

การจำลองแบบโครงสร้าง  
แผ่นกระดาษลูกฟูกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
A Structural Modeling of Corrugated Board by finite element

ปัญญา ไกรสาสัย<sup>1</sup>, ณัฐดนัย ตันตวิรุพห์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> กลุ่มสยามบรรจุกัมภ์ 101 หมู่ 1 ตำบล ตาลเดี่ยว อำเภอ แก่งคอย จังหวัด สระบุรี 18110

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน

อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

\*ติดต่อ: fengndn@ku.ac.th โทรศัพท์ 0818905806, โทรสาร 034355310

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลอนและความสูงของลอนต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนหาคุณสมบัติเชิงกลของส่วนประกอบได้แก่ แผ่นผิวและกระดาษทำลอนโดยการทดลอง จากนั้นหาความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกโดยการทดสอบค่าการรับแรงในแนวนอนและแนวตั้ง นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลการเปรียบเทียบทั้งสองมีความสอดคล้องกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการรับแรงสูงสุดประมาณ 15% จากนั้นศึกษาผลการแปรผันระยะห่างและความสูงของลอนต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลวิจัยที่ได้พบว่าผลของการเพิ่มระยะห่างระหว่างลอนมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกลดลงและผลของการเพิ่มความสูงของลอนมากขึ้นค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะเพิ่มขึ้น

**คำหลัก:** กระดาษลูกฟูก ลอน การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ การรับแรงในแนวนอน การรับแรงในแนวตั้ง

### Abstract

This paper deals with the effect of flute length and flute height on corrugated paper strength. First, the mechanical properties of liner and medium are experimentally determined. The corrugated paper strength is later investigated, experimentally and numerically. The tests adopted in determining the paper strength are Edge crush and Flat crush. The results from both methods are found to be in good agreement by the value of deviation of top load estimate at 15%. The study of the effect of flute length and flute height on corrugated paper strength is then carried out by using finite element method (FEM). The (FEM) results show that the corrugated paper strength increases when the flute length and the flute height decreases.

**Keywords:** Corrugated Board, Flute, Finite Element Analysis, Flat Crush Test, Edge Crush Test

### 1. บทนำ

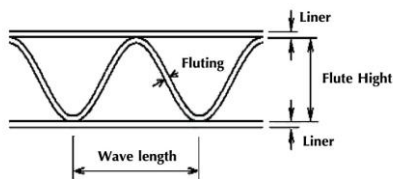
กระดาษเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ

เช่น มีน้ำหนักเบา สามารถออกแบบโครงสร้าง และกำหนดระดับความแข็งแรงของกล่องกระดาษได้ตามต้องการโดยการเลือกรูปทรงและเกรดกระดาษที่

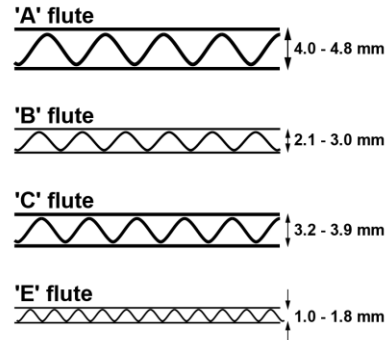
## CST-2019

เหมาะสม โดยทั่วไปกล่องกระดาษลูกฟูกมักนิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ซึ่งอาจต้องมีการเรียงซ้อนกันหลายชั้นบนแท่นรองรับสินค้าหรือในตู้คอนเทนเนอร์ และมักส่งผลให้เกิดปัญหาการยุบตัวของกล่องทำให้สินค้าภายในเกิดความเสียหาย การวิเคราะห์และทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างแผ่นกระดาษจึงเป็นสิ่งจำเป็นเช่น การทดสอบค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวตั้ง (Edge Crush Test, ECT) การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวนอน (Flat Crush Test, FCT) การทดสอบเหล่านี้มักต้องใช้เวลาและเสียค่าใช้จ่ายในการทดสอบค่อนข้างมาก โครงสร้างของแผ่นกระดาษลูกฟูกนั้นจะต้องมีลอนลูกฟูกที่สมบูรณ์ และมีการติดกาวระหว่างชั้นที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยขนาดของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ส่วนมากมีความหนาตามมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากกล่องกระดาษลูกฟูกลอน C มีปริมาณการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุสินค้าเครื่องอุปโภค บริโภคจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงเน้นการวิเคราะห์แผ่นกระดาษลูกฟูกชนิดลอน C

