

การประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ แบบเซลล์ปิดด้วยการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติ

Characterization of Cell Density for Isotropic Closed-Cell Polymeric Foams With Analysis of Critical Bubble Packed Structure

ปิยพงศ์ บัวโฮม สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์จากข้อมูลความหนาแน่นเซลล์บนระนาบสำหรับโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์เซลล์ปิด ซึ่งมีรูปร่างของเซลล์เป็นทรงสิบสองหน้า โดยได้พัฒนาแบบจำลองฟองก๊าซวิกฤติขึ้น เพื่อเชื่อมโยงลักษณะการเรียงตัวของเซลล์โฟมทรงสิบสองหน้ากับโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมแบบ Face-Centered Cubic (FCC) ให้สามารถประยุกต์ใช้สมการคำนวณความหนาแน่นเซลล์ของการเรียงตัวของอะตอมไปใช้กับโฟมพอลิเมอร์และพัฒนาแบบจำลอง 2 กรณี คือ กรณีหน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติที่ระนาบหน้าตัดผ่านส่วนกลางของทุกเซลล์ และกรณีหน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติที่ได้จากข้อมูลไมโครกราฟ และได้ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากการทดลองของงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ก่อนหน้านี้ เพื่ออภิปรายถึงความเหมาะสมในการนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์แบบเซลล์ปิด พบว่า การพิจารณาความไม่แน่นอนของกรณีหน้าตัดเซลล์ทำให้ทราบถึงขอบเขตที่เป็นไปได้ของการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ ซึ่งอยู่ระหว่างแบบจำลองทั้งสองกรณีที่พัฒนาขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAD) พบว่า แบบจำลองหน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติที่พัฒนาขึ้นเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำ มีค่า AAD เท่ากับ 39.2% และแบบจำลองหน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติเหมาะสมสำหรับโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่นสูงมีค่า AAD เท่ากับ 57.2% ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการประมาณค่าด้วยสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการทำนายความหนาแน่นเซลล์ของโฟมทั่วไปที่มีค่า AAD เท่ากับ 59.4% และ 62.4% สำหรับโฟมความหนาแน่นต่ำและโฟมความหนาแน่นสูงตามลำดับ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา, ความหนาแน่นเซลล์, โฟมพอลิเมอร์, โฟมไอโซโทรปิก, การจัดเรียงตัวของอะตอม, ฟองก๊าซวิกฤติ

Abstract

In this study, models for estimation of cell density with parameter surface cell density for isotropic closed-cell polymeric foams were developed. The basic morphological unit of closed-cell foam typically described as the gas-filled pentagonal dodecahedral cell cavities. The critical bubble model was introduced to relate the packing structure of pentagonal dodecahedron cells with face-centered cubic (FCC) atomic packed structure. The estimation of atomic cell density was applied. Then the developed model used to investigate the effect of non-perfect cross section of cells from micrograph on cell density of foams in two cases: firstly based on perfect cross-section as ideal case and secondly non-perfect cross section by experimental data as actual case. The plot at surface cell density of recently data from published papers shows effect of non-perfect cross section on cell density, estimation of cell density within FCC model with perfect and non-perfect cell cross sections. The percentage average absolute deviation (AAD) showed that non-perfect cell cross section model is reasonable to predict cell density of isotropic low density isotropic foam with an AAD of 39.2%. Perfect cell cross section model is appropriated to predict cell density of isotropic high density isotropic foam with an AAD of 57.2%AAD. These developed models are more reliable than conventional model which was used for conventional foams while AADs of 59.4% for low density foams and 62.4% for high density foams, respectively.

Key words: Morphology analysis, Cell density, Polymeric foam, Isotropic foam, Atomic packed structure, Critical bubble

