

บทที่ 2

เอกสาร และรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเสริมองค์ประกอบ (composite) [7-9]

วัสดุเสริมองค์ประกอบเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน วัสดุเสริมองค์ประกอบนั้นจะรวมคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุต่างๆที่นำมา รวมกันไว้ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด โดยที่มีองค์ประกอบหนึ่งเป็นเฟสต่อเนื่องเรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) ซึ่งจะอยู่ล้อมรอบอีก องค์ประกอบหนึ่งที่เป็นเฟสไม่ต่อเนื่อง กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcement) ซึ่งจะอยู่ในรูปของเส้นใย (Fibers) หรืออนุภาค (Particles) คุณสมบัติของวัสดุเสริม องค์ประกอบที่ได้จะขึ้นอยู่กัคุณสมบัติ รูปทรงทางเรขาคณิตและปริมาณของสารเสริมแรงเหล่านี้

2.2 วัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์

วัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ส่วนมากจะเป็นระบบที่พอลิเมอร์มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งเมทริกซ์ที่ใช้สามารถเป็นได้ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก โดยพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้นจะทำหน้าที่ดังนี้

- ทำให้เส้นใยมีรูปทรงตามต้องการ
- ป้องกันเส้นใยจากสิ่งแวดล้อมและการเสียดสีกัน
- รับแรงไว้ส่วนหนึ่งก่อนที่วัสดุจะเกิดการแตกหัก

สมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีจะแตกต่างกับสมบัติของสารเสริมแรง เนื่องจากสารเสริมแรงเป็นส่วนหลักในการรับแรงของวัสดุเสริมองค์ประกอบจึงต้องมีความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการโค้งงอต่ำ แต่ในทางกลับกันเมทริกซ์จะต้องมีสมบัติในการโค้งงอสูง นอกจากนี้การเลือกเมทริกซ์เพื่อนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความชื้น สารเคมี ความร้อน และแสงแดดอีกด้วย

ข้อดีของวัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์

- เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ที่มีน้ำหนักเบาเนื่องจากมีองค์ประกอบที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหรืออะลูมิเนียม ทำให้วัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์มีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีโลหะหรือเซรามิกซ์เป็นเมทริกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1
- สามารถกำหนดให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวได้หลากหลายรูปแบบ ตามลักษณะการผลิต ชนิดและการจัดเรียงตัวของเส้นใย

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของโลหะและวัสดุเสริมองค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ [7]

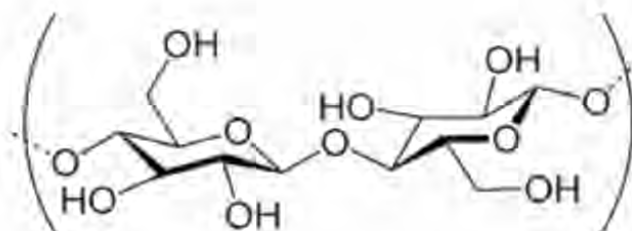
Material	Density (g/cm ³)	Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Modulus to weight ratio (10 ⁶ m)	Tensile strength to weight ratio (10 ³ m)	Elongation (%)
SAE 1010 steel (cold drawn)	7.87	207	365	303	2.68	4.72	20
AISI 4340 steel (quenched and tempered)	7.87	207	1722	1515	2.68	22.3	-
6061-T6 aluminum alloy	2.70	68.9	310	275	2.60	11.7	15
7075-T6 aluminum alloy	2.70	68.9	572	503	2.60	21.6	11
AZ80A-T5 magnesium alloy	1.74	44.8	379	276	2.62	22.2	7
Ti-6Al-4V titanium alloy (aged)	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9	8
High strength carbon fiber/epoxy (unidirectional)	1.55	138	1550	-	9.07	101.9	1.1
High modulus carbon fiber/epoxy (unidirectional)	1.63	215	1240	-	13.44	77.5	0.6
E-glass fiber/epoxy (unidirectional)	1.85	39.3	965	-	2.16	53.2	2.5

Material	Density (g/cm ³)	Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile		Elongation (%)
					Modulus to weight ratio (10 ⁶ m)	strength to weight ratio (10 ³ m)	
Kevlar 49/epoxy (unidirectional)	1.38	75.8	1378	-	5.60	101.8	1.8
Carbon fiber/epoxy (quasi- isotropic)	1.55	45.5	579	-	2.99	38.1	-
E-glass fiber/epoxy (random fiber SMC)	1.87	15.8	164	-	0.86	8.9	1.73

2.3 เส้นใยมะพร้าวและผงเคลือบ [10-15]

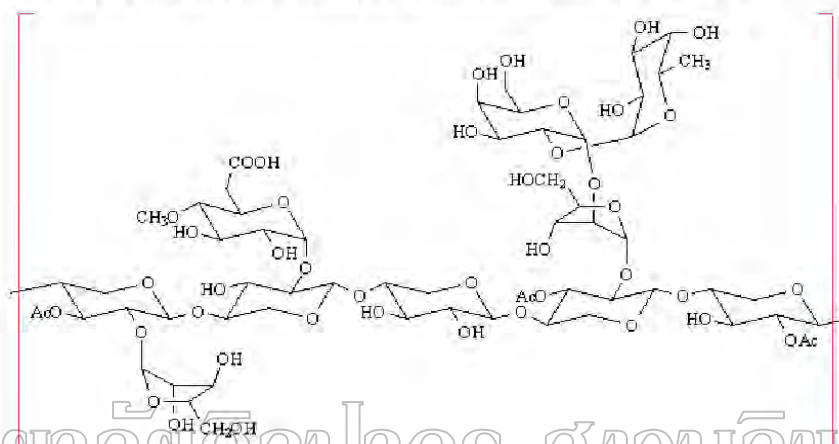
เส้นใยมะพร้าวและผงเคลือบจัดเป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นวัสดุ lignocellulosic ที่มีเป็นจำนวนมากในประเทศไทยเนื่องจากเป็นวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร ทำให้มีราคาถูก เหมาะที่จะนำมาเป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากสมบัติของเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบา เส้นใยมะพร้าวและผงเคลือบจะมีส่วนประกอบหลักเป็น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) โดยจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

เซลลูโลส – เซลลูโลสจัดเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยจากพืช โดยจะเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ เซลลูโลสนั้นจัดเป็น linear condensation polymer ที่ประกอบไปด้วยหน่วยของ D-anhydroglucopyranose หรือที่เรียกว่า glucose ต่อกันด้วยพันธะของ β -1,4-glycosidic ในโครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยหมู่ hydroxyl จำนวนมากทำให้มีพันธะ hydrogen ที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุล โดยสายโซ่ของเซลลูโลสจะมีลักษณะบิดตัวคล้ายกับริบบิ้น (ribbon-like sheet of material) มีความเป็นผลึกสูง มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง และมีความสามารถในการละลายต่ำ[16]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [16]

เฮมิเซลลูโลส – เฮมิเซลลูโลสประกอบไปด้วยกลุ่มของ polysaccharide โดยเฮมิเซลลูโลสนั้นจะมีข้อแตกต่างกับเซลลูโลส 3 ประการ คือ เฮมิเซลลูโลสนั้นจะประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดในขณะที่เซลลูโลสนั้นจะประกอบไปด้วย 1,4- β -D-glucopyranose เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ที่มีกิ่งจำนวนมากแตกต่างกับเซลลูโลสที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ตรงและเซลลูโลสยังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเฮมิเซลลูโลสตั้งแต่ 10 – 100 เท่า ซึ่งโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสในพืชแต่ละชนิดนั้นจะมีโครงสร้างที่ต่างกันไป [17] โดยตัวอย่างของโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสนั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.2



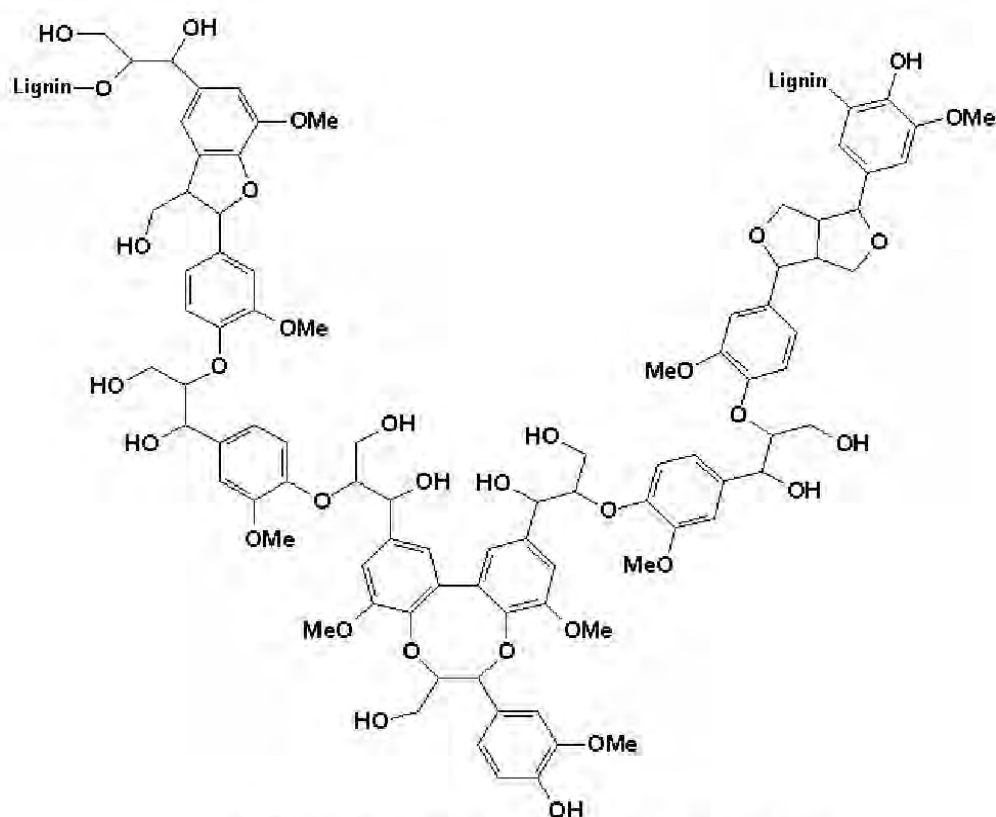
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [11]

ลิกนิน – ลิกนินเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อนที่มีทั้งส่วนที่เป็น aliphatic และ aromatic ซึ่งได้จาก phenylpropane ถูกแทนที่ในตำแหน่งที่ 3 และ/หรือตำแหน่งที่ 5 ด้วยหมู่ CH_3O ลิกนินไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่นและการละลายน้ำ จึงทำให้โครงสร้างของเซลล์ของพืชที่มีลิกนินมีความแข็งแรง [18] โดยตัวอย่างของหน่วยที่ซ้ำกันของลิกนินจะแสดงดังรูปที่ 2.3

เส้นใยแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดและอายุของเส้นใย โดยส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวและพงเกลบจะแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวและพงเกลบ [11-15]

Name	Coconut fiber	Rice Husk
Cellulose	35.00	34.40
Hemicellulose	17.00	35.00
Lignin	35.00	23.00
Ash	3.00	11.30
Other	10.00	3.70



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [18]

2.4 เส้นใยแก้ว [19]

เส้นใยแก้วเกิดจากการหลอมละลายวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วย ททราย (Silica) ดินเหนียว (Clay) หินปูน โคลไรท์ กรอบอริก ฟลูออรีนและอื่นๆ ให้เป็นน้ำแก้วและ ดึงน้ำแก้วที่หลอมละลายออกมาเป็น เส้นใย โดยในตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้วเปรียบเทียบกับเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้วเปรียบเทียบกับเส้นใยมะพร้าว [20]

