

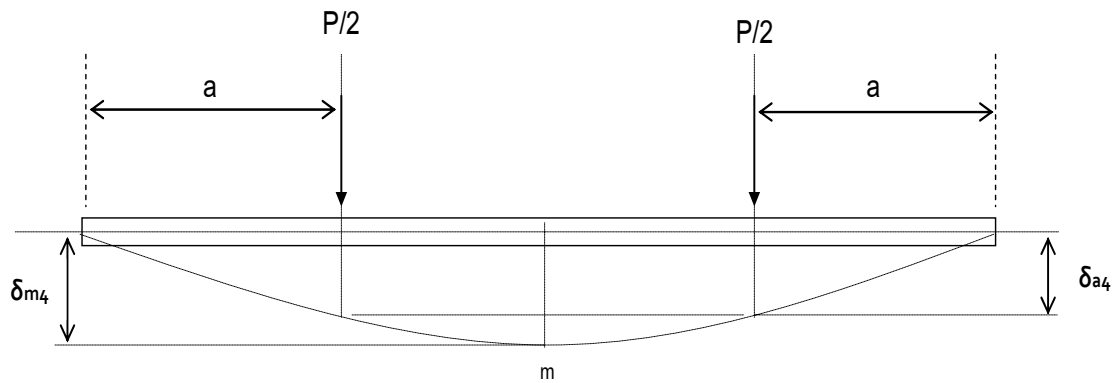
บทที่ 5 คุณสมบัติและประสิทธิภาพทางโครงสร้าง

5.1 บทนำ (Introduction)

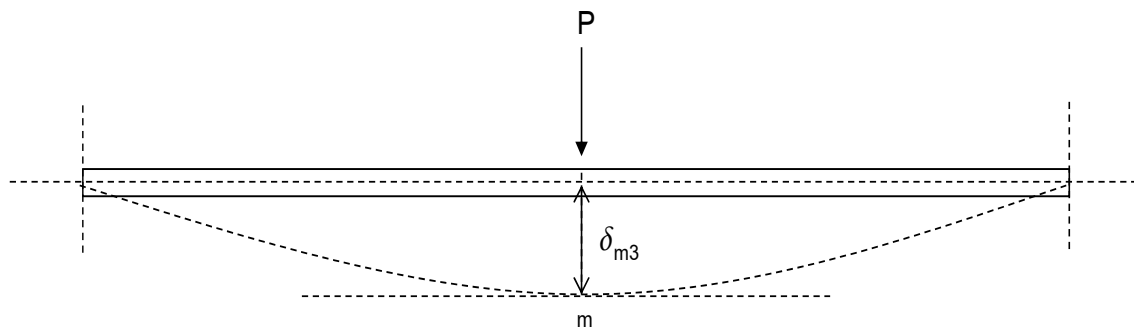
ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีการประเมินคุณสมบัติเชิงกลของคานไม้ยางพาราประกอบ เช่น ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดเทียบเท่า (Equivalent flexural rigidity: EI), ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการเฉือนเทียบเท่า (Equivalent shear rigidity: kGA), ตัวประกอบลดกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนรูปจากการเฉือน (Reduction factor due to shear deformation) และ ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูป (Deformation Factor) จะแสดงไว้ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนการประมาณกำลังของคานไม้ยางพาราประกอบจากรูปแบบการวิบัติจะถูกแสดงไว้ในส่วนท้ายของบทนี้

5.2 ความแข็งแรงเนื่องจากการดัดและการเฉือนเทียบเท่า (Equivalent flexural and shear rigidity: EI and kGA)

ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดเทียบเท่า (Equivalent Flexural Rigidity: EI) และ ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการเฉือนเทียบเท่า (Equivalent Shear Rigidity: kGA) คำนวณจากผลการทดสอบคานไม้ตัวอย่าง โดยใช้ข้อมูลการโก่งตัวจากการทดสอบภายใต้การดัดแบบแรงกระทำสามจุด และสี่จุด มาทำการแยกผลการโก่งตัวเนื่องจากการดัดและการเฉือนออกจากกัน นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบแรงกระทำห้ำจุด การโก่งตัวของคานไม้ตัวอย่างภายใต้แรงกระทำแบบสี่จุดและสามจุดถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 การโก่งตัวของคานภายใต้การดัดภายใต้แรงกระทำ 4 จุด