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

โดยทั่วไปการศึกษาและพัฒนาด้านพอลิเมอร์โพลิให้ ความสำคัญกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลิเป็น อย่างมาก เช่น ขนาดของฟองก๊าซและจำนวนของฟองที่ บรรจุอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ หรือนิยามรายงานค่าเป็น ความหนาแน่นเซลล์ ซึ่งพารามิเตอร์ทางสัณฐานวิทยา เหล่านี้มีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลและการนำโพลิที่ พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ [1] รวมทั้ง นำไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นการเกิดนิวเคลียส สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการเกิดโพลิอีกด้วย [2] และเนื่องจากกระบวนการเกิดโพลิทำให้เกิดฟองก๊าซ กระจายตัวอยู่โดยทั่วเนื้อโพลิ ซึ่งในกรณีที่ฟองก๊าซ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง เกิดเป็นโพลิไอโซ ทโรปิกซึ่งมีสมบัติเท่ากับทุกทิศทาง เช่น โพลิที่เตรียมด้วย กระบวนการฉีดขึ้นรูป ทั้งนี้ปัจจุบันการประมาณค่าความ หนาแน่นเซลล์ของโพลิไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ (N_F) ใช้ สมการประมาณค่าอย่างง่ายดังสมการที่ (1) ซึ่งประมาณค่า จากข้อมูลความหนาแน่นเซลล์บนระนาบ คือ สัดส่วน จำนวนเซลล์ที่ปรากฏบนระนาบ (n) ต่อพื้นที่ที่สนใจ (A) ที่วัดได้จากภาพถ่ายไมโครกราฟ [1]

$$N_F = \left[\frac{n}{A} \right]^2 \quad (1)$$

ซึ่งสมการอย่างง่ายนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางกับโพลิ ไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ทั้งแบบเซลล์ปิดและเซลล์เปิด

นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีการหนึ่งซึ่งพัฒนาแบบจำลองขึ้น จากหลักการคูลมวอลสาร มีการนำข้อมูลสัดส่วนการ ขยายตัว (ϕ) ซึ่งหาได้จากสัดส่วนระหว่างความหนาแน่น ของพอลิเมอร์ต่อความหนาแน่นของโพลิ และขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซ (d) จากการศึกษาสัณฐาน วิทยา มาใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ดัง สมการที่ (2)

$$N_F = \frac{6}{\pi(d)^3} \left(1 - \frac{1}{\phi} \right) \quad (2)$$

ทั้งนี้ปัจจุบันยังไม่สามารถวัดค่าจริงของความหนาแน่น เซลล์ได้ ซึ่งคาดว่าวิธีการนี้เป็นวิธีการประมาณค่าความ หนาแน่นเซลล์ที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่สุด เนื่องจาก พัฒนาขึ้นจากหลักคูลมวอลสาร [1]

การศึกษาของ R. Gosselin และ D. Rodrigue [1] แสดง ให้เห็นว่าการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ด้วยสมการที่ (1) และ (2) ให้ผลการประมาณค่าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับ โพลิไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ที่มีฟองก๊าซเป็นทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

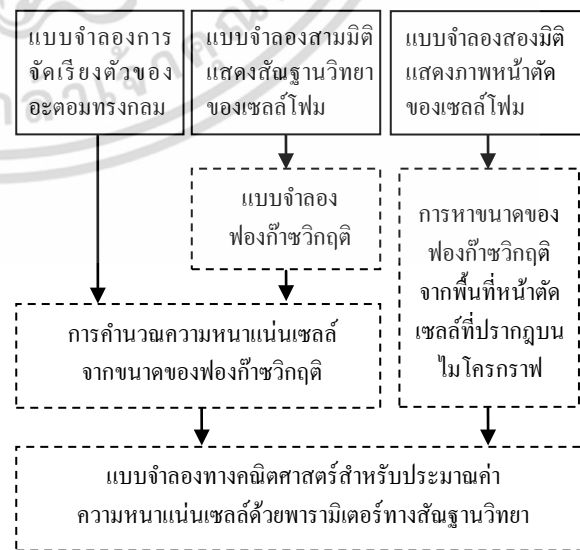
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีกรอบอธิบายเหตุผลของความสัมพันธ์ ดังกล่าว อีกทั้งยังไม่มีกรอบทดลองที่ยืนยันความสัมพันธ์ ดังกล่าวในกรณีโพลิไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่น ต่ำอีกด้วย ดังนั้นยังต้องมีการปรับปรุงสมการที่สามารถ นำมาใช้ทำนายค่าความหนาแน่นเซลล์ให้ถูกต้องมากขึ้น

การศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่า ความหนาแน่นเซลล์ของโพลิไอโซโทรปิกพอลิเมอร์แบบ เซลล์ปิด โดยได้พัฒนาหลักการเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติ เพื่อเชื่อมโยงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของ อะตอม และได้ตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากการ ทดลองของงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ก่อนหน้านี้ [5-11] เพื่ออภิปรายถึงความเหมาะสมในการนำแบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของ โพลิไอโซโทรปิกพอลิเมอร์แบบเซลล์ปิด

2. การบูรณาการแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและคัดเลือกแบบจำลอง ทางกายภาพและความรู้พื้นฐานที่มีอยู่ และบูรณาการเพื่อ พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ ของโพลิพอลิเมอร์ โดยบูรณาการจาก 3 ส่วนหลัก คือ แบบจำลองการจัดเรียงตัวของอะตอม แบบจำลองสัณฐาน วิทยาและโครงสร้างของเซลล์โพลิ และแบบจำลองภาพ หน้าตัดเซลล์ ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากการบูรณาการจะ เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประมาณค่าความ หนาแน่นเซลล์ ขั้นตอนการบูรณาการแบบจำลองแสดงได้ ดังแผนภาพในรูปที่ 1 โดยกรอบเส้นทึบเป็นแบบจำลองที่มี อยู่ก่อนหน้า และกรอบเส้นประเป็นส่วนของที่พัฒนาขึ้น

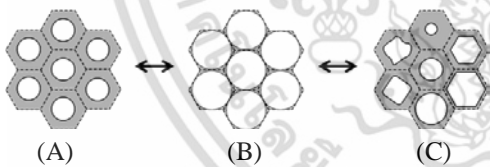


รูปที่ 1 โครงสร้างของการบูรณาการแบบจำลอง

ปัจจุบันแบบจำลองโครงสร้างสามมิติถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายรูปร่างของเซลล์โพลิเมอร์ที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายสำหรับใช้ในจำลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ถ่ายเทที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดโพลิเมอร์รวมถึงการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบโครงสร้างและรูปร่างเซลล์ระหว่างการจัดเรียงตัวของอะตอมและการจัดเรียงตัวของทรงกลมที่สมมติขึ้นเพื่ออธิบายการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซในเนื้อโพลิเมอร์ และประยุกต์แบบจำลองการจัดเรียงตัวของอะตอมร่วมกับแบบจำลองภาพหน้าตัดของเซลล์ที่มีอยู่แล้วมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นเซลล์ของโพลิเมอร์ โดยพัฒนาแบบจำลองฟองก๊าซวิกฤติเป็นแนวคิดเบื้องต้น ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไป

2.1 แบบจำลองฟองก๊าซวิกฤติ (Critical Bubble Model)

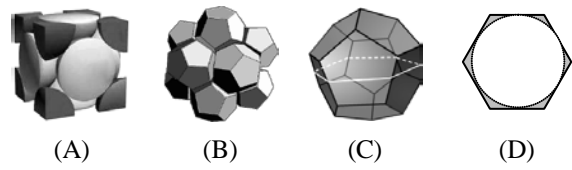
การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองฟองก๊าซวิกฤติขึ้นเพื่ออธิบายลักษณะการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซที่กระจายอยู่ภายในเนื้อโพลิเมอร์โดยสมมติให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นคาบ โดยฟองก๊าซวิกฤติคือ ฟองก๊าซทรงกลมสมมติที่ใหญ่ที่สุดที่บรรจุอยู่ในเซลล์ นำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างของเซลล์โพลิเมอร์กับการเรียงตัวของอะตอม ซึ่งขนาดของฟองก๊าซวิกฤติเท่ากับขนาดเซลล์ นั่นคือเซลล์ขนาดเท่ากันจะมีฟองก๊าซวิกฤติขนาดเท่ากันด้วย โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างหรือขนาดของฟองก๊าซที่อยู่ใน ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซลล์ขนาดเท่ากันที่มีฟองก๊าซภายใน (A) ฟองก๊าซทรงกลม (B) ฟองก๊าซวิกฤติ (C) ฟองก๊าซทรงใดๆ

การจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติอาจมีการจัดเรียงตัวได้เช่นเดียวกันการเรียงตัวของอะตอมซึ่งอาจเป็นแบบ SCP, BCC, FCC, HCP [4] แต่เนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในวัสดุโพลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำแบบเซลล์ปิดส่วนใหญ่มีรูปร่างเซลล์เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของเซลล์คล้ายคลึงกับการจัดเรียงตัวของหน่วยเซลล์แบบ FCC [4] ดังแสดงในรูปที่ 3

จากการเทียบเคียงการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติกับการจัดเรียงตัวของอะตอม ทำให้สามารถนำความรู้พื้นฐานมาประยุกต์ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัดส่วนช่องว่างวิกฤติ คือ ปริมาตรของฟองก๊าซวิกฤติต่อปริมาตร



รูปที่ 3 (A) โครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมแบบ FCC [3] (B) โครงสร้างการเรียงตัวของเซลล์ทรงสี่เหลี่ยม [6] (C) เซลล์ทรงสี่เหลี่ยม (D) หน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติ

ของเซลล์โพลิเมอร์ เท่ากับค่าแฟกเตอร์การเรียงตัวของอะตอม (Atomic Packing Factor, APF) ซึ่งบ่งชี้ถึงสัดส่วนปริมาตรของอะตอมต่อปริมาตรรวมของเซลล์ และความหนาแน่นเซลล์โพลิเมอร์เท่ากับความหนาแน่นเซลล์ของการจัดเรียงตัวของอะตอม เป็นต้น ซึ่งการศึกษานี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์ (N_C) กับขนาดของฟองก๊าซวิกฤติ (D_C) โดยมีพารามิเตอร์ “Periodic Factor (α)” ให้อยู่ในรูปทั่วไปดังสมการที่ (3)

$$N_C = \frac{\alpha}{(D_C)^3} \quad (3)$$

สมบัติของการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติ [3]

โครงสร้าง	รูปร่างเซลล์	APF	Periodic Factor (α)
SCP	ทรงลูกบาศก์	0.5236	1
BCC	ทรงสี่เหลี่ยม	0.6802	1.1547
FCC	ทรงสี่เหลี่ยม	0.7404	1.4146

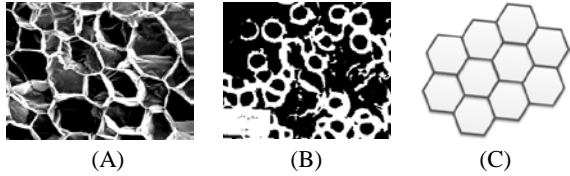
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์กับพื้นที่หน้าตัดเซลล์

ขนาดเซลล์มีขนาดเท่ากับขนาดฟองก๊าซวิกฤติซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ทำให้การประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ด้วยสมการที่ (3) ไม่สามารถทำได้โดยตรงต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์กับพารามิเตอร์บางตัวที่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์และพื้นที่หน้าตัดของเซลล์ที่ปรากฏบนไมโครกราฟ

2.2.1 หน้าตัดอุดมคติ

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์หน้าตัดเซลล์ที่ง่ายที่สุดและใช้กันอย่างกว้างขวางคือการพิจารณาให้เป็นเซลล์รูปหกเหลี่ยมด้านเท่า [3] ดังรูปที่ 4 ซึ่งปรากฏบนระนาบที่ตัดผ่านตอนกลางของทุกเซลล์ ในกรณีนี้ขนาดของหน้าตัดเซลล์ที่ปรากฏจะเท่ากับขนาดของฟองก๊าซวิกฤติ (D_C) ในรูปที่ 5A

อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ง่ายที่สุดนี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณบ้างครั้ง ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางของโพลิอิมิดความหนาแน่นต่ำ

- (A) โพลิอิมิดความหนาแน่นต่ำจากไมโครกราฟ [10]
- (B) โพลิอิมิดความหนาแน่นสูงจากไมโครกราฟ [5]
- (C) แบบจำลองหน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติ

พื้นที่หน้าตัดเซลล์เฉลี่ย (\bar{A}) คือ พื้นที่หน้าตัดของเซลล์ทั้งหมดที่สนใจ (A) ต่อจำนวนเซลล์ (n) ดังสมการที่ (4)

$$\bar{A} = \frac{A}{n} \tag{4}$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองก๊าซวิกฤติ (D_c) และพื้นที่หน้าตัดเซลล์เฉลี่ยเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$D_c = 1.0746 (\bar{A})^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$



