

การวิเคราะห์ค่าความเค้นของหน่วยเซลล์ในโครงสร้างเซลล์ูลาร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Stress Analysis in Unit Cell of Cellular Structures by Using Finite Element Method

อาทิตย์ พิสัยพันธ์¹ สรรว อินแบน² สุรสิทธิ์ ปิยศิลป์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

โทร 0-43244296 โทรสาร 0-43245878 E-mail: 4750400184@kku.ac.th¹

Arthit Pisaipan¹ Samruad Inban² Surasith Piyasin²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand 40002

Tel: 0-43244296 Fax: 0-43245878 E-mail: 4750400184@kku.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในหน่วยเซลล์โครงสร้างเซลล์ูลาร์ โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปว่าโครงสร้างเซลล์ูลาร์เป็นโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุหลายชนิดที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านวิศวกรรมการแพทย์และในด้านวิศวกรรมลักษณะอื่นๆ โดยทั่วไปโครงสร้างเซลล์ูลาร์จะประกอบด้วยหน่วยเซลล์ที่มีลักษณะการเรียงตัวที่ซับซ้อนหลายๆ หน่วยเซลล์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกศึกษาหน่วยเซลล์ที่มีลักษณะแบบต่างๆ ดังนี้คือ simple cubic (SC), body centered cubic (BCC), และ reinforced body centered cubic (RBCC) ในช่วงความพรุนตัว (Porosity, ϕ) 80-90% ทำการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของหน่วยเซลล์โครงสร้างเซลล์ูลาร์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยเลือกวัสดุที่ใช้ประเภท Photopolymer e – shell100 for Perfactory[®] กำหนดให้วัสดุหน่วยเซลล์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมีสมบัติเชิงกลแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นและรับภาระแบบกดอัด จากการศึกษาทำให้สามารถทราบถึงค่าความเค้นที่ปรากฏขึ้นในแต่ละหน่วยเซลล์ กล่าวคือหน่วยเซลล์แบบ simple cubic (SC) สามารถทนต่อภาระภายนอกที่กระทำได้ดีจึงมีความแข็งแรงมากกว่าหน่วยเซลล์แบบอื่น

คำหลัก วัสดุเซลล์ูลาร์, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การออกแบบหน่วยเซลล์

Abstract

The aim of this project is to investigate the stress occurring in unit cell of cellular structures by Finite Element Method. Cellular structures are the basic form of materials which are widely used in many engineering applications. Cellular structures

are considered to be many unit cells pack together in complex arrangement. By using computer aided design (CAD), 3 dimensional structures of simple cubic (SC), body centered cubic (BCC) and reinforced body centered cubic (RBCC) are first modeled in range of 80-90% of porosity (ϕ). Material applied to those structures is Photopolymer e – shell100 for Perfactory[®] and is considered to be homogeneous and linear-elastic. Finite Element Method is then employed to those structures for numerical simulation in order to get better understanding about stress occurring in unit cells while being loaded under compression. It is shown from this study that the unit cell of simple cubic (SC) has the most strength.

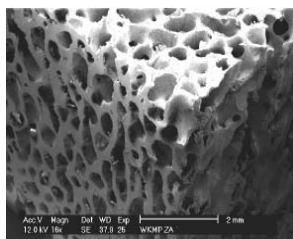
Keywords: cellular materials, finite element method, unit cell modeling

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันว่าโครงสร้างวัสดุเซลล์ูลาร์นั้นเป็นโครงสร้างพื้นฐานของทั้งวัสดุธรรมชาติและวัสดุอีกหลายๆ อย่าง เช่น กระดูก ไม้ โฟม และ ฟองน้ำ เป็นต้น โดยโครงสร้างภายในวัสดุเซลล์ูลาร์นั้นสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการเชื่อมต่อกันของกันต่อเป็นโครงสร้างประกอบเป็นหน่วยเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 1

เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเซลล์ูลาร์ที่มีความแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ เช่น มีน้ำหนักเบา มีค่าการนำความร้อนต่ำ และมีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้วัสดุเซลล์ูลาร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน เช่น การทำฉนวนในยานอวกาศ, การทำหีบห่อบรรจุภัณฑ์ และการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ซึ่งในประเทศไทยมีความจำเป็นค่อนข้างสูงเพื่อใช้ในการทำเป็นอวัยวะเทียมสำหรับผู้ป่วย เป็นต้น และเนื่องจาก

ความซับซ้อนของโครงสร้างภายในและการประยุกต์ที่กว้างขวางทำให้วัสดุเซลลูลาร์เป็นที่สนใจศึกษาของนักวิจัยปัจจุบันมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 โครงสร้างกระดูกของมนุษย์ (cancellous bone)

2. ทฤษฎี

2.1 ความพรุนตัวของวัสดุเซลลูลาร์ [1]

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุเซลลูลาร์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุเซลลูลาร์คือความพรุนตัวซึ่งสามารถหาได้จาก

$$Porosity(\phi) = 1 - \frac{V^*}{V_s} \quad (1)$$

โดยที่ V^* คือปริมาตรของวัสดุเซลลูลาร์ และ V_s คือปริมาตรบัลค์ของวัสดุ

2.2 Euler's law: faces, edges and vertices [2]

หน่วยเซลล์ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นวัสดุเซลลูลาร์นั้นจะต้องเป็นไปตาม Euler's law โดยสามารถพิจารณาวัสดุเซลลูลาร์ได้ว่าเป็นขอบ (edges) ไปบรรจบกันตรงมุม (vertices) ซึ่งทำให้เกิดหน้า (faces) และเมื่อหน้าประกอบกันเข้ากลายเป็นเซลล์ (cells) โดย Euler's law สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F - E + V = 1 \quad (\text{พิจารณาใน 2 มิติ}) \quad (2)$$

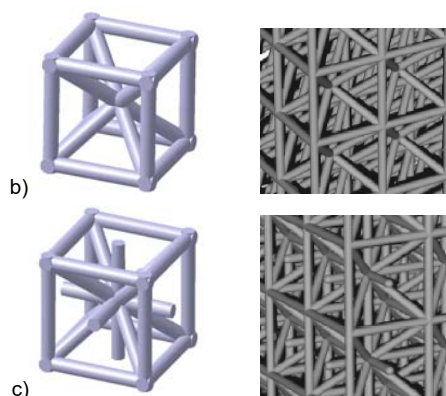
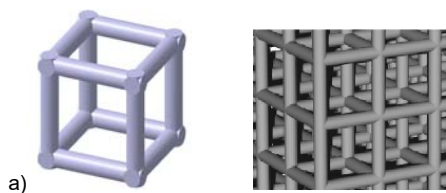
$$-C + F - E + V = 1 \quad (\text{พิจารณาใน 3 มิติ}) \quad (3)$$

โดยที่ C คือจำนวนเซลล์ E คือจำนวนขอบ F คือจำนวนหน้า และ V คือจำนวนมุม

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 การสร้างแบบจำลอง

หน่วยเซลล์ที่เลือกเพื่อใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ หน่วยเซลล์แบบ Simple Cubic (SC), Body Centered Cubic (BCC) และ Reinforce BCC (RBCC) [3] ดังแสดงในรูปที่ 2