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างลอนและความสูงของลอนซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยจะทำการทดสอบการรับแรงในแนวนอนและแนวตั้ง และนำผลทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อผลทั้งสองสอดคล้องกัน จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาช่วยวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างกล่องกระดาษลูกฟูกที่เหมาะสมได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก



รูปที่ 2 แสดงความหนาตามมาตรฐานของแผ่นกระดาษลูกฟูก

## 2. สมการความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของกระดาษ

แผ่นกระดาษลูกฟูกผลิตจากเยื่อไม้และนำมาประกอบกันเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งค่าของ Stiffness Property กำหนดให้มีคุณสมบัติเป็น Orthotropic ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x & -\frac{E_y}{\nu_{yx}} & -\frac{E_z}{\nu_{zx}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_x}{\nu_{xy}} & E_y & -\frac{E_z}{\nu_{zy}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E_x}{\nu_{xz}} & -\frac{E_y}{\nu_{yz}} & E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างแบบสมมาตรสามแกน จะต้องมีการทดลองหาค่าคุณสมบัติทางกลของกระดาษในแต่ละทิศทางเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด โดยค่าคงที่ที่ต้องวิเคราะห์มีทั้งหมด 9 ตัวคือ  $E_x, E_y, E_z, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, G_{xy}, G_{xz}$  และ  $G_{yz}$  ส่วนอัตราส่วนปัวซองค์ที่เหลือสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (2)$$

## CST-2019

จากความสัมพันธ์ที่ได้ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของกระดาษในแต่ละทิศทางในช่วงที่เป็นเชิงเส้นโดยค่าตัวแปรเหล่านี้จะมีการทดสอบด้วยเครื่องมือวัด ค่า  $E_x$  และ  $E_y$  สามารถหาได้จากค่าความชันของพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของกระดาษในทิศทาง MD และ CD ตามลำดับ ส่วนค่าตัวแปรที่เหลือสามารถวิเคราะห์หาค่าได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-6) ซึ่งกำหนดขึ้นมาโดยการประมาณค่าจากงานวิจัยของ Alanson และ Svard ตามเอกสารอ้างอิงที่ [1]

$$E_z = \frac{E_x}{200} \quad (3)$$

$$G_{xy} = 0.387 \sqrt{E_x E_y} \quad (4)$$

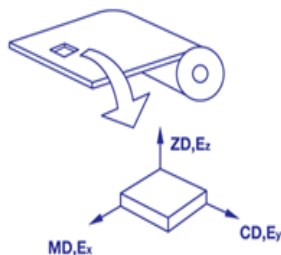
$$G_{xz} = E_x / 55 \quad (5)$$

$$G_{yz} = E_y / 35 \quad (6)$$

### 3.วิธีการและอุปกรณ์

#### 3.1 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของแผ่นกระดาษ Liner และ Medium

พฤติกรรมทางกลของกระดาษขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเป็นสำคัญ โดยมีความสัมพันธ์กับเวลา ความชื้นและอุณหภูมิ นอกจากนี้ ตัวแผ่นกระดาษเองมีพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของการเสียรูปเนื่องจากโครงสร้างของวัสดุที่สร้างมาจากเส้นใยและตัวจับยึดเส้นใยที่มีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับทิศทางสามารถแบ่งได้ตามลักษณะกระบวนการผลิตคือทิศทางตามเครื่อง (MD) ทิศทางขวางเครื่อง (CD) และทิศทางตามความหนา (ZD) ดังแสดงในรูปที่ 3 ตามเอกสารอ้างอิงที่ [2-5]



