



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานพลาสติคเสริมใยแบบพัลทูดช่วงเดียวหน้าตัดตรงนำรูปตัวซีภายใต้ความไม่แน่นอนของกำลังวัสดุ

Critical Buckling Moment of PFRP Simple C-Channel Beam under the Uncertainty of Strength of Materials

จงศิลป์ สุขุมจริยพงศ์* และสงวน วงษ์ชวลิตกุล

Chongsin Sookoomjariyapong* and Sanguan Vongchavalitkul

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา 30000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakornratsima, Thailand, 30000

Received May 2012

Accepted August 2012

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของคานพลาสติคเสริมใยแบบพัลทูด (Pultruded fiber reinforced plastic) ช่วงเดียวหน้าตัดตรงนำรูปตัวซีขนาด C 152 x 43 x 10 mm ที่ผลิตในประเทศไทย การวิเคราะห์ผลให้ความสำคัญกับความไม่แน่นอนของคุณสมบัติของวัสดุนั้นคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นการดัด (Modulus of elasticity in bending) และโมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือน (Shear modulus of elasticity) ของวัสดุ ตัวแปรทั้งสองนำไปประยุกต์ใช้คำนวณค่าทางสถิติของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติ (Critical buckling moment) ของแต่ละความยาวคานทดสอบ การวิเคราะห์ผลใช้วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุ และผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุมีการแจกแจงแบบ Lognormal มีค่าเฉลี่ย 30.85 GPa และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 11.30 สำหรับโมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือนของวัสดุมีการแจกแจงแบบ Maximum extreme value มีค่าเฉลี่ย 2.34 GPa และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 51.01 ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานพบว่า คานที่มีความยาวตั้งแต่ 3.70 -4.20 ม. แนวโน้มการแจกแจงเป็นแบบ Lognormal สำหรับคานที่มีความยาวตั้งแต่ 4.50-5.00 ม. การแจกแจงมีแนวโน้มเป็นแบบ Normal ผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง เพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้างที่ผลิตขึ้นจากวัสดุพลาสติคเสริมใยแบบพัลทูด

คำสำคัญ : พลาสติคเสริมใยแบบพัลทูด โมดูลัสยืดหยุ่นการดัด โมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือน โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติ วิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

Abstract

This study proposed the analytic results of the properties of the pultruded fiber reinforced plastic (PFRP) simple channel beam. The dimensions of the beam specimens which were manufactured in Thailand were 152 x 43 x 10 mm. The analysis emphasized on the uncertainty of some material properties that were the modulus of elasticity in bending and shear modulus of elasticity. These material properties were applied to calculate the statistical

*Corresponding author. Tel.: +66 4420 3778; fax: +66 4420 3785

Email address: aob_32@hotmail.com

properties of the critical buckling moment of each beam length. The analysis based on the Monte Carlo Simulation Method (MCSM). The results from this study revealed that the distribution of modulus of elasticity in bending presented in the form of lognormal distribution which had the mean of 30.85 GPa and the coefficient of variant 11.30% and the distribution of shear modulus of elasticity presented in the form of maximum extreme value distribution which had the mean of 2.34 GPa and the coefficient of variant 51.01%. Similarly, the distribution of the critical buckling moment of the beam length from 3.70 m to 4.20 m trended to be Lognormal distribution but the distribution of the beam length from 4.50 m to 5.00 m trended to be Normal distribution. As above mentioned, the analysis results can be used as the data to evaluate the structural reliability in form of the probability of failure of structure which made from the pultruded fiber reinforced plastic.

Keywords : Pultruded fiber reinforced plastic, Modulus of elasticity in bending, Shear modulus of elasticity, Critical buckling moment, Monte carlo simulation method