Properties	E-glass	Coir
Density (g/cm^3)	2.55	1.25
Tensile strength (MPa)	2400	220
E-Modulus (GPa)	73	6
Elongation at failure (%)	3	15-25
Moisture absorption (%)	-	10

จากตารางที่ 2.3 เส้นใยแก้วมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยมะพร้าวที่เป็นเส้นใยจากธรรมชาติมากแต่เส้นใยแก้วยังคงมีข้อเสียที่สำคัญคือ

- ในการผลิตเส้นใยแก้วนั้นจำเป็นต้องใช้ความร้อนสูง จึงต้องมีการใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกปิโตรเลียม ซึ่งทำให้เส้นใยแก้วมีต้นทุนการผลิตที่สูงและในการผลิตยังทำให้เกิดมลภาวะขึ้นอีกด้วย
- เส้นใยแก้วผลิตจากสารตั้งต้นที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาในการเกิดที่นานมาก จึงจัดเป็นพวกไม่ renewable
- กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์คอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วนั้นจะทำให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอ
- เส้นใยแก้วมีอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้คือหากมีการสูดดมเส้นใยแก้วเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจจะทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้
- เส้นใยแก้วไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวทำให้มีการนำเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมาใช้ทดแทนเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อดีเหนือเส้นใยแก้วหลายประการดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยแก้ว [20]

Properties	Natural fiber	Glass fiber
Density	Low	Twice than natural fiber
Cost	Low	High
Renewability	Yes	No
Recyclability	Yes	No
Energy consumption	Low	High
Distribution	Wide	Wide
CO ₂ neutral	Yes	No
Abration to machines	No	Yes
Health risk when inhaled	No	Yes
Disposal	Biodegradable	Not biodegradable

2.5 พอลิเมอร์โฟม [21-23]

พอลิเมอร์โฟมหมายถึงพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเนื่องจากการมีเซลล์จำนวนมากอยู่ในโครงสร้าง พอลิเมอร์โฟมนั้นเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยอย่างน้อย 2 เฟสคือเฟสของแก๊สกระจายอยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์จะเป็นเฟสต่อเนื่องทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์และส่วนที่เป็นแก๊สนั้นจะบรรจุอยู่ในช่องว่างในเมทริกซ์ (void) หรือเรียกว่าเซลล์ (cell) โดยโครงสร้างที่เป็นเซลล์ของพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้นจะเกิดเนื่องจากการเติม foaming agents ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ระหว่างกระบวนการผลิต

โครงสร้างแบบโฟมของพอลิเมอร์นั้นสามารถแบ่งออกตามลักษณะได้เป็น 2 แบบคือ โครงสร้างที่เป็นเซลล์เปิด (Open – cell) และโครงสร้างที่เป็นเซลล์ปิด (Closed – cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โฟมที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดนั้นแต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกัน เฟสของแก๊สที่อยู่ภายในจะเป็นอากาศ ส่วนโฟมที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิดนั้น เซลล์แต่ละเซลล์จะถูกแยกออกจากกันด้วยผนังเซลล์หรือ membrane ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์แต่ละเซลล์จะขึ้นอยู่กับชนิดของ foaming agent ที่ใช้ โดยโครงสร้างของเซลล์นั้นจะเป็นตัวกำหนดสมบัติและการใช้งานของโฟมที่ได้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของโฟมแบบเซลล์เปิด (ซ้าย) และเซลล์ปิด (ขวา) [23]

2.6 ทฤษฎีการเกิดโฟม [22-23]

ระบบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โฟมจะเกี่ยวข้องกับ 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการเกิดฟองก๊าซ (bubble formation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลว ต่อมาคือขั้นตอนการเติบโตของฟองก๊าซ (bubble growth) เป็นกระบวนการที่ฟองก๊าซเกิดการเติบโตและเกิดการเสถียร และกระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ (bubble stabilization) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งผ่านกระบวนการ crosslink หรือโดยการ cooling ทำให้ได้ระบบโครงสร้างของเซลล์ที่เสถียร

2.6.1 กระบวนการเกิดฟองก๊าซ

ขั้นตอนแรกของการผลิตโฟมคือการเกิดฟองก๊าซขึ้นในระบบของเหลว ถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า self-nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นที่จะต้องมีการเติมอนุภาคของแข็งขนาดเล็กเช่น ผงแป้ง (talc) หรือซิลิกาลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็น nucleating agent เพื่อควบคุมขนาดและการกระจายตัวของเซลล์ แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติม nucleating agent เฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวมักจะประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซสามารถเติบโตต่อไปได้โดยไม่ต้องมีการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่

การเกิดฟองก๊าซในระบบของเหลวนั้นค่า free energy (ΔF) ของระบบจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการ 2.1 [23]

$$\Delta F = \gamma A \quad (2.1)$$

เมื่อ γ คือค่าแรงตึงผิวของของเหลวและ A คือพื้นที่ของผิวสัมผัสทั้งหมด จากสมการแสดงให้เห็นว่าถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวดำจะทำให้ฟองก๊าซเกิดง่ายขึ้น การเติม nucleating agent จะมีผลทำให้เกิดฟองก๊าซได้ง่ายขึ้น เนื่องจาก nucleating agent จะช่วยลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวหรืออาจไปทำให้เกิดช่องว่าง (void) ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส

ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเกิด nucleation ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเกิด nucleation คือความเรียบของพื้นผิวอนุภาคของแข็งที่เป็นตัวริเริ่มการเกิดฟองก๊าซ ชนิดของอนุภาคของแข็ง การเติมและความเข้มข้นของ surfactant หรือ nucleator และอัตราการเกิดก๊าซในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