รูปที่ 3 ทิศทางของกระดาษที่เกิดจากการผลิต

การทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุจะทดสอบด้วยการดึง (Uniaxial Test) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยตัดแผ่นกระดาษ Liner และ Medium ขนาด 15x254 มิลลิเมตร โดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 8 ชั่วโมงและนำแผ่นกระดาษมาทำการดึง 2 ทิศทางคือทิศทางตามเครื่องและทิศทางตามขวาง เครื่องด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ซึ่งจะได้ค่าคุณสมบัติของกระดาษตามตารางที่ 1



รูปที่ 4 แสดงเครื่องมือทดสอบ Tensile Tester

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติของ Liner และ Medium

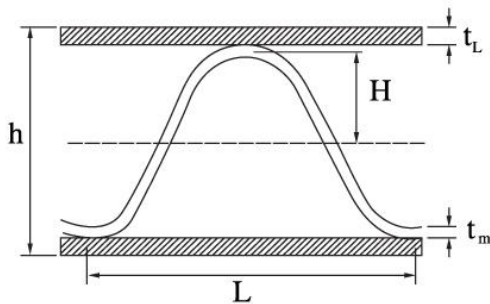
| Material parameters | Material |          |
|---------------------|----------|----------|
|                     | Liner    | Medium   |
| $E_x$ (MPa)         | 6274.300 | 5377.900 |
| $E_y$ (MPa)         | 2344.200 | 1654.700 |
| $E_z$ (MPa)         | 31.400   | 26.900   |
| $\nu_{xy}$          | 0.440    | 0.410    |
| $\nu_{yx}$          | 0.010    | 0.010    |
| $\nu_{yz}$          | 0.010    | 0.010    |
| $G_{xy}$ (MPa)      | 1447.900 | 1034.200 |
| $G_{xz}$ (MPa)      | 66.900   | 47.300   |
| $G_{yz}$ (MPa)      | 114.100  | 0.021    |

#### 3.2 โครงสร้างและขนาดแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ในการวิเคราะห์

แผ่นกระดาษลูกฟูกที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

## CST-2019

1. แผ่นกระดาษลูกฟูกมี 3 ชั้นซึ่งประกอบด้วยแผ่น Liner และแผ่น Medium จะมีการประกอบโครงสร้างเข้าด้วยกันเป็นชิ้นงานทดลอง
2. แผ่นกระดาษที่ใช้ในการทดสอบจะมีน้ำหนักแผ่น Liner เท่ากับ 150 กรัมต่อตารางเมตร และแผ่น Medium จะมีน้ำหนัก เท่ากับ 110 กรัมต่อตารางเมตร
3. Medium มีลักษณะเป็นลอนรูปคลื่น (Sine wave shape) ดังแสดงในรูปที่ 5
4. ความหนาของแผ่นกระดาษที่นำมาทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 5 แสดง Dimension ของแผ่นกระดาษลูกฟูก

ตารางที่ 2 ค่า Dimension ของแผ่นกระดาษลูกฟูก

| Dimension | (mm.) |
|-----------|-------|
| $t_l$     | 0.34  |
| $t_m$     | 0.30  |
| H         | 1.65  |
| h         | 4.28  |
| L         | 7.50  |

### 3.3 การทดสอบค่าการรับแรงในแนวนอนและแนวตั้ง

ความต้านทานแรงกดในแนวนอนและแนวตั้ง เป็นความสามารถของแผ่นกระดาษลูกฟูกในการต้านแรงกดที่กระทำบนแผ่นกระดาษจนแผ่นกระดาษนั้นเสียรูปหรือรับแรงกดต่อไปอีกไม่ได้ ในการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดในแนวนอนและแนวตั้ง จะใช้เครื่องมือทดสอบที่เรียกว่า Crush Tester ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6