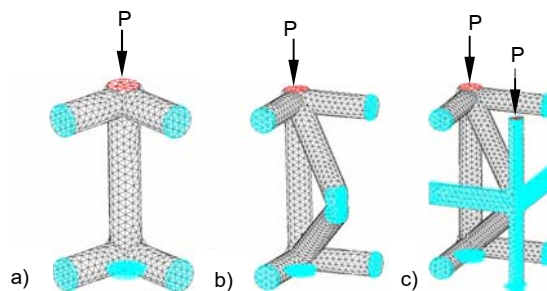
รูปที่ 2 หน่วยเซลล์ของวัสดุเซลลูลาร์แบบ

a) SC, b) BCC และ c) RBCC

ขนาดของหน่วยเซลล์ที่ทำการศึกษามีขนาด 3.5 x 3.5 x 3.5 มม. เป็นการกำหนดโดยใช้ขนาดที่สามารถสร้างได้โดยเครื่อง SLA จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านต่อในโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนตัวในช่วง 80-90% ตามสมการที่ (1) ผลจากการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านต่อในโครงสร้าง เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนตัวแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากหน่วยเซลล์ทั้ง 3 แบบมีลักษณะสมมาตรจึงพิจารณาเพียง 1 ใน 4 ของหน่วยเซลล์ทั้งหมด กำหนดให้ทุกหน่วยเซลล์รับภาระแบบกดลงบนก้านต่อที่อยู่แนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านต่อที่ค่าความพรุนตัวต่างๆ

Porosity (%)	Diameter (mm.)		
	SC	BCC	RBCC
80	0.567	0.456	0.419
82	0.535	0.430	0.395
84	0.501	0.402	0.370
86	0.465	0.372	0.344
88	0.427	0.342	0.316
90	0.387	0.310	0.282



รูปที่ 3 ภาระแบบกดที่กระทำต่อหน่วยเซลล์วัสดุเซลลูลาร์แบบ

a) SC, b) BCC และ c) RBCC

3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

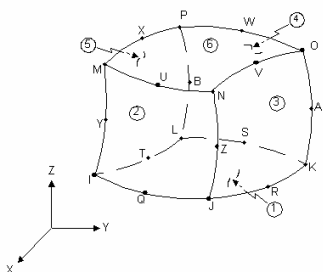
วัสดุที่เลือกใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ Photopolymer e – shell100 for Perfactory[®] ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่แข็งแกร่งตัวหากต้องได้รับปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) [4] กำหนดให้วัสดุมีลักษณะแบบเนื้อเดียวและมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

Young's modulus	2.5 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	40 MPa

3.3 ชนิดของเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นเอลิเมนต์ 3 มิติแบบ Quadrilateral (brick) 20 nodes มี 3 ระดับชั้นความเสรี คือ การเคลื่อนที่ในทิศทาง x, y และ z ลักษณะของเอลิเมนต์ได้แสดงในรูปที่ 4

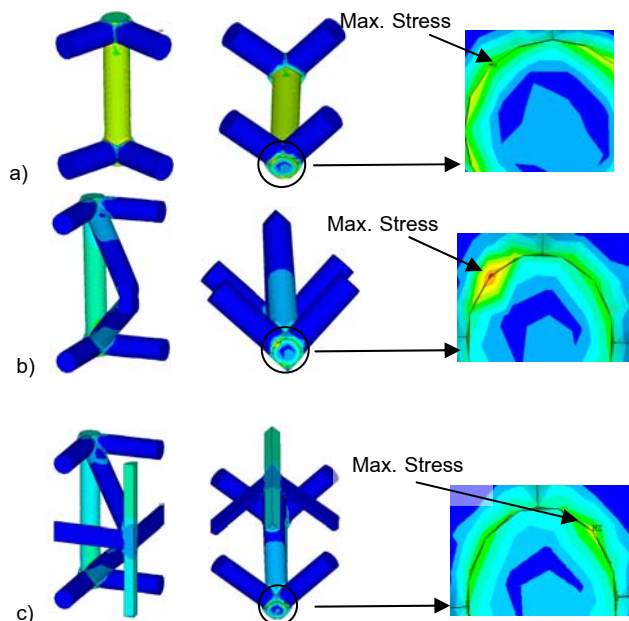


รูปที่ 4 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้เป็นแบบ Quadrilateral (brick) 20 nodes