1. บทนำ

ในระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา วัสดุประกอบชนิดพลาสติกเสริมเส้นใย (Fiber reinforced plastic, FRP) มีการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างอย่างแพร่หลายในประเทศ โดยสามารถนำมาทดแทนเหล็กเสริมและเหล็กรูปพรรณได้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป เช่น อัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง น้ำหนักเบา ด้านทนต่อการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมได้ดี มีความสะดวกและง่ายต่อการก่อสร้าง เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิตพลาสติกเสริมเส้นใยที่ให้อัตราส่วนของผลผลิตต่อต้นทุนที่ดีที่สุด คือ กระบวนการพัลทูด (Pultrusion process) พลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าวจึงเรียกว่า พลาสติกเสริมใยแบบพัลทูด (Pultruded fiber reinforced plastic, FRP) [1-3] ปัจจุบันผู้ผลิตในประเทศไทยได้นำเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกเสริมใยแบบพัลทูดมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ผลิตชิ้นส่วนโครงสร้าง แต่ยังไม่เป็นที่นิยมนำไปใช้งานมากนักทั้งที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป ส่วนที่มีใช้งานก็เป็นเพียงการนำไปใช้กับโครงสร้างขนาดเล็ก โดยมีสาเหตุสำคัญเนื่องจากการขาดข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่แน่นอน และยังไม่มีความรู้มาตรฐานการออกแบบที่ได้รับการยอมรับทั่วไป [3] จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ FRP และมีการนำเสนอสมการประเมินกำลังของโครงสร้าง สำหรับใช้เป็นแนวทางการออกแบบโครงสร้างในอนาคต เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนการใช้วัสดุ FRP ที่พัฒนาขึ้นในประเทศให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างรูปตัวซีที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยสำหรับใช้เป็นโครงสร้างคาน โดยพิจารณาคุณสมบัติสำคัญของ 2 ตัวแปรสุม่นั้นคือ โมดูลัสยืดหยุ่นการดัด (Modulus of elasticity in bending, E_L) และโมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือน (Shear modulus of elasticity, G_{LT}) ของวัสดุ และนำเสนอคุณสมบัติทางสถิติของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติ (Critical buckling moment, M_{cr}) ที่คานสามารถรับได้ การวิเคราะห์และประเมินผลข้างต้นใช้วิธีทางสถิติ เพราะว่าการวิเคราะห์ที่มีความไม่แน่นอนเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเอง การศึกษาที่ใช้ข้อมูลพฤติกรรมของผลการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP ที่ผลิตในประเทศไทย และใช้สมการประเมินโมเมนต์โก่งเดาะของคานที่มีนักวิจัยนำเสนอไว้ในงานวิเคราะห์ผล ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรโครงสร้าง สำหรับใช้เป็นแนวทางการวิเคราะห์ผลและเป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของคาน FRP ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte carlo simulation method, MCSM) เป็นเทคนิคพิเศษที่ใช้สร้างข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติมโดยไม่ต้องทำการทดสอบจริง แต่ต้องใช้คุณสมบัติของข้อมูลเดิมเพื่อใช้สร้าง (Generate) ข้อมูลเพิ่มขึ้นใหม่ เช่น ประสิทธิภาพการแจกแจง ค่าเฉลี่ย (Mean, m) ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation, COV) เป็นต้น และเทคนิคดังกล่าวยังนิยมประยุกต์ใช้

วิเคราะห์แก้ปัญหาที่มีความไม่แน่นอนของตัวแปรร่วมอยู่ด้วย [4] ในการสร้างข้อมูลขึ้นใหม่เมื่อพิจารณาตัวแปรสุ่ม X ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative distribution function, CDF) คือ $F_X(x)$ ถ้าการสร้างข้อมูลลำดับที่ i ขึ้นใหม่แทนด้วย x_i สามารถสร้างขึ้นโดยใช้สมการที่ 1 ที่มีรูปสมการดังนี้ [4]

$$x_i = F_X^{-1}(u_i) \quad (1)$$

เมื่อ

F_X^{-1} คือ อินเวอร์สของ CDF สำหรับแต่ละประเภทการแจกแจงของข้อมูล

u_i คือ เลขสุ่ม (Random number) มีค่าระหว่าง 0 ถึง 3 การศึกษานี้กำหนดใช้เลขสุ่มเป็นตัวเลขทศนิยม 3 ตำแหน่ง

