

# การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุ คอมโพสิตไม้ – ซีเมนต์

## Design and Analysis of Wood-Cement Composite Honeycomb Sandwich Structure

ปณปวีร์ จงรัตน์ศรีกุล สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: [punpawee@tisi.go.th](mailto:punpawee@tisi.go.th)

### บทคัดย่อ

โครงสร้างประกบรังผึ้งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่มีค่าทางวิศวกรรมโครงสร้างที่พัฒนาโดยอุตสาหกรรมคอมโพสิต ได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรมเช่นการบิน การขนส่งระบบรางและอื่น ๆ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ เป็นแผ่นหน้าและเป็นวัสดุหลักที่ถูกเลือกใช้ โครงสร้างรังผึ้งส่วนใหญ่จะจัดเป็นระเบียบในรูปแบบของเซลล์หกเหลี่ยมกลวงกับผนังแนวตั้งของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ โครงสร้างรังผึ้งมีคุณสมบัติที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยโครงสร้างรังผึ้งเหล่านี้มีความพรุนสูงมาก โดยทั่วไปแล้ว 75-95% ของโครงสร้างประกอบด้วยช่องว่าง การทดสอบโดยการดัดโค้งสามจุดได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบการไหลและเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการทดลองระหว่างแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนาต่าง ๆ กัน นำมาประกอบกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งที่มีความหนารวม 24 มิลลิเมตรกับแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีความหนา 24 มม. โดยผลที่ได้เห็นว่าวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง ได้ทำให้พบกับความหลากหลายของการใช้งานในการแลกเปลี่ยนความร้อน การดูดซับพลังงาน การกระจายการไหลและน้ำหนักเบา วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีโครงสร้างรังผึ้งที่ใช้ในงานวิศวกรรมและในทางวิทยาศาสตร์ในอุตสาหกรรมนั้นมีความพรุนและความแข็งแรง

คำสำคัญ: วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์, โครงสร้างประกบรังผึ้ง

### Abstract

The honey comb sandwich construction is one of the most valued structural engineering innovations developed by the composite industry. Used extensively in many industries like aerospace, transportation rails, etc. In this study a wood - cement particle board chosen a face sheet is a core material. Honeycombs are most often an array of hollow hexagonal cells with thin vertical walls wood - cement particle board with Honeycomb is low density permeable material with numerous applications. The defining characteristic of these Honeycombs is a very high porosity; typically 75-95% of the volume consists of void spaces. Static three-point bending tests were carried out in order to investigate load and compared with experimental and simulation results between Wood Cement different thickness. built to honeycomb structure total thickness of 24 mm and cement particle boards with a thickness of 24 mm. Wood - cement particle board Honeycombs have found a wide variety of applications in heat exchangers, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

energy absorption, flow diffusion and lightweight optics. wood - cement particle board honeycomb is used in numerous engineering and scientific applications in industry for both porosity and strength

**Keywords :** Wood-Cement Composite, Honeycomb Sandwich Structure

## 1. บทนำ

แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ (wood cement particle board) เป็นผลิตภัณฑ์แผ่นไม้อัดซีเมนต์ (wood cementboard) ชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมระหว่างชิ้นไม้สับ (wood chip) และปูนซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่รวมคุณสมบัติที่ีระหว่างไม้และปูนซีเมนต์ ได้แก่ ทนน้ำ ทนไฟ ทนปลวก เชื้อราและแมลง รวมทั้งไม่มีอันตรายจากฝุ่นผงใยหิน แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์สามารถนำไปใช้ก่อสร้างอาคารบ้านเรือนได้ทั้งหลัง พัฒนาเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน หลังคา ในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์สามารถนำไม้ขนาดเล็ก เศษไม้จากโรงงานมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ เป็นการใช้อย่างคุ้มค่า ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้จริง ช่วยลดปัญหาการขาดแคลนไม้ และช่วยลดภาวะโลกร้อน จะเห็นได้ว่าแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ไม้จริงได้และไม่มีอันตรายต่อสุขภาพ โดยในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยนำ วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์มาทำเป็น โครงสร้างแบบรังผึ้ง