รูปที่ 5.2 การโก่งตัวของคานภายใต้การดัดภายใต้แรงกระทำ 3 จุด

จากรูปที่ 5.1 การโก่งตัวที่กึ่งกลางของคานภายใต้การทดสอบการดัดสี่จุด (\$\delta_{m4}\$) หาได้จากสมการ (5.1)

$$\delta_{m4} = \frac{Pa}{48(EI)}(3L^2 - 4a^2) + \delta_{shear} \quad (5.1)$$

การโก่งตัวที่ตำแหน่งแรงกระทำของคานภายใต้การทดสอบการดัดสี่จุด (\$\delta_{a4}\$) หาได้จากสมการ (5.2)

$$\delta_{a4} = \frac{Pa^2}{12(EI)}(3L - 4a) + \delta_{shear} \quad (5.2)$$

จากรูปที่ 5.2 การโก่งตัวที่กึ่งกลางของคานภายใต้การทดสอบการดัดสามจุด (δ_{m3}) หาได้จากสมการ (5.3)

$$\delta_{m3} = \frac{PL^3}{48(EI)} + \frac{PL}{(\kappa GA)} \quad (5.3)$$

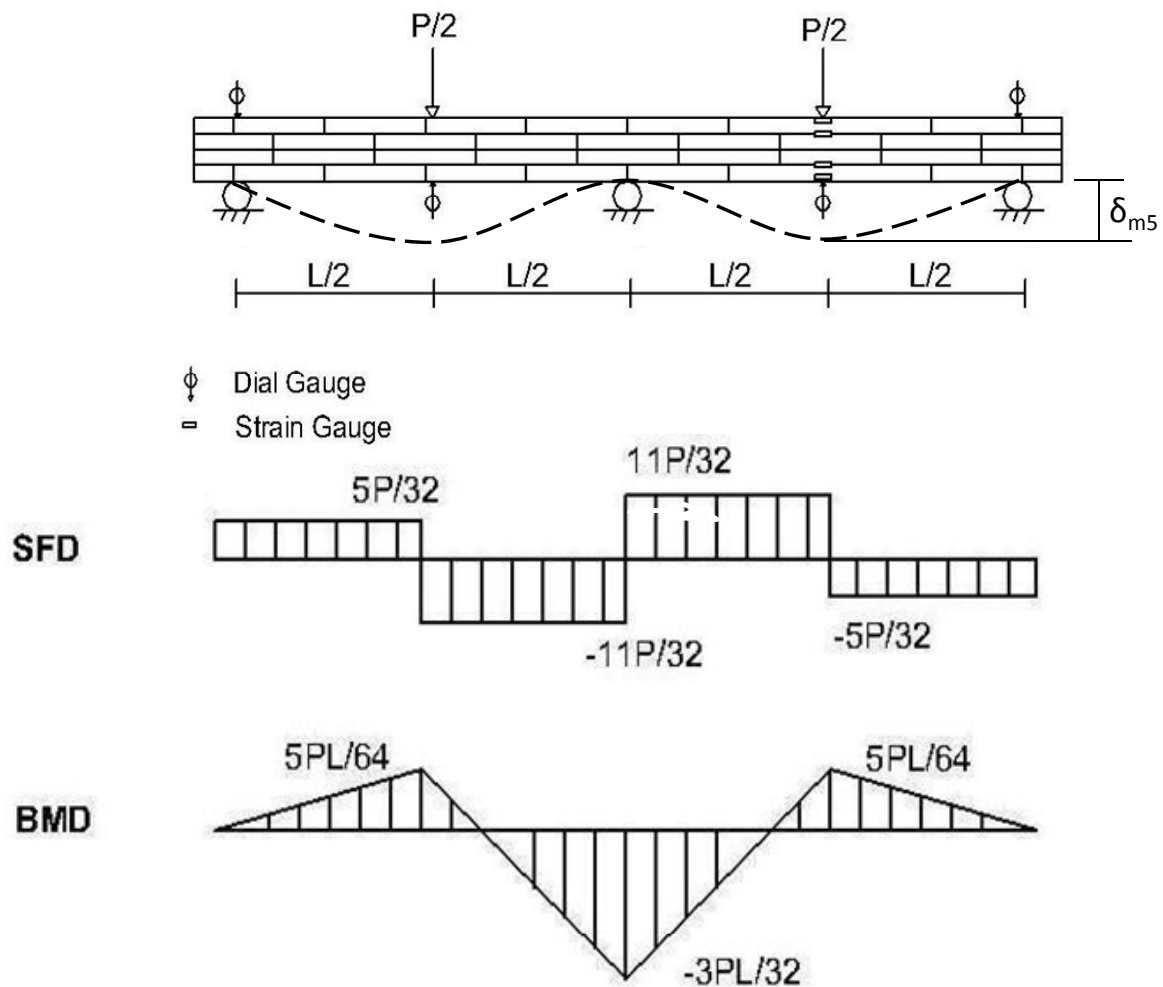
โดยที่ P คือแรงกระทำรวมในแนวดิ่ง, δ_{shear} คือการโก่งเนื่องจากผลของการเฉือน, L คือความยาวของคาน และ a คือระยะจากปลายคานถึงตำแหน่งแรงกระทำ (แสดงในรูปที่ 5.1) เนื่องจากความยาวของคานระหว่างตำแหน่งของแรงกระทำในแนวดิ่งอยู่ภายใต้ผลของการดัดเท่านั้น ดังนั้นค่าความแกร่งต่อการดัดและการเฉือนจึงสามารถคำนวณแยกออกจากกันได้โดยการกำจัดผลการโก่งแนวจากการเฉือนที่อยู่ภายนอกช่วงแรงกระทำ (จากปลายคานถึงตำแหน่ง a) โดยนำสมการที่ (5.1) ลบด้วยสมการที่ (5.2) และจัดรูปสมการใหม่ดังแสดงในสมการ (5.4)