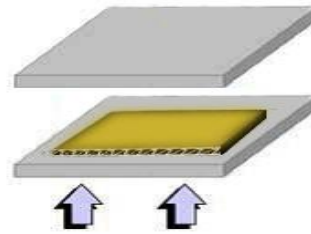


รูปที่ 6 แสดงเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวนอนและแนวตั้ง

#### 3.3.1 การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวนอน (FCT)

การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวนอนมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกขนาด 10x10 เซนติเมตร จำนวน 10 ตัวอย่างโดยมี Dimension ของลอน ตามตารางที่ 2
2. นำกระดาษดังกล่าวไปควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 8 ชั่วโมง
3. นำแผ่นกระดาษที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นไปทดสอบการรับแรง ด้วยเครื่องทดสอบ Crush Tester ดังแสดงในรูปที่ 7 และทำการบันทึกค่าการรับแรงกดในแนวนอน



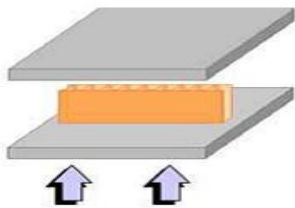
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการทดสอบ Flat Crush

#### 3.3.2 การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวตั้ง (ECT)

การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวตั้งมีวิธีการทดสอบดังนี้

## CST-2019

1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกขนาด 2.50 x10 เซนติเมตร จำนวน 10 ตัวอย่าง ซึ่งมี Dimension ของลอน ตามตารางที่ 2
2. นำกระดาษดังกล่าวไปควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 8 ชั่วโมง
3. นำแผ่นกระดาษที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นไปทดสอบค่าการรับแรงในแนวนอนด้วยเครื่องทดสอบ Flat Crush Test ดังแสดงในรูปที่ 8 และทำการบันทึกค่าการรับแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการทดสอบค่า Edge Crush

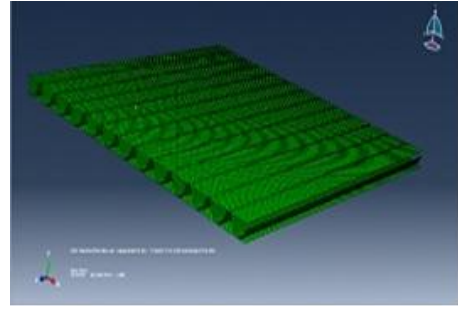
### 3.4 การจำลองแบบโครงสร้างแผ่นลูกฟูก

#### โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

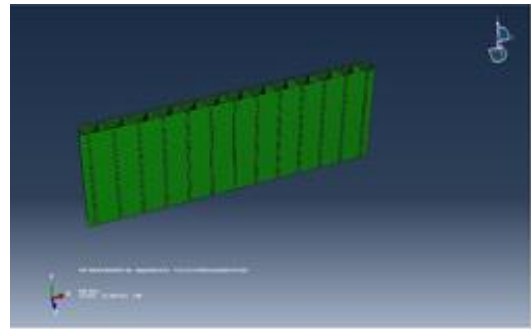
การจำลองแบบโครงสร้างแผ่นกระดาษลูกฟูกจะมีการจำลองแบบให้เหมือนกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ในการทดลอง รูปร่างของลอนจะมีลักษณะเป็น Sine wave shape ซึ่งมีระยะความกว้างของลอนเท่ากับ 7.50 มิลลิเมตรและความสูงของลอนเท่ากับ 3.60 มิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ช่วยในการจำลองแบบโครงสร้างและการสร้างแบบจำลองกำหนดไว้ 2 แบบคือ

#### 3.4.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวนอน (FCT)

การสร้างแบบจำลองกำหนดให้แผ่นกระดาษลูกฟูกมีขนาด 10x10 เซนติเมตร ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบจำลองแสดงในรูปที่ 9 และโปรแกรมจะทำการบันทึกค่า การรับแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกเมื่อมีภาระกระทำบนแผ่นกระดาษลูกฟูก



รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างแบบจำลองความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวนอน (FCT)



รูปที่ 10 แสดงแบบจำลองความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวตั้ง (ECT)

#### 3.4.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวตั้ง (ECT)

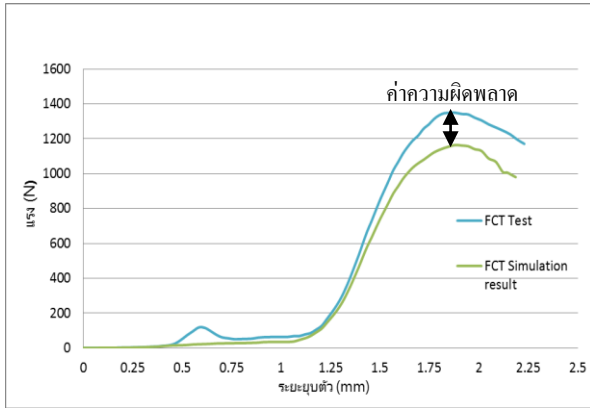
การสร้างแบบจำลองกำหนดให้แผ่นกระดาษลูกฟูกมีขนาด 2.50x10 เซนติเมตร ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 10 โปรแกรมจะทำการบันทึกค่าการรับแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกเมื่อมีภาระกระทำบนแผ่นกระดาษลูกฟูกเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

### 4. ผลวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

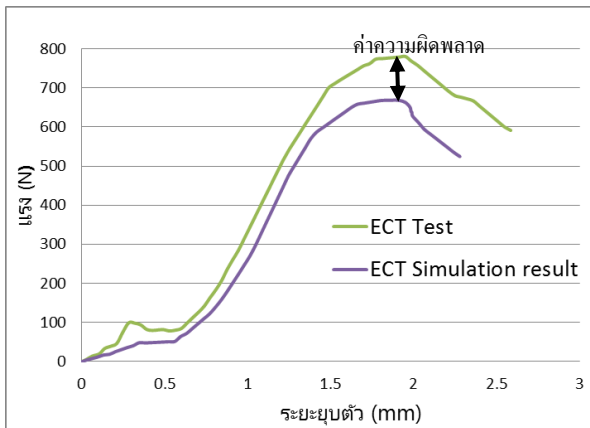
จากผลการทดสอบค่าการรับแรงกดในแนวนอนและแนวตั้งโดยวิธีการใช้เครื่องมือทดสอบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อไปจะนำผลที่ได้ทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงตามรูปที่ 11 -12



## CST-2019



รูปที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบค่าการรับแรงกดในแนวอนระหว่างการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



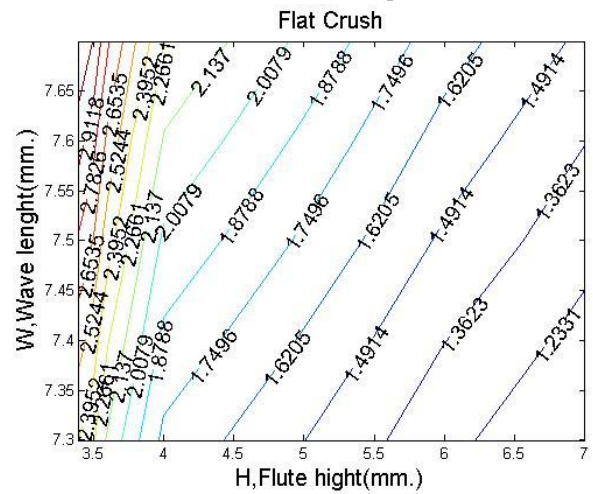
รูปที่ 12 แสดงผลเปรียบเทียบค่าการรับแรงกดในแนวตั้งระหว่างการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าการรับแรงในแนวตั้งและแนวอนพบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 15% โดยเปรียบเทียบจากค่าการรับแรงสูงสุด ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากการจำลองแบบยังไม่สามารถทำแบบเสมือนจริงได้ 100% นอกจากนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษ เครื่องมือทดสอบและสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอีกด้วย