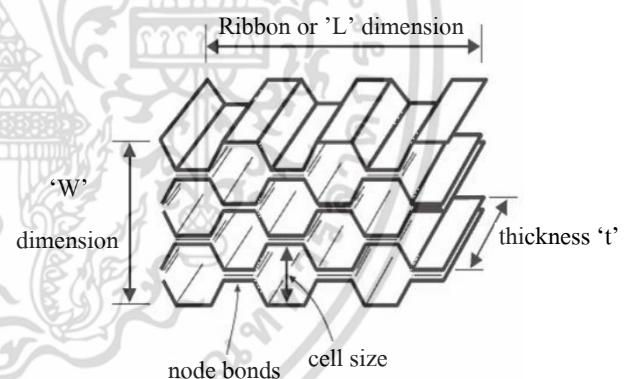


รูปที่ 1 แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์

โครงสร้างแบบรังผึ้งเป็นการก่อสร้างที่นิยมใช้ใน โครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงมั่นคงและมีประสิทธิภาพในการที่จะต้องรับน้ำหนักมากที่สุด โครงสร้างแบบรังผึ้งลักษณะหกเหลี่ยมเป็นวัสดุหลัก พื้นฐานที่ทำให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพ มีความแข็งแรงและทนต่อการเสีรูป โดยพื้นฐานแนวคิดของ

โครงสร้างนี้คือแผ่นผิวด้านหน้าจะเป็น โครงสร้างหลักที่รับแรงความเค้นดัด ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับความเค้น โดยมีความคล้ายคลึงอย่างมากกับลักษณะของการรับแรงแบบคาน โครงสร้างแบบรังผึ้งเป็นแนวคิดการออกแบบ โครงสร้างที่น่าสนใจ โดยเป็นทางเลือกที่เหมาะสมของวัสดุและรูปทรงเรขาคณิต โดยโครงสร้างมีอัตราส่วนที่สูงระหว่างความต้านทานการเสีรูปกับน้ำหนักที่สามารถรองรับได้

โครงสร้างรังผึ้งมักจะใช้สำหรับฉนวนกันความร้อน, ฉนวนดูดซับมลพิษสิ่งแวดล้อม โครงสร้างรังผึ้งช่วยให้ลดปริมาณของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ มีน้ำหนักที่เบา จึงลดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าวัสดุได้อย่างมาก



รูปที่ 2 โครงสร้างแบบรังผึ้ง

การศึกษาลักษณะความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแซนวิชรังผึ้งนั้น เป็นที่แพร่หลายในหมู่นักวิจัย มีการนำเสนอผลงานวิจัยหลากหลายรูปแบบ แต่โดยส่วนใหญ่เน้นเป็นการศึกษาโดยใช้วัสดุในกลุ่มโลหะ เช่น [1] หยางและเฉียว (2008) ได้ดำเนินการศึกษาวัสดุที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแบบแซนวิชรังผึ้ง ซึ่งจะนำมาใช้ในการจำลองผลกระทบและพบว่า มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเมื่อมีการเพิ่มโหลด.[2] พิก และ อัล (1999) ได้ศึกษาลักษณะความ

เอ็กสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงของโครงสร้างแบบแชนวิชของแผงอลูมิเนียมรีง  
 ฝั่งโดยใช้ชุดการทดสอบความแข็งแรงคือการทดสอบจุด  
 ที่เกิดการโค้ง พวกเขายังได้ดำเนินการศึกษาเชิงทฤษฎีใน  
 การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นพลาสติก พฤติกรรมการโค้ง  
 แรงที่ดีที่สุดและความแข็งแรงของแผงแชนวิช.[3] คูหา  
 นิน, จอห์น, โจชโค และ กัชเซอร์ ได้ศึกษาพฤติกรรม  
 ของโครงสร้างแบบแชนวิชแผงรีงฝั่งในลักษณะอยู่กับที่  
 โดยใช้วัสดุเรซินในการทดลอง

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงขอเสนอการ  
 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแชนวิชรีง  
 ฝั่งของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป เพื่อเป็นทางเลือกและ  
 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมต่างๆได้

**2. ขั้นตอนการทดลอง**

**2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง**

2.1.1 วัสดุแผ่นซีเมนต์อัดซีเมนต์ความหนา  
 ต่างๆกัน โดยนำมาประกอบกันขึ้นเป็น โครงสร้างรีงฝั่ง  
 ให้ได้ความหนา 24 มิลลิเมตร