$$(EI) = \frac{Pa}{48(\delta_{m4} - \delta_{a4})}(3L^2 - 12La + 12a^2) \quad (5.4)$$

เพื่อคำนวณค่าความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือนเทียบเท่า (κGA) ค่าความแข็งแกร่งเนื่องจากการดัดเทียบเท่า (EI) ในสมการ (5.4) จะแทนค่าลงในสมการที่ (5.3) จะได้สมการที่ (5.5)

$$(\kappa GA) = \frac{PL}{\left(\delta_{m3} - \frac{PL^3}{(48EI)}\right)} \quad (5.5)$$

สำหรับการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบโดยวิธีการดัดห้าจุด (Five point bending) จะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการคำนวณหาค่าความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือนเทียบเท่า (κGA) โดยพิจารณาจากแผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภาพการเฉือนและดัดของคานภายใต้การดัดภายใต้แรงกระทำ 5 จุด

การโก่งตัวที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับของคานภายใต้การทดสอบการดัดห้าจุด (δ_{m5}) ซึ่งประกอบไปด้วยผลของการโก่งตัวเนื่องจากการดัดและการเฉือนหาได้จากสมการที่ (5.5):

$$\delta_{m5} = \frac{PL^3}{219(EI)} + \frac{PL}{(\kappa GA)} \quad (5.6)$$

เขียนสมการ (5.6) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความแข็งเกร็งต่อการเฉือนเทียบเท่าจะได้ดังสมการที่ (5.7)

$$(\kappa GA) = \frac{L}{\left(\frac{\delta_{m5}}{P} - \frac{L^3}{219(EI)} \right)} \quad (5.7)$$

โดยที่ P คือแรงกระทำรวมในแนวดิ่ง L คือความยาวช่วงของคานระหว่างที่รองรับกับที่รองรับถัดไป EI คือค่าความแข็งเกร็งดัดเทียบเท่า และ (δ_{m5}) คือการโก่งตัวที่ตำแหน่งใต้แรงกระทำโดยวิธีการทดสอบแบบห้ำจุด ดังแสดงในรูปที่ 5.3

5.3 ตัวประกอบลดกำลังของค่าความแข็งเกร็งต่อการดัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเฉือน (Reduction factor of Equivalent flexural rigidity due to shear deformation)