2.2 โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติ

เนื่องด้วยการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP แนวโน้มจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการวิบัติของเหล็ก รูปพรรณ [5] ลักษณะของการวิบัติอย่างหนึ่ง que เลือกศึกษา คือ การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด (Flexural buckling) ซึ่งมีนักวิจัยที่ได้นำเสนอสมการคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติสำหรับคาน FRP ช่วงเดี่ยวน้ำตัดรูปตัวซี ดังในสมการที่ 2 [5]

$$M_{cr} = \Gamma C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{E_L I_y G_{LT} J + \left(\frac{\pi E_L}{L} \right)^2 I_y C_w} \quad (2)$$

$$\text{ถ้า } (L/d) < 20; \quad \Gamma = 1.10 - \frac{4.50}{(L/d)}$$

$$\text{ถ้า } (L/d) \geq 20; \quad \Gamma = 1.10$$

เมื่อ

C_b คือ แฟคเตอร์การปรับค่าในกรณีรับโมเมนต์สม่ำเสมอ = 1.35 (ค่าคงที่)

L คือ ความยาวคานทดสอบ (m)

E_L คือ โมดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุ (kN/cm^2)

I_y คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคานรอบแกน y (cm^4)

G_{LT} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือนของวัสดุ (kN/cm^2)

J คือ ค่าคงที่ของหน้าตัดจากการบิด [6]

$$= \frac{t^3}{3} \times ((2b-t) + d) \quad (\text{cm}^4)$$

t คือ ความหนาของหน้าตัดคาน (cm)

b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน (cm)

d คือ ความลึกของหน้าตัดคาน (cm)

C_w คือ ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยว [6]

$$= \left(\frac{t \times b^3 \times d^2}{12} \right) \times \left(\frac{3b+2d}{6b+d} \right) \quad (\text{cm}^6)$$

2.3 ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน

ถ้าตัวกะประมาณแบบจุดของค่าเฉลี่ยประชากร (μ) คือ $\bar{X}$ มีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) หรือมีจำนวนตัวอย่างที่จะกะประมาณตั้งแต่ 30 ตัวอย่างขึ้นไป จำนวนตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากรจะมีอิทธิพลต่อค่าความแตกต่างระหว่างค่ากะประมาณกับค่าเฉลี่ยประชากร ค่าความแตกต่างนี้เรียกว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error, e) [7] เมื่อค่าความผิดพลาดมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่าค่ากะประมาณกับค่าเฉลี่ยประชากรมีค่าใกล้เคียงกันและถือว่าทดแทนกันได้ การคำนวณหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น $((1 - \alpha) \times 100\%)$ หรือเท่ากับ 99% สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 [7]

$$e = \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

เมื่อ

$Z_{\alpha/2}$ คือ 2.575 เมื่อ $\alpha/2 = 0.005$ (ค่าคงที่)

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

N คือ จำนวนตัวอย่างที่ใช้คำนวณ

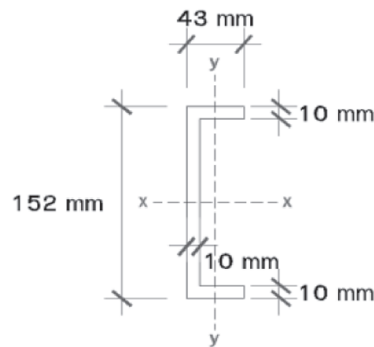
3. วิธีดำเนินการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มต้นด้วยการศึกษาและรวบรวมข้อมูลทฤษฎีของผลทดสอบคาน FRP ช่วงเดี่ยวน้ำตัดตรงนำรูปตัวซี สำหรับข้อมูลที่รวบรวมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพของหน้าตัดคานทดสอบ ผลทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นการดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือนของวัสดุ และสมการประเมินโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานที่มีนักวิจัยได้นำเสนอไว้สำหรับข้อมูลทฤษฎีที่รวบรวมได้จะนำมาตรวจสอบประเภทการแจกแจง (Distribution) ของข้อมูล พร้อมทั้งคำนวณหาค่าเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของข้อมูล การหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละความยาวคานจะใช้ค่าทาง