2.1.2 วัสดุแผ่นซีเมนต์อัดซีเมนต์ความหนา 24  
 มิลลิเมตร

โดยทั้ง 2 ประเภทนั้นเลือกใช้วัสดุแผ่นซีเมนต์  
 อัดซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และซีเมนต์  
 ในอัตราส่วน 1:3 โดยหลักการเลือกวัสดุนี้ ต้องเป็นไป  
 มาตรฐาน มอก.878 ซึ่งวัสดุแผ่นซีเมนต์อัดซีเมนต์ทั้ง 2  
 อัตราส่วน (ตารางที่ 2) นั้น ให้คุณสมบัติที่ไม่ต่างจาก  
 ค่าที่กำหนดและเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.878 (ตารางที่  
 3)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุแผ่นซีเมนต์อัดซีเมนต์

| Property        | Value  | Units |
|-----------------|--------|-------|
| Elastic Modulus | 3000   | N/mm2 |
| Poison's Ratio  | 0.3    | N/A   |
| Shear Modulus   | 300    | N/mm2 |
| Mass Density    | 159.99 | Kg/m3 |
| Yield Strength  | 20     | N/mm2 |

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพตามอัตรา  
 ส่วนระหว่างซีเมนต์และซีเมนต์

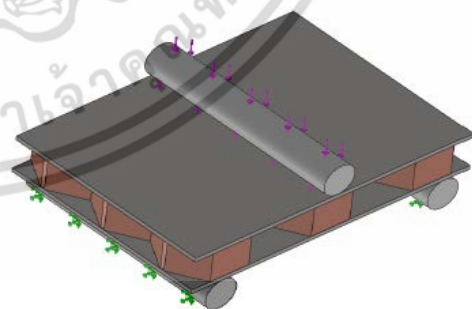
| Wood:Cement   | Density (g/cm3) | MOR (N/mm2) | MOE (N/mm2)   | IB (N/mm2) |
|---------------|-----------------|-------------|---------------|------------|
| 1:3           | 1.27(0.18)      | 12.68(0.5)  | 6009.6(32.1)  | 0.35(0.07) |
| 1:4           | 1.28(0.12)      | 10.56(0.8)  | 7056.4(199.3) | 0.56(0.04) |
| BISON type HZ | 1.20            | 9.0         | 3000          | 0.4        |

ตารางที่ 3 คุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.878

| รายการที่ | คุณลักษณะ  | เกณฑ์ที่กำหนด | วิธีทดสอบตาม |
|-----------|--|---------------|--------------|
| 1         | การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ร้อยละไม่เกิน                     | 2             | ข้อ 9.5      |
| 2         | ความต้านแรงดัด เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า                  | 9             | ข้อ 9.6      |
| 3         | มอดูลัสยืดหยุ่น เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า                 | 3 000         | ข้อ 9.6      |
| 4         | ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า | 0.5           | ข้อ 9.7      |

**2.2 ทฤษฎีการจำลองของการทดสอบโครงสร้างแบบ  
 แชนวิช (พฤติกรรมการโค้ง)**

วิธีที่ง่ายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรม  
 การโค้ง โดยแสดงจากชั้นทดสอบที่มีโครงสร้างแบบแชน  
 วิชด์ ภายใต้เส้นโหลดที่ช่วงกลางของโครงสร้างได้รับ  
 การพิจารณาตามที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แรงกระทำลงที่จุดกึ่งกลางของโครงสร้างรีงฝั่ง

จากรูปแสดงให้เห็นว่าผิวด้านหน้าได้รับความ  
 เเค้นดัดเท่านั้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของความเค้นดัดนั้น  
 เป็นไปตามทิศทางของความหนา ทั้ง โครงสร้างรีงฝั่ง  
 และผิวหน้า สามารถหาความหนาของแผ่นได้จาก

$$(f = TC) = 5mm$$

โดย เกลซี (1958) ได้เสนอสูตรของการคำนวณการโก่งช่วงกลาง  $\delta$ , โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น  $E_f$ , ปริมาตรของรังผึ้ง  $I_f$ , โครงสร้างรังผึ้งแผงแซนวิชที่ทำจากแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์ในระบอบที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = Pa^3 / 48E_f I_f + Pa / 4A_c G_{ea} \quad (1)$$

ในส่วนแรกทางด้านขวามือในของสมการ (1) เป็นผลกระทบที่เกิดจากการโก่งงอและในส่วนที่สองเกิดจากแรงเฉือน ดังจะเห็นในรูป 3 การเปรียบเทียบของทฤษฎีการคาดการณ์ (เช่นระหว่างโพลดและโก่งช่วงกลาง) โดยใช้สมการ 1 จะทำกับผลการทดลองสำหรับชิ้นงานทดสอบในปัจจุบันภายใต้การตัด จะเห็นว่าสมการ (1) สามารถคาดการณ์การตอบสนองการยืดหยุ่นเชิงเส้นของคานารับน้ำหนักแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์รังผึ้งแซนวิชได้ดี โดยที่