การประเมินค่าตัวประกอบลดกำลังของค่าความแข็งเกร็งต่อการดัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเฉือน (R_{bs}) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีคำนวณจากข้อมูลของการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยทำการพิจารณาสมการการโก่งตัวเนื่องจากการดัดและการเฉือน (Timoshenko's beam theory) ซึ่งสมการการโก่งตัวดังกล่าวจะถูกเขียนอยู่ในรูปของการโก่งตัวเนื่องจากการดัดโดยใช้ตัวประกอบปรับแก้ดังต่อไปนี้

$$\frac{(\delta_m)_b}{(\delta_m)_s} = f_{bs} \quad (5.8)$$

$$(\delta_m)_t = (\delta_m)_b \left(1 + \frac{1}{f_{bs}} \right) = \frac{(\delta_m)_b}{R_{bs}} \quad (5.9)$$

โดยที่ $(\delta_m)_t$ คือการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากการดัด $(\delta_m)_b$ และการเฉือน $(\delta_m)_s$ และ f_{bs} คืออัตราส่วนของการโก่งตัวเนื่องจากการดัดต่อการเฉือน

สำหรับกรณีคานภายใต้การดัดเนื่องจากแรงกระทำ 3 จุด ตัวประกอบการลดกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเฉือนคำนวณโดยนำสมการการโก่งตัว (5.3) แทนค่าลงในสมการ (5.9) ผลที่ได้แสดงในสมการที่ (5.10)

$$R_{bs} = \frac{1}{\left(1 + \frac{48}{L^2} \left(\frac{EI}{\kappa GA} \right)\right)} \quad (5.10)$$

สำหรับกรณีคานภายใต้การดัดเนื่องจากแรงกระทำ 5 จุด ตัวประกอบการลดกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปเนื่องจากการเฉือนคำนวณโดยนำสมการการโก่งตัว (5.6) แทนค่าลงในสมการ (5.9) ผลที่ได้แสดงในสมการที่ (5.11)

$$R_{bs} = \frac{1}{\left(1 + \frac{219}{L^2} \left(\frac{EI}{\kappa GA} \right)\right)} \quad (5.11)$$

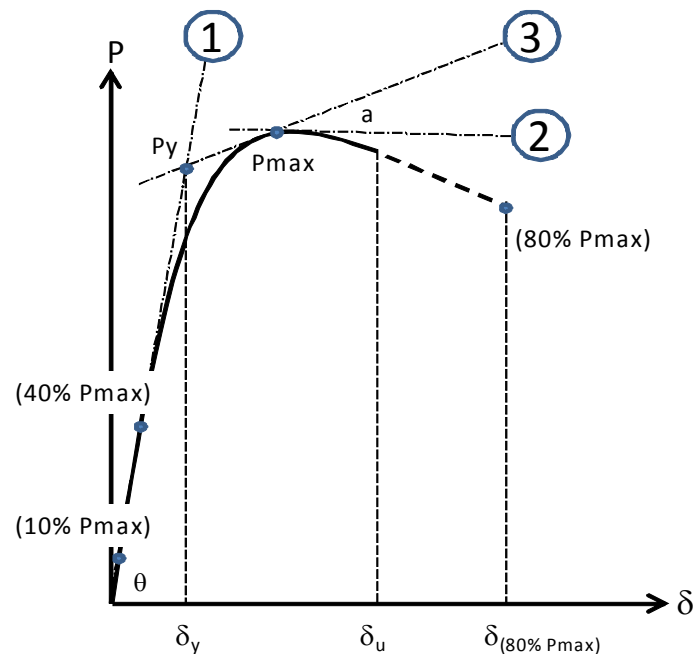
โดยที่ EI คือค่าความแข็งแกร่งการดัดเทียบเท่า และ κGA คือค่าความแข็งแกร่งการเฉือนเทียบเท่า L คือความยาวช่วงของคานระหว่างที่รองรับ

5.4 ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูป (Deformation Factor)