สถิติของข้อมูลแต่ละประเภทข้างต้น นำมาสร้างข้อมูลขึ้นใหม่โดยใช้วิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลดังสมการที่ 1 ชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นใหม่ถูกใช้คำนวณค่าโมเมนต์โก่งเคาะวิกฤติตามสมการที่ 2 จากนั้นทำการตรวจสอบประเภทการแจกแจงของข้อมูล คำนวณค่าเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของชุดข้อมูลอีกครั้ง จากนั้นวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ระหว่างผลการคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเคาะวิกฤติกับจำนวนการสุ่มตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นแนวทางกำหนดจำนวนการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมต่อหนึ่งรอบการคำนวณ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุมีความไม่แน่นอน เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของโมเมนต์โก่งเคาะวิกฤติตามขั้นตอนข้างต้น จะได้ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลแต่ละครั้งที่คำนวณซ้ำมีค่าไม่เท่ากัน เพื่อให้ผลการคำนวณคงที่มากขึ้นจึงคำนวณหาตัวแทนของชุดข้อมูลค่าเฉลี่ยที่มีค่าแตกต่างกัน โดยคำนวณค่าความผิดพลาดมาตรฐานของชุดค่าเฉลี่ยรวมกันทุกรอบที่มีการคำนวณซ้ำ จนกระทั่งได้ค่าความผิดพลาดมาตรฐานไม่เกิน 1.00 จึงหยุดการคำนวณซ้ำและถือว่าค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยจากทุกรอบที่คำนวณซ้ำเป็นตัวแทนชุดข้อมูล ซึ่งค่าความผิดพลาดมาตรฐานสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3 จึงกล่าวได้ว่าจำนวนข้อมูลของแต่ละตัวแปรสุ่มที่สร้างขึ้นเพื่อให้คำนวณหาโมเมนต์โก่งเคาะวิกฤติของแต่ละความยาวคานและจำนวนรอบการคำนวณซ้ำ มีผลต่อการหาค่าโมเมนต์โก่งเคาะวิกฤติเฉลี่ยให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์และคำนวณผลทั้งหมด ใช้คุณสมบัติของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล 2007 (microsoft excel 2007) ช่วยในการคำนวณ

4. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของคาน CFRP หน้าตัดตรงนำรูปตัวซีขนาด C 152 ด 43 ด 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้ข้อมูลดังปรากฏในตารางที่ 1 เมื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลสถิติของผลการทดสอบคานขนาดดังกล่าวจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดัดของคาน CFRP ตามมาตรฐาน ASTM D 790 – 03 มีข้อมูลสถิติเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุจำนวน 15 ข้อมูล และการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของวัสดุประกอบตามมาตรฐาน ASTM D 5379/D 5379M – 05 มีข้อมูลสถิติเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือนของวัสดุจำนวน 8 ข้อมูล

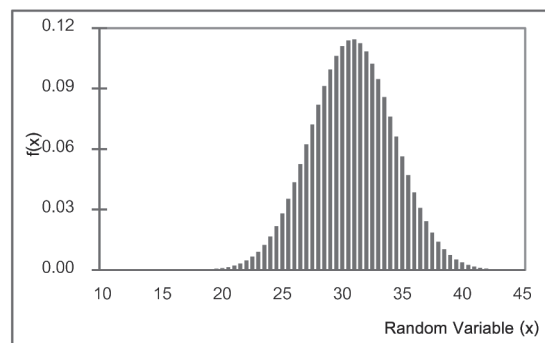


รูปที่ 1 คาน CFRP หน้าตัดตรงนำขนาด C 152X43X10 mm

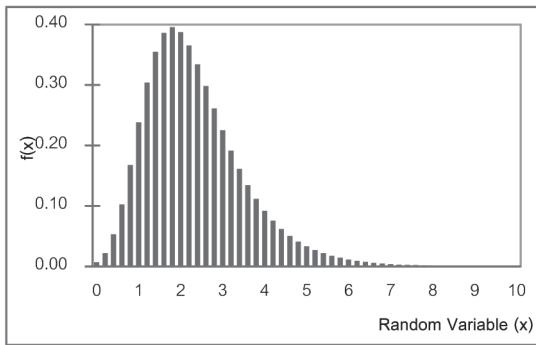
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของคาน CFRP หน้าตัดตรงนำรูปตัวซีที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

C 152x43x10 mm (dx b x t mm)		
พื้นที่หน้าตัด (A)	21.80	cm ²
โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน x (I_x)	625.91	cm ⁴
โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน y (I_y)	28.53	cm ⁴
รัศมีโรเจชั่นรอบแกน x (r_x)	5.36	cm
รัศมีโรเจชั่นรอบแกน y (r_y)	1.14	cm