2.6.2 กระบวนการเติบโตของฟองก๊าซ

เมื่อความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงจะทำให้โอกาสในการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง ก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงแพร่เข้าไปในฟองก๊าซ ทำให้ฟองก๊าซเกิดการขยายตัว เริ่มแรกฟองก๊าซจะมีลักษณะเป็นทรงกลมและเกิดการขยายตัวเนื่องจากผลของความแตกต่างของความดัน (ΔP) ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ที่สมดุลความดันก๊าซในฟองก๊าซทรงกลมจะมีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ ซึ่งค่าความแตกต่างของความดันที่สมดุลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 [23]

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

เมื่อ γ คือค่าแรงตึงผิว และ r คือรัศมีของฟองก๊าซ

ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ของฟองก๊าซขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าฟองก๊าซขนาดใหญ่ ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดัน

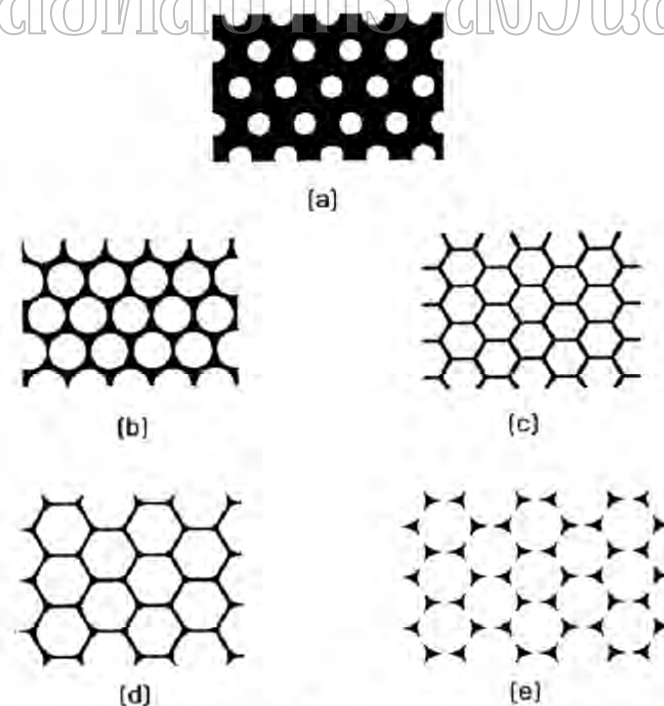
โดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งโดยการไปรวมตัวกับฟองก๊าซอื่นๆ หรือโดยการแพร่ของก๊าซจากพอลิเมอร์ หลอมเหลวเข้าไป ซึ่งความแตกต่างของความดันในฟองก๊าซของฟองก๊าซขนาดเล็กและฟองก๊าซขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.3 [23]

$$\Delta P_d = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔP_d คือค่าความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ที่มีรัศมี r_1 และ r_2 อัตราการเติบโตของเซลล์จะขึ้นกับพฤติกรรม viscoelastic ของวัสดุพอลิเมอร์ ความดันของก๊าซ ขนาดของเซลล์ และอัตราการแพร่ของ foaming agents ผ่านผนังเซลล์ของพอลิเมอร์

ระบบที่มีเซลล์ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของเซลล์อย่างสม่ำเสมอ จะเกิดได้เมื่อระบบมีแรงตึงผิวต่ำ โดยรูปที่ 2.5 จะแสดงถึงลักษณะโครงสร้างของเซลล์ที่ขั้นตอนการขยายตัวของฟองก๊าซต่างๆ จากรูปที่ 2.5 (a) แสดงให้เห็นว่าฟองก๊าซเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์หลอมเหลว ถ้าทำให้โฟมเสถียรโดยการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่สภาวะนี้จะทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นสูง แต่หากปริมาณของฟองก๊าซยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.5 (b) จะทำให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง สำหรับฟองก๊าซที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโฟมจะมีความหนาแน่นลดลงเมื่อฟองก๊าซมาอยู่ใกล้กันมากขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่ขั้นตอนการขยายตัวของฟองก๊าซต่างๆ [23]

เมื่อฟองก๊าซเกิดการขยายตัวต่อไปจนกระทั่งสัมผัสกัน ความดันภายในฟองก๊าซจะผลักเซลล์ให้เกิดการรวมตัวกัน พอลิเมอร์หลอมเหลวจึงถูกผลักออกไปอยู่ช่องว่างด้านข้างและเซลล์เปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นแบบ pentagonal dodecahedron ที่รูปร่างของผนังเซลล์แต่ละด้านเป็น polyhedral ที่มีความหนาเท่ากันในแต่ละระนาบ เมื่อพิจารณาใน 2 มิติ เซลล์จะมีรูปร่างเป็นแบบ hexagonal honeycomb ดังแสดงในรูป 2.5 (c) ลักษณะโครงสร้างของเซลล์นั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลวเช่น ความหนืดและพลังงานที่ผิวหน้า แรงโน้มถ่วงและแรงดันของก๊าซที่ดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไปอยู่บริเวณรอยต่อของเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (d) ที่สถานะดังกล่าวโฟมที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด แต่ที่ผนังเซลล์อาจเกิดการแตกออกได้ทำให้เซลล์ที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ระดับการแตกออกของผนังเซลล์ที่แตกต่างกันจะทำให้ได้โฟมที่มีปริมาณเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (e)

ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของฟองก๊าซระหว่างเกิดการขยายตัวคือ ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว อัตราเร็วในการขยายตัวของฟองก๊าซ ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ความแตกต่างของความดันภายในฟองก๊าซ และการมีสิ่งเจือปนเช่น อนุภาคของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซไปรบกวนการเติบโตของฟองก๊าซ