การพิจารณาพฤติกรรมของคานไม้ประกอบในช่วงที่คานรับแรงกระทำสูงสุดไปแล้วและพลังงานที่ดูดซับไว้สามารถวัดได้จากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปหรือความเหนียวภายใต้การดัดของคานไม้ประกอบแบบพาราทั้ง ซึ่งการประเมินความสามารถดังกล่าวอาศัยผลจากการทดสอบคานไม้ประกอบในห้องปฏิบัติการ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อการโก่งตัว หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง (curvature) โดยดัดแปลงนิยามให้เหมาะสมกับคานไม้ประกอบลามิเนต คืออัตราส่วนพลังงานที่ถูกดูดซับเท่ากับอัตราส่วนพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปที่กำลังประลัยต่อพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวที่สภาวะอีลาสติก

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบคานไม้ประกอบโดยทั่วไปการกำหนดตำแหน่งอีลาสติกและวิบัติ อาจจะใช้เกณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูปบนข้อกำหนดเดียวกัน โดยอาศัยวิธีการตามมาตรฐาน EN 1995-1-1: European Committee for Standardization 2004 แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งนิยามค่าต่างๆถูกกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

- P_y คือ แรงกระทำที่จุดคราก เป็นตำแหน่งที่เกิดจากการตัดกันของเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3
- P_{max} คือ แรงกระทำสูงสุด
- เส้นที่ 1 คือ เส้นตรงที่ผ่านตำแหน่ง 10% P_{max} และ 40% P_{max} บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว
- เส้นที่ 2 คือ เส้นในแนวระดับซึ่งผ่านจุด P_{max} บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว
- เส้นที่ 3 คือ เส้นตรงซึ่งทำมุม (α) เทียบกับแนวระดับหรือเส้นที่ 2
- $\tan \alpha = (\tan \theta)/6$



รูปที่ 5.4 นิยามค่าต่างๆ เพื่อการประเมินการเปลี่ยนแปลงรูป

5.5 ขนาดโมเมนต์ดัดสูงสุด (Maximum Moment Capacity)

ในการประเมินกำลังโมเมนต์ดัดหรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับคานไม้ยางพาราประกอบนี้ ได้ทำการประเมินค่าโดยอาศัยรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นเมื่อคานไม้ประกอบเกิดการวิบัติ ซึ่งการประเมินค่าพิจารณาจากสมดุลของแรงบนหน้าตัด โดยใช้ข้อมูลค่าความเครียดของไม้ยางพาราและสมมุติตำแหน่งแกนสะเทินบนหน้าตัด พิจารณาแรงกระทำบนหน้าตัด กระบวนการสมมุติค่าแกนสะเทินจะดำเนินการทำซ้ำจนกว่าบนหน้าตัดจะเกิดสมดุลของแรง และนำค่าแรงบนหน้าตัดดังกล่าวคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อไป

โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติของไม้เป็นลักษณะไรเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณงานวิจัยนี้ได้สมมุติพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของไม้ยางพาราในด้านรับแรงอัดมีลักษณะอีลาสติก-พลาสติก ส่วนพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของไม้ยางพาราในด้านรับแรงดึงมีลักษณะอีลาสติก

สำหรับช่วงอีลาสติกด้านแรงดึง ($0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{tw}$):

$$\sigma = E_w \varepsilon \quad (5.12)$$

สำหรับช่วงอีลาสติกด้านแรงอัด ($0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cw}$):

$$\sigma = E_w \varepsilon_{cw} \quad (5.13)$$

สำหรับช่วงอีลาสติกด้านแรงอัด ($\varepsilon_{cw} < \varepsilon \leq \varepsilon_{uw}$):