รูปที่ 5 ฟองก๊าซวิกฤติและหน้าตัดของเซลล์ทรงสิบสองหน้า (A) หน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติ (B) หน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติ

2.2.2 หน้าตัดไม่อุดมคติ

โดยทั่วไปสัณฐานวิทยาของโพลิอิมิดแบบเซลล์ปิดความหนาแน่นต่ำที่สังเกตได้จากภาพถ่ายไมโครกราฟเป็นหน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 5B ทั้งนี้ K. M. Lewis และคณะ [3] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดเซลล์เฉลี่ยที่สังเกตได้กับขนาดเซลล์ของโพลิอิมิดความหนาแน่นต่ำที่ปรากฏเซลล์เป็นรูปห้าเหลี่ยม หกเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมปะปนกัน และสมมติให้เซลล์เป็นทรงสิบสองหน้ามีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (6)

$$D_c = 2.1354 (\bar{A})^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

2.2.3 ความสัมพันธ์รูปทั่วไป

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองก๊าซวิกฤติ และพื้นที่หน้าตัดเซลล์เฉลี่ย สามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (7) โดยมีพารามิเตอร์ “Apparent Factor (K)” เป็นค่าคงที่การแปรผันระหว่างขนาดของฟองก๊าซวิกฤติกับรากที่สองของพื้นที่หน้าตัดเซลล์เฉลี่ย

$$D_c = \kappa (\bar{A})^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบจำลอง

3.1 สมมติฐานและผลเฉลยทั่วไปของแบบจำลอง

สมมติให้โครงสร้างเซลล์สามมิติของโพลิอิมิดเมอร์เป็นทรงสิบสองหน้า ซึ่งมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิกฤติเป็นแบบ FCC ทำให้สามารถการจัดเรียงตัวแบบ มีการจัดเรียงตัวจากสมการที่ (3) (4) และ (7) ทำให้สามารถประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโพลิอิมิดได้โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีผลเฉลยทั่วไปดังสมการที่ (8)

$$N_F = \phi \left[\frac{n}{A} \right]^{\frac{3}{2}} \tag{8}$$

โดยที่ ϕ เป็นแฟกเตอร์ปรับแก้ (Correcting Factor) ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความเบี่ยงเบนไปจากการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ด้วยสมการอย่างง่ายตามสมการที่ (1) ที่ใช้กับโพลิอิมิดทั่วไปในปัจจุบัน โดยหาค่าได้จากสมการที่ (9)

$$\phi = \frac{\alpha}{\kappa^3} \tag{9}$$

3.2 แบบจำลองสำหรับโพลิอิมิดความหนาแน่นต่ำ

แบบจำลองสำหรับประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโพลิอิมิดเมอร์ที่เซลล์เป็นทรงสิบสองหน้าเรียงตัวแบบ FCC ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองกรณี คือ หน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติและหน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติ โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสรุปและคำนวณค่าจากสมการที่ (1) (3) (5) และ (6) แสดงไว้ในตารางที่ 2

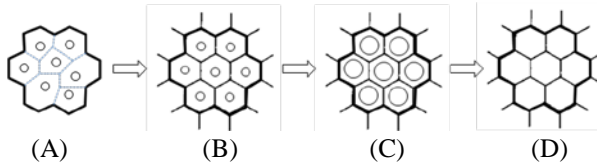
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

สมมติฐาน	Periodic Factor (α)	Apparent Factor (κ)	ϕ -Value
สมการประมาณค่าอย่างง่าย	-	-	1
เซลล์ทรงสิบสองหน้า หน้าตัดแบบอุดมคติ	1.4146	1.0746	1.1398
เซลล์ทรงสิบสองหน้า หน้าตัดแบบไม่อุดมคติ	1.4146	2.1354	0.1453

3.3 แบบจำลองสำหรับโพลิอิมิดความหนาแน่นสูง

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองสำหรับโพลิอิมิดเมอร์ความหนาแน่นสูง พิจารณากระบวนการเกิดโพลิอิมิดเมอร์ความหนาแน่นต่ำที่มีเซลล์เป็นทรงสิบสองหน้า โดยมุ่งเน้นถึงการเลื่อนตำแหน่งของนิวเคลียส ซึ่งเดิมสมมติให้อยู่ในตำแหน่งของฟองก๊าซที่กระจายตัวแบบสุ่ม (รูปที่ 6A) ให้วงตัวอยู่ในตำแหน่งที่มีโครงสร้างเป็นคาบ

จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (รูปที่ 6B-6D) ซึ่งประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ได้โดยพิจารณาให้ขอบเซลล์ที่ปรากฏเป็นหน้าตัดอุดมคติ

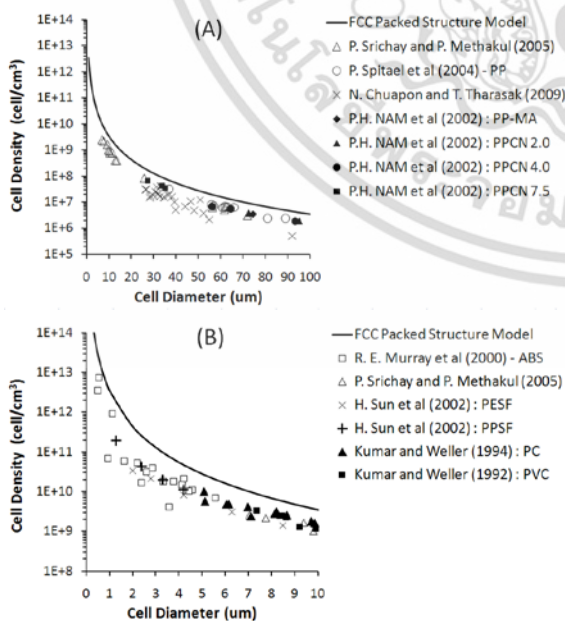


รูปที่ 6 เซลล์โพรที่ปรากฏในพื้นที่ใด ๆ ที่มีขนาดเท่ากัน (A) เรียงตัวแบบสุ่ม (B) เรียงตัวอย่างมีระเบียบ (C) ฟองก๊าซทรงกลมในขั้นตอนการขยายตัว (D) ฟองก๊าซทรงหลายหน้า

4. อภิปรายผล

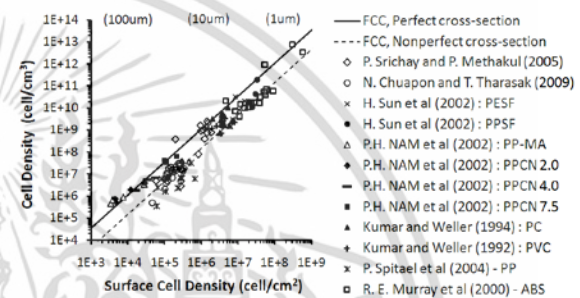
4.1 ค่าสูงสุดและขอบเขตของการประมาณค่า

แบบจำลองเซลล์ทรงสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซวิฤติเหมือนกับการเรียงตัวของอะตอมแบบ FCC ซึ่งเป็นโครงสร้างการเรียงตัวที่มีความหนาแน่นเซลล์สูงสุด และสอดคล้องกับการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากผลการทดลองจากการศึกษาที่มีอยู่ก่อนหน้า [5-11] ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดอยู่ใต้เส้นแบบจำลองแบบ FCC ($\alpha=1.415$) ทั้งนี้ค่า α เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซที่เลื่อนตำแหน่งให้มีโครงสร้างเป็นคาบ กล่าวคือ $\alpha < 1.415$ เป็นขอบเขตของแบบจำลองในสมการที่ (3)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเซลล์กับขนาดเฉลี่ยของเซลล์ (A) โพรทั่วไป (B) ไมโครเซลล์าร์โพร

เมื่อพิจารณาการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ด้วยสมการที่ (8) ซึ่งหน้าตัดเซลล์ที่ปรากฏบนไมโครกราฟนั้นอาจเป็นหน้าตัดแบบอุดมคติ ($\rho = 1.1398$) ซึ่งทำให้ผลลัพธ์เป็นค่าสูงสุด หรืออาจเป็นหน้าตัดแบบไม่อุดมคติโดยจากผลการพัฒนาแบบจำลองจากค่าเฉลี่ยในการศึกษาของ Lewis และคณะ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าปกติ ($\rho = 0.1453$) ทำให้ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าเกิดขึ้น โดยความหนาแน่นเซลล์อาจอยู่ในช่วง $0.1453 < \rho \leq 1.1398$ (-) ซึ่งการทำนายค่าความหนาแน่นเซลล์ในช่วงค่าดังกล่าวส่งผลให้ขอบเขตบนของการคำนวณมีค่ามากกว่าขอบเขตล่างอย่างชัดเจนประมาณ 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์กับความหนาแน่นเซลล์บนระนาบของโพรความหนาแน่นต่ำ