2.6.3 กระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ

ฟองก๊าซจะถูกทำให้เสถียรได้ทั้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์เมทริกซ์กลายเป็น gelation หรือโดยอิทธิพลทางกายภาพด้วยการหล่อเย็นพอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอ่อนตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทำให้รูปร่างของฟองก๊าซเสถียรไปเนื่องจากการเกิดการไหลของโฟมหรือเนื่องจากน้ำหนักของโฟม ทำให้โครงสร้างของเซลล์โฟมกลายเป็นแบบ anisotropy ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โฟม ก๊าซภายในเซลล์โฟมจะอยู่ในสภาวะสมดุลเป็นระยะเวลาหนึ่งภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ และความดันที่ล้อมรอบ ทำให้สมบัติของโฟมเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการเกิดการแพร่ของอากาศเข้าไปทดแทนก๊าซภายในเซลล์ สภาวะดังกล่าวจะเกิดลดลงเมื่อก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์คืออากาศหรือเป็นก๊าซที่มีสมบัติคล้ายกับอากาศเช่น ก๊าซไนโตรเจน แต่หากก๊าซที่ใช้เป็นไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซออกมาภายนอกมากกว่าอัตราการแพร่ของอากาศเข้าไปในเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้โครงสร้างของโฟมมีแนวโน้มจะเสถียรหลังการผลิต

2.7 Foaming agents [21-27]

Foaming agents คือสารที่ใช้ในการทำให้พลาสติกมีโครงสร้างแบบโฟม โดย foaming agents นั้นสามารถเป็นได้ทั้งแก๊สหรือเป็นสารเคมีที่จะเกิดการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจาก foaming agents ทั้งสองแบบจะกระจายตัวและเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดันในกระบวนการผลิต เมื่อความดันของกระบวนการผลิตลดลงแก๊สจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเซลล์ขึ้นในพลาสติก ตามปกติเราสามารถแบ่ง foaming agents ได้ออกเป็น 2 แบบคือ Physical foaming agents และ Chemical foaming agents

2.7.1 Physical foaming agents (PFAs)

PFAs คือของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำซึ่งจะกระจายอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบโฟม PFAs มักเป็นของเหลวที่มีราคาถูกและมีข้อได้เปรียบคือเมื่อกลายเป็นก๊าซจะไม่เหลือสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่อาจมีอิทธิพลต่อสีหรือสมบัติของพอลิเมอร์ได้ แต่ PFAs ก็มีข้อเสียคือเก็บรักษายาก ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษเช่นถังเก็บ ปัม คอมเพรสเซอร์และอุปกรณ์อื่นๆเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิตโฟม การใช้ PFAs ในการผลิตโฟมนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- ผิดักก๊าซเฉื่อยเช่นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เข้าไปในพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีความดันสูง ก๊าซจะเกิดการขยายตัวเมื่อความดันมีค่าลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวดายหรือถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์
- เติมของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำลงไปผสมในพอลิเมอร์ ซึ่งของเหลวที่ใช้กันมากได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจิเนตไฮโดรคาร์บอน (ประกอบด้วย Freons และ CFC) และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยสมบัติของ PFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของ PFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [23]

Physical Foaming Agent	Molecular weight ($g\ mol^{-1}$)	Density at 25 °C ($g\ cm^{-3}$)	Boiling Point (°C)
Butanes	58.00	0.579	-0.5
Pentanes	72.15	0.613	30-38
Hexanes	86.17	0.658	65-70
Isohexanes	86.17	0.655	55-62
Heptanes	100.20	0.680	96-100
Benzenes	78.11	0.874	80-82

Physical Foaming Agent	Molecular weight (g mol ⁻¹)	Density at 25 °C (g cm ⁻³)	Boiling Point (°C)
Toluene	92.13	0.862	110-112
Methyl chloride	50.49	0.952	-23.8
Methylene chloride	84.94	1.325	40.0
Trichloroethylene	134.40	1.466	87.2
Dichloroethane	98.97	1.245	83.5
Trichlorofluoromethane (CCl ₃ F) – Freon 11	137.38	1.476	23.8
Dichlorodifluoromethane (CCl ₂ F ₂) – Freon 12	120.93	1.311	-29.8
Trifluorochloromethane (CClF ₃) – Freon 13	104.47	0.850	-81.4

2.7.2 Chemical foaming agents (CFAs)

CFAs คือสารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยก๊าซออกมา ทั้งเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition) การเกิดปฏิกิริยากับ CFAs ด้วยตัวเองหรือการเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่นๆ CFAs ที่ใช้กันส่วนมากนั้นจะอยู่ในรูปของแข็ง CFAs จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- Exothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี
- Endothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะดูดความร้อนเข้าไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

โดย CFAs ทั้งสองแบบที่ใช้กันมากจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

2.7.2.1 สารประกอบที่ปลดปล่อยก๊าซออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับได้ โดย CFAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่ สารประกอบจำพวก ammonium salts ของ inorganic และ organic acids และ สารประกอบของ bicarbonates และ carbonates ของ alkaline และ alkaline-earth metals



จากสมการ 2.4 G คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน จากสมการการที่ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ทำให้ปริมาณของก๊าซในระบบลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้แรงดันภายในเซลล์ (cell) ของโฟมมีค่าลดลงส่งผลให้วัสดุเกิดการหดตัวได้

2.7.2.2 สารประกอบที่ปลดปล่อยก๊าซออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ สารประกอบจำพวก aromatic, aliphatic-aromatic, aliphatic-azo และ diazo, diazoamides และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ จะเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการ



ส่วนมากก๊าซที่ได้จะเป็น N_2 , CO_2 และ NH_3 โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนตามสมการที่ 2.5 นั้นมักจะเป็นปฏิกิริยา first-order แบบผันกลับไม่ได้

2.7.2.3 CFAs ที่อยู่ในรูปของของผสมที่จะปลดปล่อยก๊าซออกมาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแต่ละองค์ประกอบ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อยก๊าซของของผสมจะแสดงในสมการที่ 2.6



ตัวอย่างของ CFAs ชนิดนี้ก็คือปฏิกิริยาระหว่าง sodium nitrile กับ ammonium chloride และปฏิกิริยาระหว่าง acids ทั้งที่เป็น organic เช่น stearic และ oleic เป็นต้น และ inorganic เช่น hydrochloric, sulfuric และ orthophosphoric เป็นต้น กับ carbonates หรือกับโลหะหมู่ 2 หรือ 3 ในตารางธาตุ