ข้อมูลสถิติทุกชนิดทั้งหมดที่รวบรวมได้ข้างต้นถูกนำมาทดสอบการเข้ารูปสนธิ (Goodness of fit) เพื่อหาลักษณะการแจกแจงของข้อมูลแต่ละชุด จากลักษณะการแจกแจงที่ได้จะทราบถึงรูปแบบฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function, PDF) ของแต่ละชุดข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 และสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของชุดข้อมูลดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบ Lognormal สำหรับโมดูลัสยืดหยุ่นการดัด



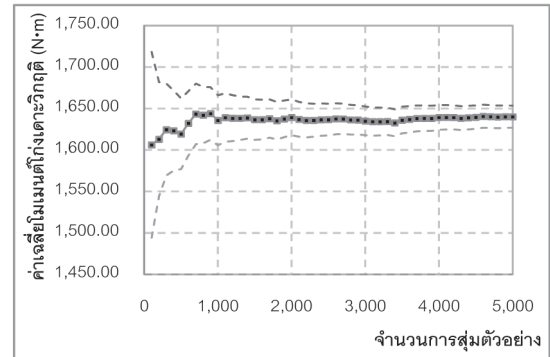
รูปที่ 3 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบ Maximum extreme value สำหรับโมดูลัสยืดหยุ่นการเชื่อม

ข้อมูลในตารางที่ 2 ถูกใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานที่มีความยาวต่างๆ กัน โดยใช้วิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล การศึกษาครั้งนี้จะนำเสนอการผลวิเคราะห์ความไว (sensitivity) ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติกับจำนวนการสุ่มตัวอย่าง เนื่องจากความไม่แน่นอนของการสุ่ม (Random) และสร้าง (Generate) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นการตัดและโมดูลัสยืดหยุ่นการเชื่อมในการคำนวณ ส่งผลให้ค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติที่คำนวณได้มีค่าไม่คงที่ ดังนั้น จำนวนการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาค่าคงที่มากขึ้น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางสถิติของวัสดุ FRP หน้าตัดรายนำรูปตัวซีขนาด C 152 x 43 x 10 mm

ตัวแปรสุ่ม	ประเภทการแจกแจง	Mean (GPa)	COV (%)
โมดูลัสยืดหยุ่นการตัด	Lognormal	30.85	11.30
โมดูลัสยืดหยุ่นการเชื่อม	Maximum extreme value	2.34	51.01

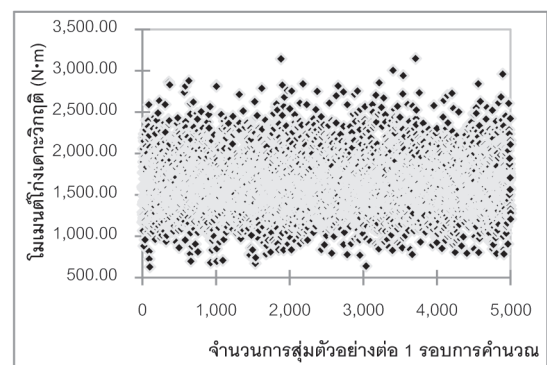
การศึกษาความไวเริ่มต้นสุ่มและสร้างชุดข้อมูล แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 2 เพื่อคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติให้ได้ 100 ข้อมูล ผลลัพธ์นำไปหาลักษณะการแจกแจงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับจำนวนข้อมูล ซึ่งเป็นดังกราฟเครื่องหมายสี่เหลี่ยมของเส้นกึ่งกลางในรูปที่ 4 ทำซ้ำกระบวนการข้างต้นเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติเพิ่มครั้งละ 100 ข้อมูล จนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งหมด 5,000 ข้อมูล



รูปที่ 4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติกับจำนวนการสุ่มตัวอย่างของคานยาว 3.50 m