$P$  = แรงที่กระทำลงบนวัตถุที่ทำให้เกิดการโก่ง

$a$  = ระยะห่างระหว่างแท่นที่รองรับวัตถุ

$E_f$  = โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น

$I_f$  = ปริมาตรของวัตถุ

$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

$G_{ea}$  = โมดูลัสของแรงเฉือน

ที่ซึ่ง  $C$  เป็นค่าคงที่ ที่เป็นตัวแทนของแรงเฉือนที่เกิดจากแกนของรังผึ้งในขณะที่ได้รับการตัด ค่าคงที่  $C$  อาจได้รับจากสมการ (1) โดยการสมมติว่ามีผลกระทบของแรงเฉือนของแกนเพื่อให้ความแข็งแรงของแผ่นไม้ที่คล้ายกับที่ให้ความต้านทานการเสียดรูปของผนังแผง ผลลัพธ์เหล่านี้ได้จาก

$$C = C1 / C1 + C2 \quad (2)$$

$$\text{where, } C1 = d^3 / 48E_f I_f,$$

$$C2 = d / 4A_c G_{ca} \quad (3)$$

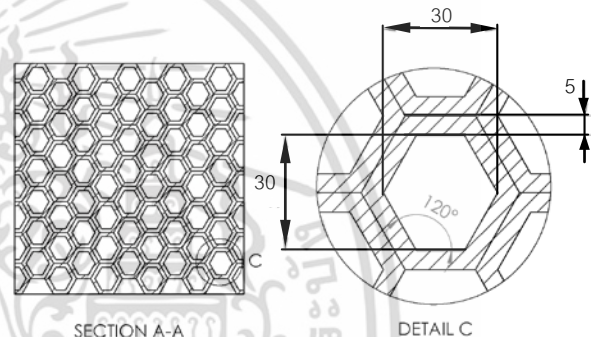
### 2.3.การดำเนินการทดลอง

ข้อมูลที่กำหนดใน โปรแกรมการวิเคราะห์

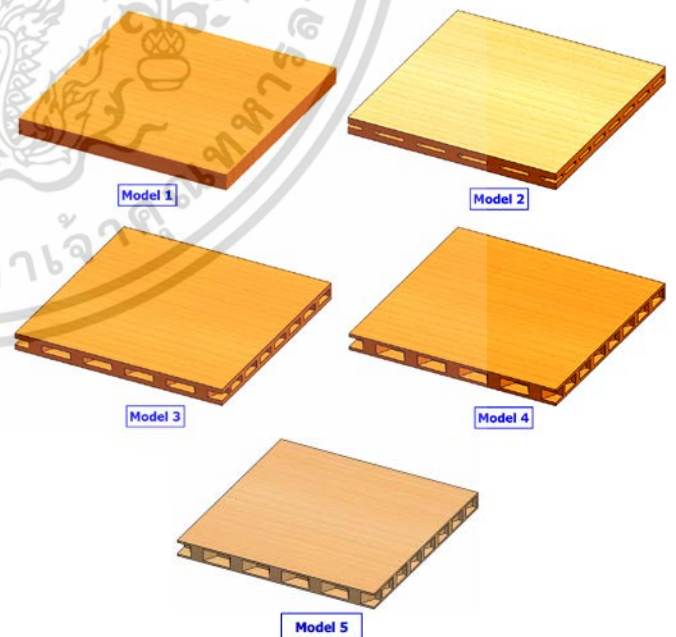
#### แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบจำลองที่ 1 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 24 มม.
2. แบบจำลองที่ 2 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 9.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 5 มม.
3. แบบจำลองที่ 3 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 7 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 10 มม.
4. แบบจำลองที่ 4 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 4.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 15 มม.
5. แบบจำลองที่ 5 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 3.0 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 18 มม.