โดยสมบัติของ CFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของ CFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [23]

Chemical Foaming Agent	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm ³ g ⁻¹)	Used minly with
Azodicarbonamide	205-215	220	PVC, PE, PP, PS, ABS, PA
Modified azodicarbonamide	155-220	150-220	PVC, PE, PP, EVA, PS, ABS
4,4'-Oxybis-(benzenesulfonyl hydrazine)	150-160	125	PE, PVC, EVA

Chemical Foaming Agent	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm ³ g ⁻¹)	Used minly with
Diphenylsulfone 3,3'-disulfohydrazide	155	110	PVC, PE, EVA
Diphenylene oxide 4,4'-disulfohydrazide	175-180	120	PVC, PE, EVA
Trihydrazinotriazine	275	225	ABS, PE, PP, PA
p-Toluenesulfonyl semicarbazide	228-235	140	ABS, PE, PP, PA, PS
5-Phenyltetrazole	240-250	190	ABS, PPO, PC, PA, PBTP
Isatoic anhydride	210-225	115	PS, ABS, PA, PPO, PBTP, PC

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.8 สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์โฟม [23]

พอลิเมอร์โฟมแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันมากทั้งทางกายภาพและสมบัติเชิงกลขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จะมีอิทธิพลอย่างมากกับสมบัติของโฟม ปัจจัยอื่นๆ ที่มีต่อสมบัติของโฟมได้แก่ เทคนิคและสถานะการผลิต การจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของการเกิด crosslink การเติมสารเติมแต่งและชนิดของ foaming agents ที่ใช้

สมบัติของโฟมจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของก๊าซต่อพอลิเมอร์หรือเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของโฟม ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัส ค่าความทนทานต่อการดึงยืด ค่าความต้านทานต่อการกดอัดและค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อน โดยความหนาแน่นของโฟมสามารถนิยามได้ดังสมการที่ 2.7

$$\text{ความหนาแน่นของโฟม} = \frac{\text{น้ำหนักโฟม}}{\text{ปริมาตรของโฟม}} \quad (2.7)$$

ซึ่งความหนาแน่นของโฟมนั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างกระบวนการบ่ม (ageing) หากแบ่งชนิดของโฟมตามความหนาแน่นสามารถแบ่งได้ดังนี้

- $> 600 \text{ kg m}^{-3}$ จัดเป็น โฟมความหนาแน่นสูง
- $100 - 600 \text{ kg m}^{-3}$ จัดเป็น โฟมความหนาแน่นปานกลาง
- $< 100 \text{ kg m}^{-3}$ จัดเป็น โฟมความหนาแน่นต่ำ

ตัวแปรทางกายภาพอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติของโฟมคือค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density, RD) โดยสามารถนิยามความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมได้ดังสมการที่ 2.8 [23]

$$RD = \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (2.8)$$

เมื่อ ρ_f คือค่าความหนาแน่นของโฟมและ ρ_p คือค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จะใช้ในการเปรียบเทียบโฟมที่เกิดจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

$$\text{Volume fraction ของก๊าซในโฟม } (\phi_g) = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} = 1 - RD \quad (2.9)$$

$$\text{Volume expansion factor (VEF)} = \frac{\rho_p}{\rho_f} = \frac{1}{RD} \quad (2.10)$$

$$\text{Linear expansion factor (LEF)} = \sqrt[3]{VEF} \quad (2.11)$$

เมื่อความหนาแน่นลดลงจะส่งผลให้ต้นทุนต่อผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วยลดลง ทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงลดลง ค่าความโค้งงอเพิ่มมากขึ้น และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดลดลง แต่ความสามารถในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มมากขึ้น

2.8.1 สมบัติเชิงกล

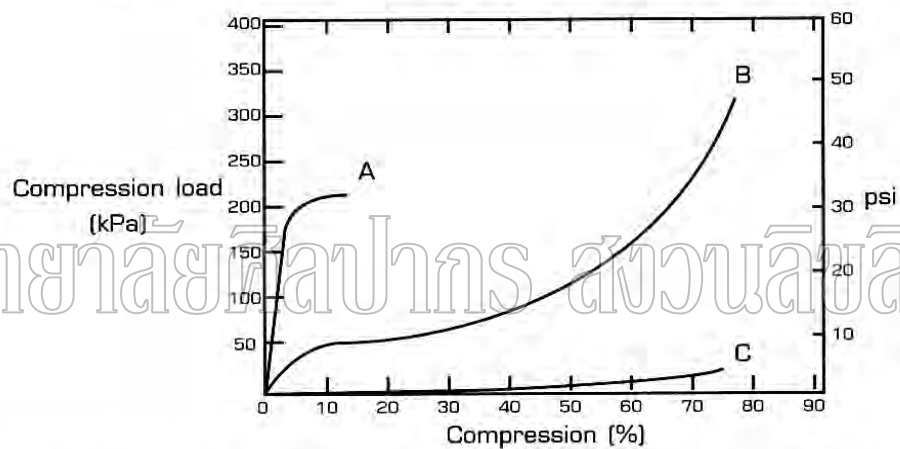
ชนิดของโฟมสามารถแบ่งออกตามสมบัติเชิงกลออกได้เป็น 3 แบบคือ rigid cellular polymers, structural foam และ flexural cellular polymers

2.8.1.1 Rigid cellular polymers พอลิเมอร์โฟมที่มีสมบัติเป็น rigid นั้นจะสามารถรายงานค่า compressive strength ได้ที่การเกิด deformation ต่ำๆ (5-10%) เท่านั้น ค่า compressive modulus จะคำนวณจากการ extrapolate เส้นกราฟไปที่ 0% deformation โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่า compressive strength และค่า compressive modulus ได้แก่ องค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ ความหนาแน่น โครงสร้างของเซลล์และองค์ประกอบของก๊าซ ตามลำดับ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลอื่นๆของ rigid cellular polymers เช่น tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus, shear strength และ shear modulus ยังเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของชิ้นงานอีกด้วย