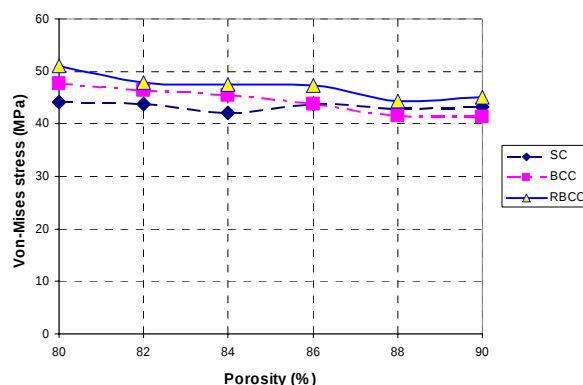
4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 ศึกษาแรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากบนหน่วยเซลล์

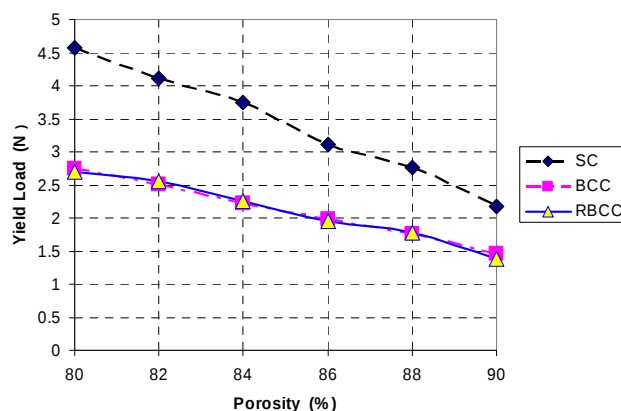
ทำการศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความเค้นฟอนมิส (von Mises stress) สูงสุดที่เกิดขึ้นในหน่วยเซลล์มีค่ามากกว่าความเค้นครากของวัสดุ จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าในหน่วยเซลล์ทุกแบบนั้นความเค้นฟอนมิสสูงสุดจะเกิดบริเวณฐานของก้านต่อในแนวตั้งซึ่งเป็นจุดยึดเนื่องจากอิทธิพลของความเค้นหนาแน่น (stress concentration) และบริเวณดังกล่าวเป็นจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนซึ่งเปรียบเสมือนเสาในแนวตั้งและแนวนอน โดยลักษณะการกระจายตัวของความเค้นฟอนมิสและจุดที่เกิดค่าความเค้นฟอนมิสสูงสุดที่เกิดขึ้นในหน่วยเซลล์แต่ละแบบแสดงในรูปที่ 5 และเมื่อนำค่าความเค้นฟอนมิสที่เกิดขึ้นไปแสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฟอนมิสที่เกิดขึ้นและความพรุนตัวของหน่วยเซลล์จะได้ดังรูปที่ 6 จากนั้นนำค่าความเค้นฟอนมิสไปคำนวณหาแรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากกระทำต่อหน่วยเซลล์พบว่าเมื่อค่าความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากกระทำต่อหน่วยเซลล์มีค่าลดลง โดยหน่วยเซลล์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดคือ หน่วยเซลล์แบบ SC, BCC และ RBCC ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 5 การกระจายตัวของความเค้นและบริเวณที่เกิดค่าความเค้นฟอนมิสสูงสุดบนหน่วยเซลล์แบบ a) SC, b) BCC และ c) RBCC



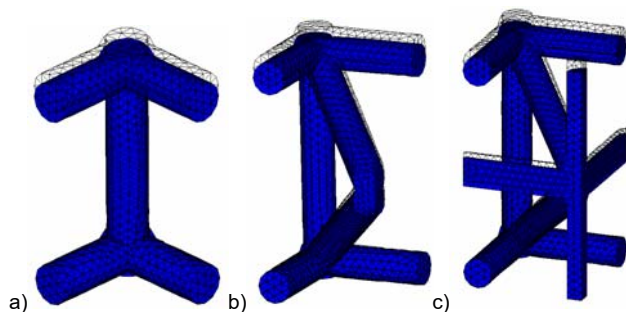
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฟอนมิสสูงสุดที่เกิดขึ้นและความพรุนตัวของหน่วยเซลล์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากและความพรุนตัวของหน่วยเซลล์