รูปที่ 4 ขนาดของรังผึ้ง



รูปที่ 5 แบบจำลองทั้ง 5 รูปแบบ

การทดลอง



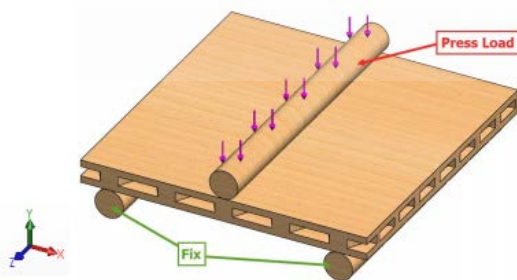
รูปที่ 6 3-point bending test

ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดลอง

| Type of support | Movement Characteristics |                   |                 |
|-----------------|--------------------------|-------------------|-----------------|
|                 | Horizontal               | Vertical          | Rotation        |
| Hinged Support  | $\Delta_x = 0$           | $\Delta_y = 0$    | $\theta \neq 0$ |
| Roller Support  | $\Delta_x \neq 0$        | $\Delta_y = 0$    | $\theta \neq 0$ |
| Fixed Support   | $\Delta_x = 0$           | $\Delta_y = 0$    | $\theta \neq 0$ |
| Spring Support  | $\Delta_x \neq 0$        | $\Delta_y \neq 0$ | $\theta \neq 0$ |

รูปที่ 7 Boundary Condition

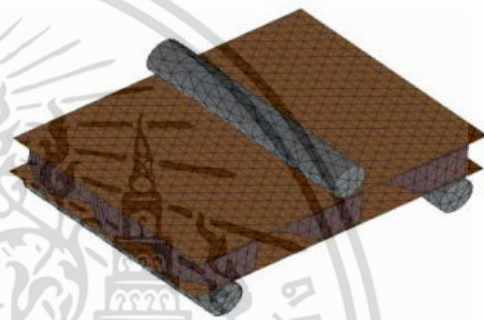
- ยึดชิ้นงานแท่งเหล็กทรงกระบอกด้านล่างทั้ง 2 ข้าง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางแท่งเหล็ก 240 mm
- แร่งกระทำคดที่ผ่านแท่งเหล็กทรงกระบอกด้านบน โดยมีขนาดของแรงดังนี้
  - 2000 N
  - 5000 N
  - 7000 N



รูปที่ 8 แบบจำลองแสดงทิศทางของแรง

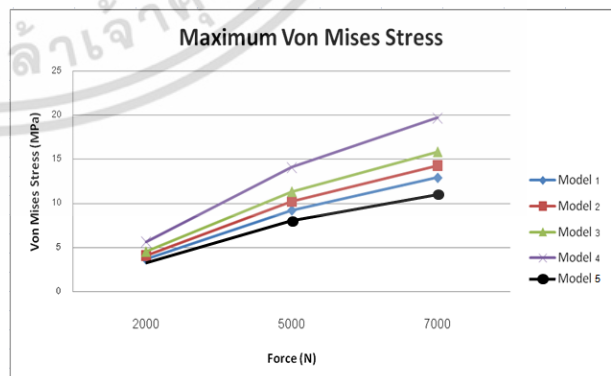
3.ผลการทดลอง

การวิเคราะห์แบบวัตถุไม่เคลื่อนที่ได้ ดำเนินการเพื่อที่จะได้รับผลของการตอบสนองของ โครงสร้างแฉ่งรังผึ้งหกเหลี่ยมแซนวิชที่ได้รับแรงกระทำ โหลดที่แตกต่างกันกล่าวคือ 2kN, 5kN, 7kN และที่ความ สูงของโครงสร้างรังผึ้งที่แตกต่างกันกล่าวคือ 0 มม. 5 มม. 10 มม. 15 มม. และ 18 มม. โดยทำการสังเกตใน ระหว่างการวิเคราะห์การโก่งที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการ เพิ่มขึ้นของแรงที่กระทำโดย รูปที่ 8 แสดงถึงทิศทาง การเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทั้ง 5 รูปแบบ



รูปที่ 9 Meshed Model

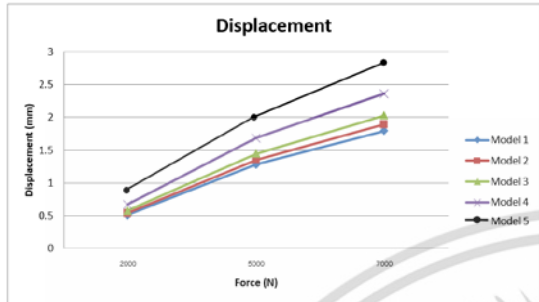
ความโก่ง และความเครียด จะถูกนำเสนอใน ลักษณะกราฟ ดังแสดงที่ในรูป 10 และ 11 กราฟแสดง ถึงการเปลี่ยนแปลงของความเครียด กับการโหลด ตาม ขนาดความสูงของโครงสร้างรังผึ้งต่างๆ ในรูปที่ 12 จาก ตารางสรุปผล จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่าความเครียด เพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัด เมื่อมีแรงกระทำบนวัสดุทดสอบ เพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 รูปแบบของความเครียดที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบ

จากรูปที่ 10 พบว่าขนาดของแรงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผล กระทบต่อวัสดุที่ทำการทดลอง โดย Max Von Mises

Stress สูงที่สุดที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดในขณะที่ทำให้แรงสูงสุด ที่ 7 kN และที่ Model 1 เกิด Max Von Mises Stress สูงที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุเท่ากัน เนื่องจากรูปแบบของ Model ที่ 1 นั้นไม่มีความกลวงจึงสามารถรับความเค้นได้ดีในระดับที่สูงกว่า Model อื่นๆ



รูปที่ 11 รูปแบบการโก่งตัวที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบ จากรูปที่ 11 พบว่าขนาดของแรงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ทำการทดลอง โดยการเกิด Displacement สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดลนั้น จะเกิดในขณะที่ทำให้แรงสูงสุดที่ 7 kN และที่ Model 5 นั้นเกิด Displacement สูงที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุเท่ากัน นั่นคือเมื่อวัตถุมีความกลวงมากขึ้น จะทำให้ Displacement มากขึ้นเช่นกัน

ตารางแสดงค่า Stress และ Displacement ในกราฟ

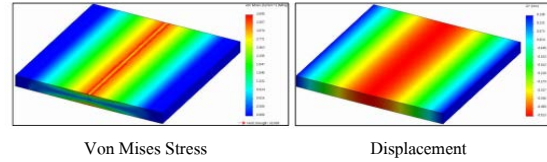
| Part                                | Value                      | Force (N) |       |       |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------|-------|-------|
|                                     |                            | 2000      | 5000  | 7000  |
| Model 1<br>Wood 24 mm               | Max Von Mises Stress (MPa) | 3.695     | 9.237 | 12.93 |
|                                     | Max Displacement (mm)      | 0.513     | 1.283 | 1.796 |
|                                     | Max Shear Stress YZ (MPa)  | 0.221     | 0.531 | 0.744 |
|                                     | Max Shear Stress XY (MPa)  | 0.463     | 1.158 | 1.621 |
|                                     | Max Shear Stress XZ (MPa)  | 0.046     | 0.115 | 0.161 |
| Model 2<br>Wood 9.5 mm<br>Hex 5 mm  | Max Von Mises Stress (MPa) | 4.09      | 10.23 | 14.32 |
|                                     | Max Displacement (mm)      | 0.541     | 1.352 | 1.893 |
|                                     | Max Shear Stress YZ (MPa)  | 0.394     | 0.985 | 1.379 |
|                                     | Max Shear Stress XY (MPa)  | 1.015     | 2.538 | 3.553 |
|                                     | Max Shear Stress XZ (MPa)  | 0.43      | 1.075 | 1.505 |
| Model 3<br>Wood 7 mm<br>Hex 10 mm   | Max Von Mises Stress (MPa) | 4.531     | 11.33 | 15.86 |
|                                     | Max Displacement (mm)      | 0.579     | 1.447 | 2.026 |
|                                     | Max Shear Stress YZ (MPa)  | 0.502     | 1.255 | 1.756 |
|                                     | Max Shear Stress XY (MPa)  | 1.171     | 2.929 | 4.1   |
|                                     | Max Shear Stress XZ (MPa)  | 0.542     | 1.354 | 1.896 |
| Model 4<br>Wood 4.5 mm<br>Hex 15 mm | Max Von Mises Stress (MPa) | 5.631     | 14.08 | 19.71 |
|                                     | Max Displacement (mm)      | 0.675     | 1.686 | 2.361 |
|                                     | Max Shear Stress YZ (MPa)  | 0.794     | 1.986 | 2.781 |
|                                     | Max Shear Stress XY (MPa)  | 1.287     | 3.218 | 4.505 |
|                                     | Max Shear Stress XZ (MPa)  | 0.638     | 1.595 | 2.233 |
| Model 5<br>Wood 3 mm<br>Hex 18 mm   | Max Von Mises Stress (MPa) | 7.453     | 18.63 | 26.09 |
|                                     | Max Displacement (mm)      | 0.804     | 2.01  | 2.814 |
|                                     | Max Shear Stress YZ (MPa)  | 1.007     | 2.517 | 3.523 |
|                                     | Max Shear Stress XY (MPa)  | 1.418     | 3.544 | 4.962 |
|                                     | Max Shear Stress XZ (MPa)  | 1.036     | 2.591 | 3.627 |

รูปที่ 12 ตารางสรุปผลการทดลอง

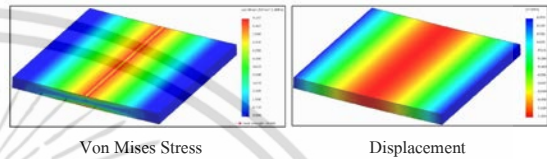
ผลการทดลอง

1 แบบจำลองที่ 1 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 24 มม.