2.8.1.2 Structural foam พอลิเมอร์โฟมชนิดนี้มักผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ injection molding หรือกระบวนการ extrusion โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ structural foam ได้แก่ องค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของเซลล์ ตามปกติ structural foam มักมีความหนาแน่นสูงและมักมี

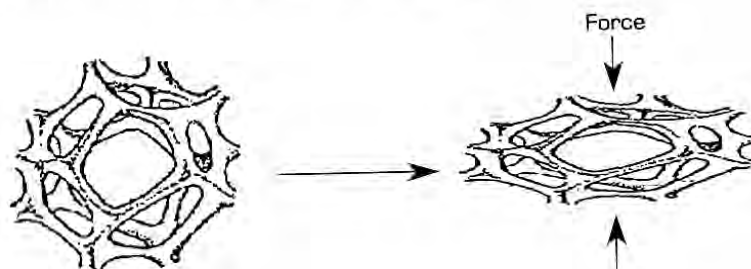
โครงสร้างของเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอทำให้สมบัติในแต่ละส่วนของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน

2.8.1.3 Flexural cellular polymers เมื่อได้รับแรงกดอัดที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-75% deflection จะเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ สำหรับ flexible foam นั้นสมบัติทางด้านการกดอัดระหว่าง 0-75% deflection ทั้งภายใต้สถานะที่เป็น static และ dynamic จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการใช้งานของ flexible foam โดยปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของ flexible foam เมื่อได้รับแรงกดอัดคือองค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาดของเซลล์และรูปร่างของเซลล์ โดยในรูปที่ 2.6 จะแสดงถึงผลขององค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ที่มีต่อพฤติกรรมของโฟมเมื่อได้รับแรงกดอัด



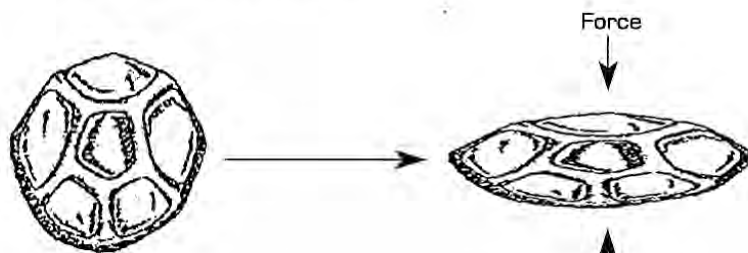
รูปที่ 2.6 แสดงถึงผลขององค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ที่มีต่อพฤติกรรมของโฟมที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 32 kg m^{-3} เมื่อได้รับแรงกดอัด (a) PS foam (b) PE foam และ (c) latex rubber foam [23]

สมบัติทางด้านการกดอัดเป็นสมบัติที่มีความสำคัญที่มีความสำคัญมากของพอลิเมอร์โฟม ปริมาณของพลังงานที่โฟมดูดซับและลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมนั้นขึ้นกับความหนาแน่น ชนิดของพอลิเมอร์และชนิดของเซลล์โฟม



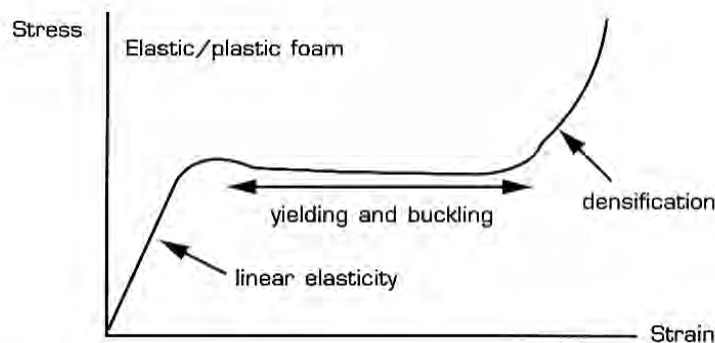
รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกดอัดของโฟมเซลล์เปิด [23]

ในกรณีของโฟมเซลล์เปิด เมื่อได้รับการโค้งงอหรือกดอัดจะเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ผนังเซลล์จะถูกบีบเมื่อได้รับแรงกดอัดทำให้อากาศเกิดการแพร่ออกมาจากโฟมได้ยากขึ้น อากาศที่ติดค้างก็ไปขัดขวางการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมที่ขั้นตอนสุดท้ายของการกดอัด โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมเซลล์เปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 แต่เมื่อโฟมมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิดที่ไม่มีการไหลของอากาศเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณการกดอัดของก๊าซในเซลล์ การเกิดการโค้งงอและการเสียรูปของผนังเซลล์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ การ stretching และการ yielding ของผนังเซลล์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ โดยแรงกดอัดที่รุนแรงอาจทำให้เซลล์เกิดการเสียรูปได้ โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมเซลล์ปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



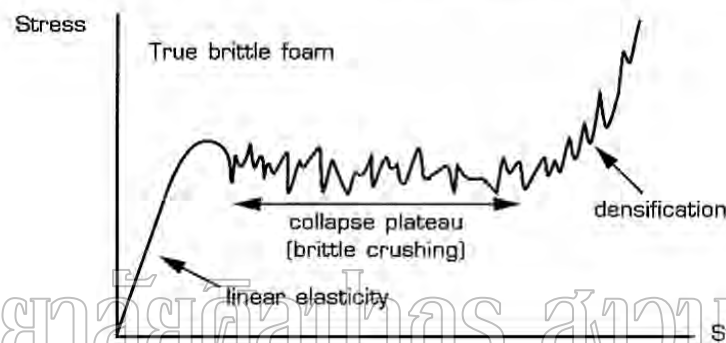
รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกดอัดของโฟมเซลล์ปิด [23]