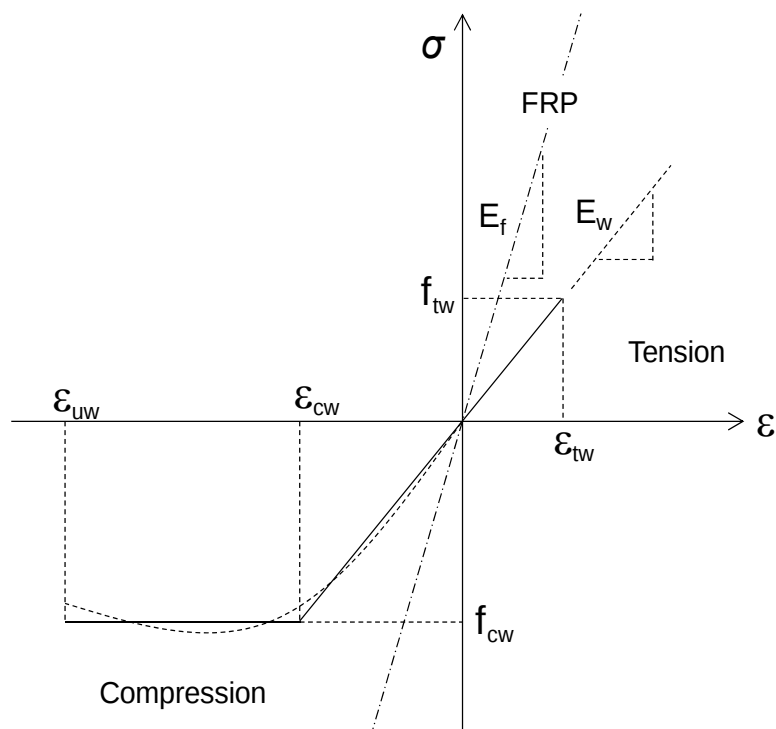
$$\sigma = f_{cw} \quad (5.14)$$

สำหรับวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คุณสมบัติการรับแรงของวัสดุจะมีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งเกิดการแตกหักดังแสดงในสมการที่ (5.15)

สำหรับด้านแรงดึง ($0 < \varepsilon \leq \varepsilon_f$):

$$\sigma = E_f \varepsilon \quad (5.15)$$

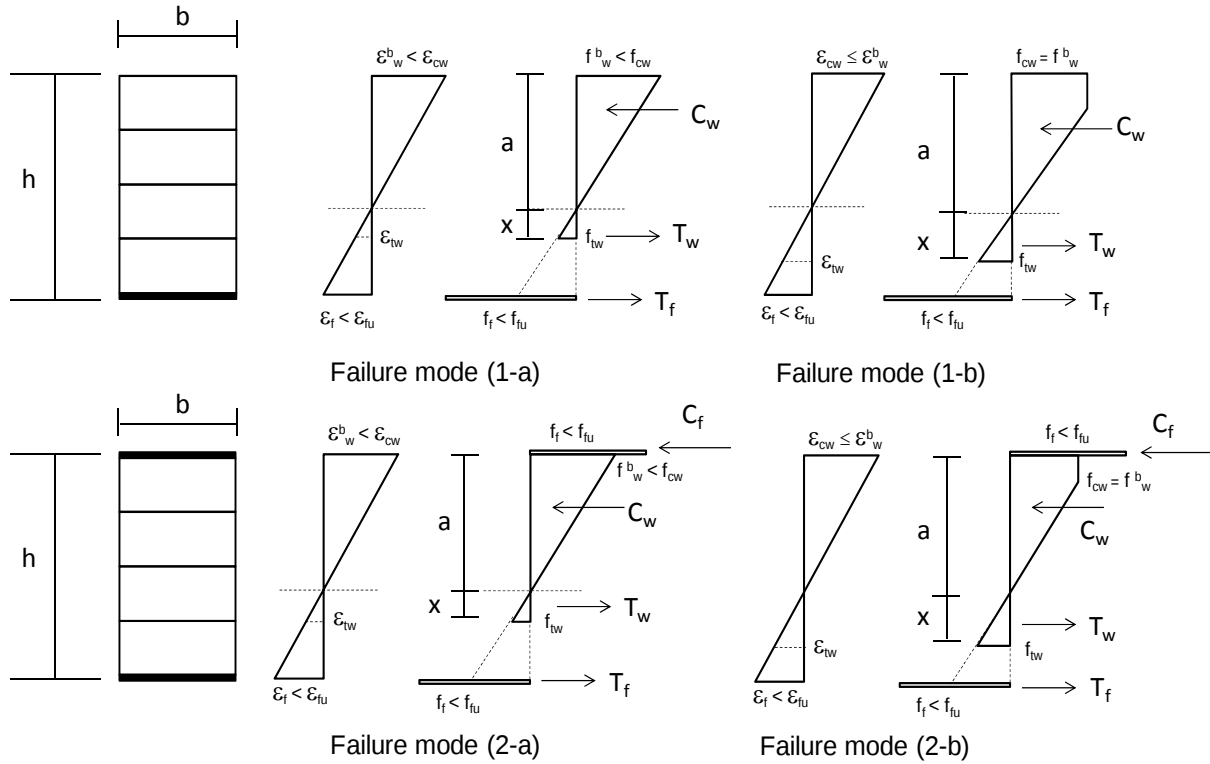
โดยที่ σ คือความเค้นตึงฉาก ε คือความเครียดในแนวตึงฉาก E_w และ E_f คือค่าอีลาสติกโมดูลัสของไม้ยางพารา ($\approx 9313 \text{ MPa}$) และวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (64746 MPa) ตามลำดับ ε_{tw} และ ε_{cw} คือความเครียดในด้านการดึง ($\approx 1580\mu\varepsilon$) และในด้านการอัด ($\approx 2900\mu\varepsilon$) ที่ขีดจำกัดความยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุต่างๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุไม้ยางพาราและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

รูปแบบการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในงานวิจัยนี้
ทำการศึกษาประกอบด้วยรูปแบบการวิบัติหลัก 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5.6 คือ

- 1) รูปแบบการวิบัติด้านแรงดึงเป็นหลักในขณะที่ความเค้นในด้านรับแรงอัดยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก ประกอบด้วย 2 รูปแบบการวิบัติน้อย คือ (1-a) สำหรับคานที่เสริมกำลังด้านรับแรงดึง และ (2-a) สำหรับคานที่เสริมกำลังทั้งด้านรับแรงดึงและอัด โดยการวิบัติจะพบที่ด้านรับแรงดึงของหน้าตัดในขณะที่ยังมีความเครียดในด้านรับแรงอัดยังมีค่าไม่ถึงค่าความเครียดวิบัติ ($< 2900 \mu\epsilon$)
- 2) รูปแบบการวิบัตียังคงอยู่ด้านแรงดึงเป็นหลักในขณะที่ยังมีความเค้นในด้านรับแรงอัดอยู่ในช่วงอีลาสติก-พลาสติก ประกอบไปด้วย 2 รูปแบบการวิบัติน้อย คือ (1-b) สำหรับคานที่เสริมกำลังด้านรับแรงดึง และ (2-b) สำหรับคานที่เสริมกำลังทั้งด้านรับแรงดึงและอัด โดยการวิบัติจะพบที่ด้านรับแรงดึงของหน้าตัดในขณะที่ยังมีความเครียดในด้านรับแรงอัดมีค่ามากกว่าค่าความเครียดวิบัติ ($> 2900 \mu\epsilon$) อย่างไรก็ตามค่าความเครียดอัดที่เกิดในวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดวิบัติ ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะไม่เกิดการโก่งเดาะและการหลุดลอกซึ่งการวิบัติในรูปแบบดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.6 ความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดที่สภาวะวิบัติ

รูปแบบการวิบัติ 1-a:

จากสมการสมดุลของแรงบนหน้าตัด: $C_w = T_f + T_w$

$$\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{cw} ab = \frac{1}{2} E_w \varepsilon_{tw} bx + E_f \varepsilon_f bt \quad (5.16)$$

โดยการจัดรูปสมการ (5.16) แกนสะเทินของหน้าตัด (a) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.17)

$$\left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{tw}}{\varepsilon_{cw}} \right)^2 \right] a^2 + (2n_f t) a + (2n_f th) = 0 \quad (5.17)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{rw}}{\varepsilon_f} (h - a) \quad (5.18)$$

$$M = \left(\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{cw} ab\right) \left(h - \frac{a}{3}\right) + \left(\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{rw} bx\right) \left(h - a - \frac{2x}{3}\right) \quad (5.19)$$

รูปแบบการวิบัติ 1-b:

จากสมการสมดุลของแรงบนหน้าตัด: $C_w = T_f + T_w$

$$\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{cw} b(a - c) + E_w \varepsilon_{cw} bc = \frac{1}{2} E_w \varepsilon_{rw} bx + E_f \varepsilon_f bt \quad (5.20)$$