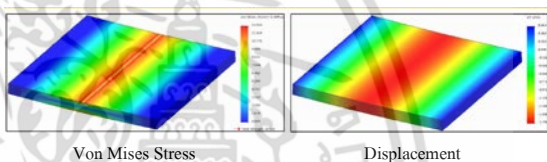
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

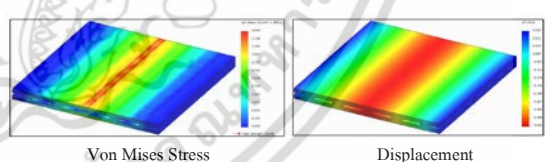


- แรงขนาด 7000 N

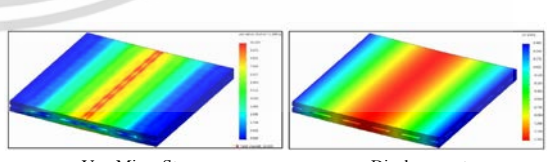


2. แบบจำลองที่ 2 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 9.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 5 มม.

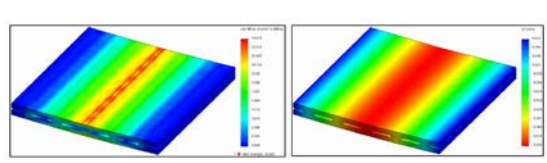
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N



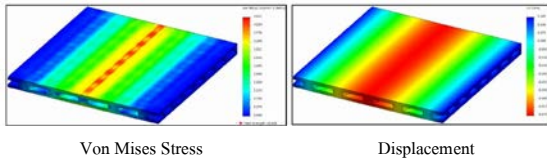
- แรงขนาด 7000 N



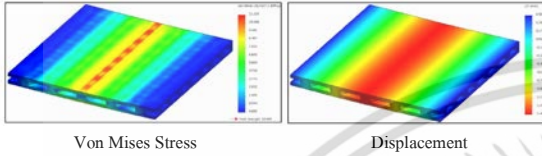
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 แบบจำลองที่ 3 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.  
หนา 7 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 10 มม.

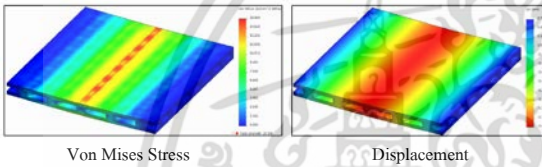
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

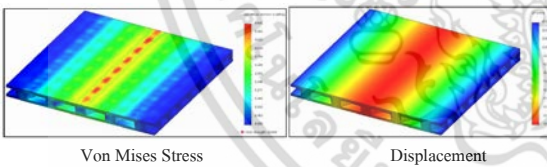


- แรงขนาด 7000 N

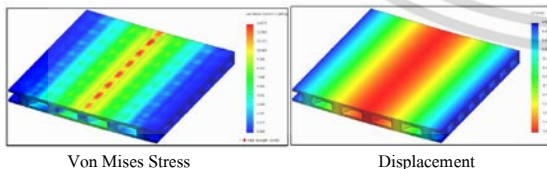


4 แบบจำลองที่ 4 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.  
หนา 4.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 15 มม.

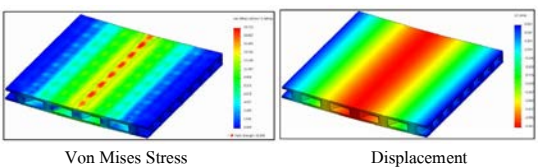
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

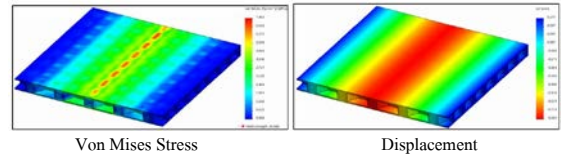


- แรงขนาด 7000 N

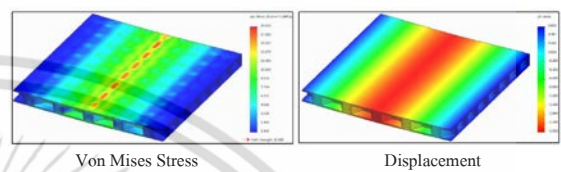


5 แบบจำลองที่ 5 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.  
หนา 3.0 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 18 มม.