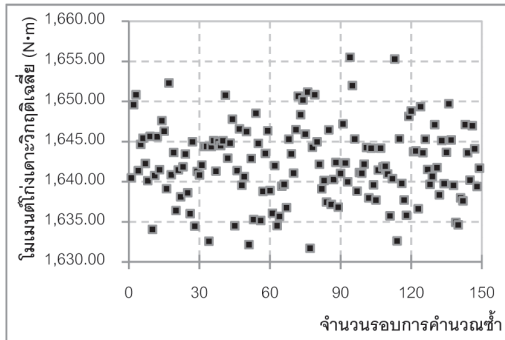
ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละรอบของการสุ่มตัวอย่าง ถูกนำมาคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 99 ของประชากร และสามารถสร้างกราฟช่วงความเชื่อมั่นบนและล่างได้ดังกราฟเส้นประเส้นบนสุดและเส้นล่างสุดของรูปที่ 4 จากกราฟพบว่า เมื่อจำนวนการสุ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลจะมีความน้อยลง ทำให้เส้นกราฟช่วงความเชื่อมั่นลู่เข้าหากัน และส่งผลให้ค่าเฉลี่ยมีค่าคงที่มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งที่จำนวนการสุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 4,000 ข้อมูลขึ้นไป ค่าเฉลี่ยมีค่าคงที่มากขึ้น การศึกษาจึงสุ่มตัวอย่างแต่ละตัวแปรสุ่ม 5,000 ข้อมูล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่างๆ ต่อไป

ดังนั้น การวิเคราะห์คุณสมบัติทางสถิติของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติที่มีความยาวคานต่างๆ จะได้ชุดข้อมูลโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติจำนวน 5,000 ข้อมูลต่อ 1 รอบการคำนวณ แต่ละชุดข้อมูลดังกล่าวถูกนำไปวิเคราะห์ประเภทการแจกแจงค่าเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของข้อมูลตัวอย่างการสุ่มและสร้างชุดข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติสำหรับคานยาว 3.50 m

เพื่อตรวจสอบค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติที่ได้จากการคำนวณ จึงทำการคำนวณซ้ำตามขั้นตอนข้างต้นซึ่งพบว่า ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละรอบการคำนวณซ้ำมีค่าไม่คงที่แต่ก็มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากชุดตัวเลขสุ่ม (Random number) ที่สุ่มมาใช้ในการคำนวณแต่ละรอบตามวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลไม่เหมือนกัน ดังตัวอย่างค่าเฉลี่ยของผลการคำนวณโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติซ้ำ 150 รอบ สำหรับคานยาว 3.50 m ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติที่คำนวณซ้ำ 150 รอบ สำหรับคานยาว 3.50 m เพื่อให้ค่า $e < 1.00$

การคำนวณเพื่อหาตัวแทนของชุดข้อมูลที่มีการคำนวณซ้ำของแต่ละความยาวคาน ได้ทำการหาค่าประมาณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของชุดข้อมูล โดยหาค่าเฉลี่ยของชุดค่าเฉลี่ยการคำนวณซ้ำของแต่ละความยาวคาน ที่ให้ค่าความผิดพลาดมาตรฐานไม่เกิน 1.00 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ผลการหาค่าประมาณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละความยาวคาน ($M_{cr,CAL}$) และคุณสมบัติทางสถิติที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากข้อกำหนดการวิเคราะห์ข้างต้น ทำให้การคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละความยาวคานต้องทำซ้ำมากกว่า 80 รอบขึ้นไป หมายความว่า มีจำนวนชุดข้อมูลโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติเฉลี่ยแต่ละความยาวคานที่ใช้หาค่าประมาณมากกว่า 80 ชุดข้อมูลเช่นกัน

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานที่มีความยาวตั้งแต่ 1.50 m ถึง 4.20 m มีแนวโน้มการแจกแจงแบบ Lognormal สำหรับคานที่มีความยาวตั้งแต่ 4.50 m ถึง 5.00 m โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติมีแนวโน้มการแจกแจงเป็นแบบ Normal ค่าเฉลี่ยโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติจากการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แนวทางประเมินข้างต้นจึงเหมาะสมที่จะนำมา

ประยุกต์ใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของคานที่ผลิตจากวัสดุ FRP เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 3 ผลคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละความยาวคาน

ความยาว คาน (m)	โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติ ($M_{cr,CAL}$)		
	การแจกแจง	Mean (N-m)	COV (%)
1.50	Lognormal	3,378.41	0.20
1.70	Lognormal	3,020.27	0.22
2.00	Lognormal	2,585.92	0.22
2.20	Lognormal	2,354.63	0.25
2.50	Lognormal	2,073.65	0.25
2.70	Lognormal	1,921.00	0.28
3.00	Lognormal	1,730.33	0.29
3.20	Lognormal	1,832.23	0.25
3.50	Lognormal	1,642.32	0.29
3.70	Lognormal	1,538.10	0.31
4.00	Lognormal	1,402.71	0.32
4.20	Lognormal	1,326.80	0.32
4.50	Normal	1,225.28	0.29
4.70	Normal	1,165.98	0.32
5.00	Normal	1,088.38	0.33