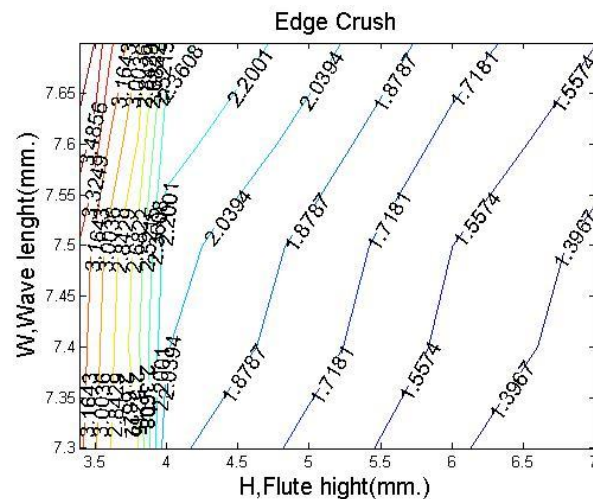
### 5. การวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างลอน และความสูงของลอนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบค่าการรับแรงกดในแนวอนและแนวตั้ง ของแผ่นกระดาษลูกฟูกพบว่า ผลการทดสอบ

ทั้งสองมีความสอดคล้องกันจากนั้นจะทำการศึกษาผลของระยะห่างของลอนและความสูงของลอนของกระดาษลูกฟูกต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างลอนเท่ากับ 7.30, 7.40, 7.50, 7.60 และ 7.70 มิลลิเมตรโดยความสูงของลอนมีการกำหนดค่าเท่ากับ 3.40, 3.50, 3.60, 3.70, 3.80, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 Contour แสดงค่าการรับแรงกดในแนวอนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 14 Contour แสดงค่าการรับแรงกดในแนวตั้งโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 13 แสดง Contour ค่าการรับแรงกดในแนวอน จากผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความกว้างของลอนมากขึ้นค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะ

## CST-2019

ลดลงและการเพิ่มความสูงของลอนค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รูปที่ 14 แสดงค่าContour การรับแรงกดในแนวตั้งจากผลที่ได้ พบว่าการเพิ่มความกว้างของลอนมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะลดลงและการเพิ่มความสูงของลอนค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### 6.สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบค่าการรับแรงกดในแนวนอนและแนวตั้ง ของแผ่นกระดาษลูกฟูกพบว่าผลทั้งสองมีความสอดคล้องกันจากนั้นได้ทำการศึกษาผลของระยะห่างของลอนและความสูงของลอน ของกระดาษลูกฟูกต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะความกว้างของลอนและความสูงของลอน ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าค่าระยะความกว้างของลอนยิ่งน้อยก็ทำให้ความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าระยะความสูงของลอนยิ่งมาก ค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Alanson, A. and Svard, B. "Stability and Collapse of corrugated board", Numerical and Experiment analysis. Master Dissertation, Lund University, 2001
- [2] Pommier, J.C., and Poustis, J., "Bending Stiffness of Corrugated Board Prediction Using the Finite Element Method", ASME AMD-Vol.112, 1990, pp.67-70
- [3] Norstrand, T.M. "Parametric study of the post-buckling strength of structural core sandwich panels." vol.30 August 1995, pp.441-451

- [4] Mann, R.W., Baum, G.A. and Habrger, C.C., "Determination of all nine orthotropic elastic constants for machine-made paper." Tappi, vol.63 December 1980, pp.163-166
- [5] Pommier, J.C. "Box stacking strength Prediction", ASME Mechanics Conference. July 1989, pp.209-213