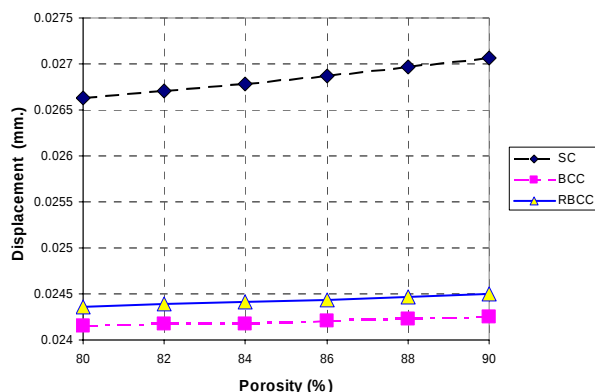
4.2 ศึกษาการยุบตัวที่เกิดบนหน่วยเซลล์

เมื่อหน่วยเซลล์ถูกกระทำด้วยภาระแบบกดจะเกิดลักษณะการยุบตัวดังแสดงในรูปที่ 8 โดยหน่วยเซลล์ที่เกิดการยุบตัวมากที่สุดคือ โครงสร้างแบบ SC, RBCC และ BCC ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 การยุบตัวที่เกิดในหน่วยเซลล์แบบ

a) SC, b) BCC และ c) RBCC



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวและค่าความพรุนตัวของหน่วยเซลล์

5. สรุป

จากการศึกษาการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกระทำต่อหน่วยเซลล์ในโครงสร้างเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ในหน่วยเซลล์ทุกแบบนั้นมีค่าความเค้นฟอนมิสซิสสูงสุดจะเกิดบริเวณฐานของก้านต่อในแนวตั้งซึ่งเป็นจุดยึดเนื่องจากอิทธิพลของความเค้นหนาแน่น (stress concentration) และบริเวณดังกล่าวเป็นจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนซึ่งเปรียบเสมือนเสาในแนวตั้งและแนวนอน และเมื่อนำค่าความเค้นฟอนมิสซิสไปคำนวณหาแรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากกระทำต่อหน่วยเซลล์พบว่า เมื่อค่าความพรุนตัวเพิ่มขึ้นแล้วแรงที่ทำให้เกิดความเค้นครากกระทำต่อหน่วยเซลล์มีค่าลดลง เนื่องจากจากเมื่อมวลวัสดุลดลงจึงมีความพรุนตัวมากขึ้นส่งผลให้ก้านต่อของหน่วยเซลล์มีขนาดเล็กลง โดยหน่วยเซลล์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดคือ หน่วยเซลล์แบบ SC, BCC และ RBCC ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อหน่วยเซลล์ทุกรูปแบบถูกกระทำด้วยภาระแบบกดจะเกิดการยุบตัว โดยที่หน่วยเซลล์ที่เกิดการยุบตัวมากที่สุดคือหน่วยเซลล์แบบ SC, RBCC และ BCC ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] F.A.L. Dullien, Porous Media Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York, USA, 1979, pp. 76-78.
- [2] L.J. Gibson, and M.F. Ashby, Cellular Solids Structures and Properties, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997, pp. 26-38.
- [3] M.H. Luxner, J. Stampfl, and H.E. Pettermann, "Finite Element Modeling Concepts and Linear Analyses of 3D Regular Open Cell Structures", submitted to Journal of Material Science, 2005.
- [4] M.H. Luxner, J. Stampfl, and H.E. Pettermann, "Linear and nonlinear numerical investigations of regular open cell structures", in Proceedings of IMECE04, Vol. 3, 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, California USA, November 13-20, 2004.
- [5] R. Liska, F. Schwager, A. Wölß, A. Pisaipan, S. Seidler, J. Stampfl, "A new route for the fabrication of biomimetic cellular materials", Proceedings Rad Tech 2003, 3-5. Nov.2003, Berlin, pp. 193-201.
- [6] A. Woesz, J. Stampfl, P. Fratzl, "Cellular solids beyond the apparent density an experimental assessment of mechanical properties", Advanced Engineering Materials, 6(3), 2004, pp. 134-138.