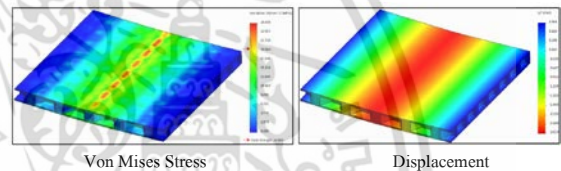
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N



- แรงขนาด 7000 N



#### 4.สรุปผล

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงกระทำลงบนวัสดุทดสอบ โดยเริ่มจากแรงขนาด 2 kN 5 kN และ 7 kN นั้น จะส่งผลให้ค่า Von Mises Stress เพิ่มขึ้น ตามแรงที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุทดสอบในรูปแบบที่มีลักษณะกลวงหรือมีความสูงของส่วนผนังรังผึ้งมากจะทำให้เกิด Von Mises Stress น้อยกว่า วัสดุทดสอบที่มีลักษณะตันหรือมีความสูงของส่วนรังผึ้งน้อย

อีกทั้งในกรณีการทดสอบแบบ 3 point-bending นั้น จะทำให้เกิดการโก่งตัวของวัสดุ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงกระทำลงบนวัสดุทดสอบ โดยเริ่มจากแรงขนาด 2 kN 5 kN และ 7 kN นั้น จะส่งผลให้ค่า Displacement เพิ่มขึ้น ตามแรงที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุทดสอบในรูปแบบที่มีลักษณะกลวงหรือมีความสูงของส่วนผนังรังผึ้งมากจะทำให้เกิด Displacement มากกว่า วัสดุทดสอบที่มีลักษณะตันหรือมีความสูงของส่วนรังผึ้งน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิตไม้-ซีเมนต์โดยทั่วไปสามารถใช้ได้ทันทีในปริมาณมาก โครงสร้างดังกล่าวจะถูกใช้ในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โดยจะถูกใช้งานจำนวนมากในอุตสาหกรรมที่ต้องการทั้งความพรุนและความแข็งแรงในการทำงานในปัจจุบัน พฤติกรรมของโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิตไม้-ซีเมนต์ มีการทดลองในแบบที่รับแรงกระทำสูง โดยการจำลองเชิงตัวเลขถูกใช้ในการคาดการณ์การโก่งตัว รวมทั้งได้ทำการศึกษาค่าและเปรียบเทียบบนพื้นฐานของผลการทดลอง พบว่าการไต่ระดับสีของเส้นกราฟที่แสดงผลของความโค้งสำหรับความสูงของรังผึ้งต่ำจนถึงความสูงของรังผึ้งสูงสุด โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแผงโครงสร้างแบบรังผึ้งได้

### 5.เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Katunin, M. John, K. Jozsko and A. Kajzer, "Characterization of quasi - static behavior of honeycomb core sandwich structures," Modelowanie Inzynierskie, nr 53, ISSN 1896-771X.
- [2] W. D. Callister, "Materials Science and Engineering An Introduction." India: Wiley, 2000,
- [3] C. Hwu and J. S. Hu, "Delamination buckling of honeycomb sandwich panels with laminated faces," Journal of Composite Materials, 29(15), pp.1962-1987, 1995.
- [4] I. G. Masters and K. E. Evans, "Models for elastic deformations of honeycombs," Composite structures, 35, pp.403-422, 1996.
- [5] P. Qiao and M. Yang, "Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials," Journal of Aerospace Engineering, 21:4, pp.235-248, 2008.
- [6] K. Rao and J. Rao, "Thermostuctural analysis of honeycomb sandwich panels, International

Journal of Engineering, Science & Advanced Technology," 2(5), pp.1402-1409, 2012.

- [7] M. R. Said, M. K. Ismail and S. A. Syed Putra, "Paper Honeycomb Sandwiches Panels under Static 3 - Point Bending", International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE SEAM 2011) Solo-Indonesia, pp.271-278, 2011.
- [8] J. Paika, A. K. Thayamballi and G. S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," Thin - Walled Structures, 35(3), pp.205-231, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้