "Prediction of Material Damping of Laminated Polymer Matrix Composites," Journal of Materials Science, Vol. 22, 1987, pp. 1006-1012.