โดยการจัดรูปสมการ (5.20) แทนค่าของหน้าตัด (a) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.21)

$$a = \frac{(2n_f t) \varepsilon_f^2 + [\varepsilon_{rw}^2 + (2\varepsilon_{cw} - 1) \varepsilon_{cw}] h}{\varepsilon_{rw}^2 + (3\varepsilon_f + 2\varepsilon_{cw} - 1) \varepsilon_{cw} - \varepsilon_f} \quad (5.21)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{rw}}{\varepsilon_f} (h - a) \quad (5.22)$$

$$M = (E_w \varepsilon_{cw} b) \left(h - \frac{c}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{cw} b\right) \left(h - \frac{a}{3} - \frac{2c}{3}\right) + \left(\frac{1}{2} E_w \varepsilon_{rw} bx\right) \left(h - a - \frac{2x}{3}\right) \quad (5.23)$$

รูปแบบการวิบัติ 2-a:

จากสมการสมดุลของแรงบนหน้าตัด: $C_w + C_f = T_w + T_f$

$$\frac{1}{2} E_w \varepsilon_w^b ab + E_f \varepsilon_w^b bt = \frac{1}{2} E_w \varepsilon_{rw} bx + E_f \varepsilon_f bt \quad (5.24)$$

โดยการจัดรูปสมการ (5.24) แทนค่าของหน้าตัด (a) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.25)

$$[1 - \varepsilon_{rw}^2]a^2 + (4n_f t)a - (2n_f th) = 0 \quad (5.25)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{rw}}{\varepsilon_f}(h - a) \quad (5.26)$$

$$M = \left(\frac{1}{2}E_w \varepsilon_w^b ab\right)\left(h - \frac{a}{3}\right) + \left(\frac{1}{2}E_w \varepsilon_{rw} bx\right)\left(h - a - \frac{2x}{3}\right) + (E_f \varepsilon_w^b bth) \quad (5.27)$$

รูปแบบการวิบัติ 2-b:

จากสมการสมดุลของแรงบนหน้าตัด: $C_w + C_f = T_w + T_f$

$$\frac{1}{2}E_w \varepsilon_{cw} b(a - c) + E_w \varepsilon_{cw} bc + E_f \varepsilon_w^b bt = \frac{1}{2}E_w \varepsilon_{rw} bx + E_f \varepsilon_f bt \quad (5.28)$$

$$a = \frac{(n_f t \varepsilon_f)(2\varepsilon_f - b\varepsilon_w^b) + [\varepsilon_{rw}^2 + (2\varepsilon_{cw} - 1)\varepsilon_{cw}]h}{\varepsilon_{rw}^2 + (3\varepsilon_f + 2\varepsilon_{cw} - 1)\varepsilon_{cw} - \varepsilon_f} \quad (5.29)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{rw}}{\varepsilon_f}(h - a) \quad (5.30)$$

$$M = (E_w \varepsilon_{cw} b)\left(h - \frac{c}{2}\right) + \left(\frac{1}{2}E_w \varepsilon_{cw} b\right)\left(h - \frac{a}{3} - \frac{2c}{3}\right) + \left(\frac{1}{2}E_w \varepsilon_{rw} bx\right)\left(h - a - \frac{2x}{3}\right) + (E_f \varepsilon_w^b bth) \quad (5.31)$$

โดยที่ C_w และ C_f คือแรงอัดในส่วนของไม้และส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามลำดับ T_f และ T_w คือแรงดึงในส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและส่วนของไม้ตามลำดับ b และ h คือความกว้างและความสูงของหน้าตัดไม้ยางพาราประกอบ t คือความหนาของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย a คือระยะในแนวดิ่งระหว่างแกนสะเทินและผิวบนสุดของหน้าตัดคาน c คือระยะความลึกของส่วนการกระจายแรงอัดพลาสติก x คือระยะความลึกของการกระจายแรงดึงบนหน้าตัด ε_f คือความเครียดดึงของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ($\approx$ ความเครียดที่ผิวล่างสุด). ε_w^b คือความเครียดในไม้ที่ผิวบนของหน้าตัดคาน ดังแสดงในรูป 5.6