4.2 ผลของหน้าตัดเซลล์แบบไม่อุดมคติต่อความหนาแน่นเซลล์ของโพรพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองจากการศึกษาก่อนหน้า [5-11] ของโพรพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าความหนาแน่นเซลล์จากผลการทดลองก่อนหน้าที่คำนวณด้วยสมการที่ (2) สอดคล้องกับช่วงขอบเขตของการประมาณค่าที่พัฒนาขึ้นโดยข้อมูลความหนาแน่นเซลล์ของโพรทั่วไป (10-100 μm) บางส่วนเบี่ยงเบนไปจากขอบเขตของการประมาณค่าเนื่องจากผลของความไม่เป็นไอโซโทรปิกของโพรที่เตรียมจากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ส่วนไมโครเซลล์าร์โพร (<10 μm) ที่เซลล์มีขนาดเล็กและเป็นไอโซโทรปิกสูงนั้นความเบี่ยงเบนออกจากขอบเขตของการประมาณค่ามีเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ภาพหน้าตัดเซลล์ที่ปรากฏบนไมโครกราฟมีค่าน้อยกว่ากรณีหน้าตัดเซลล์แบบอุดมคติ ทั้งนี้เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความหนาแน่นเซลล์บนระนาบ (ในรูปที่ 5) มีพื้นที่บางส่วนที่ไม่ปรากฏบนภาพไมโครกราฟ (A^*) ทำให้ความหนาแน่นเซลล์จริง ($N_{F,LD}^*$) น้อยกว่ากรณีหน้าตัดอุดมคติ ($N_{F,LD}^* < N_F$) ดังสมการที่ (10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{F,LD}^* = 1.1398 \left[\frac{n}{A + A^*} \right]^2 \quad (10)$$

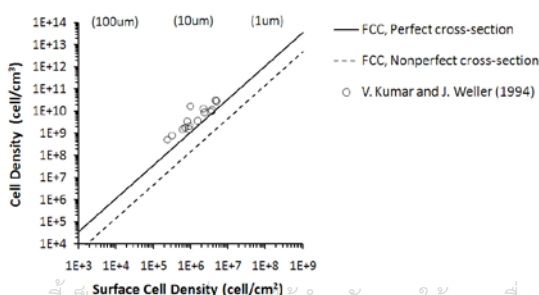
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Percentage Average Absolute Deviation, %AAD) ของไมโครเซลล์ลูาร์โฟมที่มีความเป็นไอโซโทรปิกสูงพบว่าแบบจำลองหน้าตัดเซลล์อูมคิตีที่พัฒนาขึ้นมีความเบี่ยงเบนไปจากข้อมูลการทดลองก่อนหน้า(AAD=39.2%) โดยมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่าแบบจำลองหน้าตัดเซลล์แบบไม่อูมคิตี (AAD=64.4%) และสมการประมาณค่าอย่างง่ายที่ใช้กับโฟมทั่วไป (AAD=59.4%) แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาความไม่เป็นอูมคิตีของหน้าตัดเซลล์ที่พัฒนาขึ้นในการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้สมการประมาณค่าอย่างง่ายหรือแบบจำลองหน้าตัดเซลล์แบบอูมคิตี

4.3 ผลของการกำหนดขอบเซลล์ต่อความหนาแน่นเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์ความหนาแน่นสูง

เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์ความหนาแน่นสูงด้วยสมการอย่างง่ายและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองก่อนหน้า [5] ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าข้อมูลจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดทางทฤษฎีคือแบบจำลองกรณีหน้าตัดเซลล์แบบอูมคิตี ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนในการกำหนดขอบเซลล์ซึ่งเป็นเส้นสมมติที่ไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจน (รูปที่ 2A) ไม่เหมือนกับกรณีโฟมพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 2C) ทำให้หน้าตัดเซลล์ที่ปรากฏเพียงบางส่วนของโฟมความหนาแน่นต่ำ บางส่วนเป็นส่วนเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งไม่ปรากฏเป็นฟองก๊าซ คือ มีเซลล์จำนวนหนึ่งไม่ปรากฏ (n*) ทำให้จำนวนเซลล์ที่นับได้น้อยกว่าที่ปรากฏในกรณีโฟมความหนาแน่นต่ำทำให้ความหนาแน่นเซลล์จริง (N*_{F,HD}) มีค่ามากกว่าการประมาณค่าด้วยแบบจำลองหน้าตัดอูมคิตี (N*_{F,HD} > N_F) ดังสมการที่ (11)

$$N_{F,HD}^* = 1.1398 \left[\frac{n + n^*}{A} \right]^2 \quad (11)$$

ทั้งนี้แบบจำลองกรณีหน้าตัดเซลล์อูมคิตีเบี่ยงเบนไปจากข้อมูลการทดลอง (AAD=57.2%) โดยเบี่ยงเบนน้อยกว่าการ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์กับความหนาแน่นเซลล์บนระนาบของโฟมความหนาแน่นสูงประมาณค่าด้วยสมการประมาณค่าอย่างง่าย (AAD=62.4%) และแบบจำลองกรณีหน้าตัดไม่อูมคิตี (AAD=94.5%) ดังนั้นแบบจำลองแบบหน้าตัดอูมคิตีจึงมีความน่าเชื่อถือในการทำนายความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกความหนาแน่นสูงมากกว่าสมการประมาณค่าอย่างง่าย

5. บทสรุป

แบบจำลองฟองก๊าซวิฤติที่พัฒนาขึ้นช่วยให้สามารถประยุกต์ใช้สมการสำหรับประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของการเรียงตัวของอะตอมมาใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ของโฟมได้ และการพิจารณาความไม่เป็นอูมคิตีของหน้าตัดเซลล์ที่ปรากฏบนไมโครกราฟทำให้ทราบถึงขอบเขตที่เป็นไปได้ของการประมาณค่าความหนาแน่นเซลล์ โดยมีค่า ρ ในช่วง 0.1453 ถึง 1.1398 (-) โดยแบบจำลองการจัดเรียงตัวแบบ FCC ที่มีหน้าตัดเซลล์แบบไม่อูมคิตี (ρ=0.1453) ที่พัฒนาขึ้นเหมาะสำหรับใช้ทำนายความหนาแน่นเซลล์ของโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำและแบบจำลองหน้าตัดเซลล์อูมคิตี (ρ=1.1398) เหมาะสำหรับโฟมไอโซโทรปิกพอลิเมอร์ความหนาแน่นสูงซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการประมาณค่าด้วยสมการอย่างง่ายที่ใช้สำหรับทำนายความหนาแน่นเซลล์ของโฟมทั่วไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Gosselin, and D. Rodrigue, Polymer testing, vol. 24, 2005, pp.1027-1035.
- [2] V. Kumar, and N. P. Suh, Polymer engineering science, vol.30, 1990, pp.1323-1329.
- [3] W. D. Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th ed., USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [4] K. M. Lewis, I. Kijak, K. B. Reuter, and J. B. Szabat, Journal of cellular plastics, Vol. 32, 1996, pp. 235-259.
- [5] V. Kumar, and J. Weller, Journal of engineering for industry, vol. 116, 1994, pp. 413-420.
- [6] V. Shulmeister, M. Van der Burg, E. Van der Giessen, and R. Marissen, Mechanics of materials, vol. 30, no. 2, 1998, pp. 125-140.
- [7] H. Sun, G. S. Sur, and J. E. Mark, European polymer journal, vol. 38, no. 12, 2002, pp. 2373-2381.
- [8] R. Merray, J. Weller, and V. Kumar, Cellular polymer, vol. 19, no. 6, 2000, pp. 413-425.
- [9] P. Srijan, and P. Methakul, Microcellular bio-gradable plastic foam from tapioca starch, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2005.
- [10] ณัฐพงศ์ เชื้อพล และ ธนบัตร ธาราศักดิ์, การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมไมโครเซลล์ลูาร์โฟม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] พงศ์ประกาศ ปิยมโนชา และ สุรัตน์ อารีรัตน์, วิศวกรรม
ลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, หน้า 1-6, 2548.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้