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวคาน กับผลคำนวณโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานพบว่า คานที่มีความยาวเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานที่คำนวณได้มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นที่คานยาว 3.20 m. โมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าที่คานยาว 3.00 m. ทั้งนี้เนื่องจากผลของสมการที่ 2 ที่ใช้ในการประเมิน ซึ่งกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน (L/d) กับค่า Γ ไว้ดังสมการ ซึ่งที่คานยาว 3.20 m. เป็นจุดเปลี่ยนการใช้ค่า Γ ในการคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคาน ดังนั้นที่ความยาวคานกล่าวจึงมีแนวโน้มของผลการคำนวณค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติแตกต่างจากความยาวคานที่น้อยกว่า

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิของผลทดสอบคานช่วงเดี่ยวน้ำตัดตรงนำรูปตัวซีขนาด ขนาด C 152 x 43

x 10 mm ที่ผลิตจากวัสดุ PFRP ในประเทศไทย เพื่อนำเสนอคุณสมบัติของวัสดุ PFRP บางค่า และนำเสนอคุณสมบัติทางสถิติของโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของแต่ละความยาวคาน การวิเคราะห์ผลให้ความสำคัญกับความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

1. โมดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุ PFRP มีการแจกแจงแบบ Lognormal มีค่าเฉลี่ย 30.85 GPa และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 11.30

2. โมดูลัสยืดหยุ่นการเฉือนของวัสดุมีการแจกแจงแบบ Maximum extreme value มีค่าเฉลี่ย 2.34 GPa และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 51.0

3. จากคานกรณีศึกษาที่คานมีความยาวไม่เกิน 4.20 ม. ลักษณะการแจกแจงของค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติของคานที่คำนวณจากสมการมีแนวโน้มเป็นแบบ Lognormal สำหรับคานที่มีความยาวมากกว่า 4.20 ม. แต่ไม่เกิน 5.00 ม. การแจกแจงค่าโมเมนต์โก่งเดาะวิกฤติมีแนวโน้มเป็นแบบ Normal โดยมีค่าทางสถิติแสดงในตารางที่ 3

4. การวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล จำนวนการสุ่มตัวอย่างสำหรับใช้วิเคราะห์มีผลต่อความคงที่ของผลลัพธ์การคำนวณ ซึ่งขึ้นกับค่าทางสถิติของตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ ดังนั้น ควรต้องมีการวิเคราะห์ความไวของจำนวนการสุ่มตัวอย่าง เพื่อใช้พิจารณากำหนดจำนวนการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติคาน PFRP ขนาดหน้าตัดอื่นที่ผลิตในประเทศไทยเพิ่มเติม เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางสถิติของวัสดุสำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง เมื่อได้ค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมจึงจะกำหนดเป็นค่าสำหรับนำไปใช้งานต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และประเมินผล เพื่อใช้ประกอบการเขียนบทความนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thumrongvut J, Seangatith S. On the structural responses of simply supported PFRP channel beams under three-point loading. International Journal of Civil & Environmental Engineering. 2011;11(4):13-17
- [2] Thumrongvut J, Seangatith S. Experimental study on lateral-torsional buckling of PFRP cantilevered channel beams. Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12); 2011 Jan 26-28; Hong Kong Special Administrative Region, China. 2011.
- [3] Boonsuan W, Seangatith S, Vongchavalitkul S. Behaviors and properties of pultruded fiber reinforced plastic produced in Thailand under compression, shear and flexure. The 14th National Convention on Civil Engineering; 2009 May 13-15; Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. 2009. p. 1625-32. (In Thai).
- [4] Nowak AS, Collins KR. Reliability of structures. McGraw-Hill: Singapore; 2000.
- [5] Thumrongvut J. Analytical and experimental characterization of pultruded fiber-reinforced plastic channel section under flexure [Ph.D. thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2011. (In Thai).
- [6] Timoshenko SP. Theory of elastic stability. McGRAW-HILL: New York; 1961.
- [7] Ronald EW, Raymond HM, Sharon LM, Keying Ye. Probability & Statistics for Engineering & Scientists. Prentice Hall: United States; 2002.