Rigid foam ที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิดเช่นพอลิสไตรีนโฟมและพอลิยูรีเทนโฟม พอลิเมอร์จะมีค่า yielding ที่ต่ำทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกล (mechanical deformation) ของ rigid foam นั้นขึ้นกับปริมาณการกดอัดของก๊าซและความแข็งแรงของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หาก rigid foam ได้รับแรงกดอัดที่รุนแรงเซลล์ก็จะเกิดการเสียรูปขึ้นตั้งแต่ขั้นตอนการดูดซับพลังงานโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น พลังงานที่โฟมดูดซับไปใช้ในการเปลี่ยนรูปร่างนั้นสามารถแสดงได้ในรูปของ compression stress-strain curves ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงถึง compressive stress-strain curve ของ flexible foam [23]

รูปที่ 2.9 แสดงถึง compressive stress-strain curve ของ elastic/plastic foam เช่น flexural foam ที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด จากรูปจะเห็นว่าที่ความเครียดต่ำๆคงแสดงในช่วง linear elasticity โฟมจะแสดงพฤติกรรมแบบ elastic ตามแบบพอลิเมอร์ปกติเนื่องจากการเกิด stretching ของผนังเซลล์ จากนั้นในช่วง yielding ก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์จะถูกกดอัดรวมกับการเกิด yielding และการเกิดการโค้งงอของผนังเซลล์ เมื่อเซลล์เกิดการแตกจะทำให้ผนังเซลล์ถูกอัดมาสัมผัสกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น (densification) หากยังคงให้ความเครียดต่อไปจะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติของแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณีของโฟมที่มีโครงสร้างแบบเซลล์เปิดอัตราการเพิ่มขึ้นของ stress-strain curve จะต่ำกว่าในกรณีของโฟมที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด และพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นที่ค่าความเค้นต่ำกว่าโฟมที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด



รูปที่ 2.10 แสดงถึง compressive stress-strain curve ของ rigid foam [23]

ถ้าเปรียบ compressive stress-strain curve ของ rigid foam ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในช่วงแรกกราฟยังคงแสดงพฤติกรรม linear elasticity ของพอลิเมอร์อยู่ จากนั้นเส้นกราฟจึงมีลักษณะที่ไม่คงที่แสดงลักษณะการแตกแบบเปราะซึ่งเกิดจากการแตกออกของผนังเซลล์ เมื่อเซลล์เกิดการแตกออกจนกระทั่งโฟมเกิดการยุบตัวจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์โฟมจึงมีสมบัติของแข็งเพิ่มมากขึ้น

2.8.2 สมบัติเชิงความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k) ของโฟมคือค่าความหนาแน่นและองค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ แต่ปริมาณความร้อนส่วนมากมักเกิดการถ่ายเทผ่านเฟสของก๊าซเนื่องจากเฟสของก๊าซจะมีปริมาณมาก ในตารางที่ 2.7 จะแสดงค่าการนำความร้อนของก๊าซที่ใช้เป็น foaming agent ส่วนมาก จากตารางจะเห็นว่าก๊าซที่เป็นไฮโดรคาร์บอนจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมากดังนั้นโฟมที่มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจึงมีสมบัติการนำความร้อนที่ไม่ดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมที่มีองค์ประกอบเป็นก๊าซชนิดอื่น หากภายในเซลล์โฟม

ประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ค่าการนำความร้อนของก๊าซภายในเซลล์จะสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.12 [23] คือ

$$k_m = n_1 k_1 + n_2 k_2 \quad (2.12)$$

เมื่อ k_m คือค่าการนำความร้อนของก๊าซผสม n_1 และ n_2 คืออัตราส่วนโดยมวลของก๊าซ 1 และ 2 และ k_1 และ k_2 คือค่าการนำความร้อนของก๊าซ 1 และ 2

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าการนำความร้อนของก๊าซชนิดต่างๆที่ใช้ใช้เป็น foaming agent ที่อุณหภูมิ 20 °C [23]

Compound	Thermal Conductivity (W/m K)
Trichlorofluoromethane (CFC-11)	0.0084
Dichlorodifluoromethane (CFC-12)	0.0098
Trichlorotrifluoroethane	0.0072
Dichlorotetrafluoroethane	0.0104
Dichlorofluoromethane	0.0112
Dichloromethane	0.0063
Methyl chloride	0.0105
2-Methylpropane	0.0161
Nitrogen	0.0260
Carbon dioxide	0.0168
Carbon monoxide	0.0250
Air	0.0259

ตามปกติก๊าซจะมีสมบัติที่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีกว่าของแข็ง ทำให้เมื่อความหนาแน่นของโฟมลดลงค่าความต้านทานความร้อนของโฟมจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณของก๊าซภายในโฟมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นหลักเป็นกระบวนการแผ่รังสีความร้อน (radiant heat transfer) เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้มากขึ้นเนื่องจากโฟมมีปริมาณเนื้อของแข็งมากขึ้น

2.8.3 สมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์โฟม

นอกจากสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนแล้ว โฟมยังมีสมบัติอื่นๆที่สำคัญอีกคือ สมบัติทางด้านความทนทานต่อความชื้น สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางด้านการดูดซับเสียง (acoustic properties) เป็นต้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.K. Bledzki และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม MAPP และชนิดของ chemical foaming agents, CFAs (endothermic, exothermic และ endo/exothermic) ที่มีต่อความหนาแน่น สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ ความขรุขระของผิวชิ้นงาน และ cell morphology ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไม้ โดยอาศัยกระบวนการ Injection moulding จากการศึกษาพบว่า

- โครงสร้างของเซลล์โฟมที่เตรียมได้มีลักษณะกลมและชนิดของ CFAs นั้นมีผลต่อขนาดของ cell โดยการใช้ CFAs ที่มีปฏิกิริยาการสลายตัวแบบคายความร้อน จะทำให้ได้เซลล์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของเซลล์สม่ำเสมอมากที่สุด และทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงประมาณ 30%
- การเติม Maleated-polypropylene (MAPP) ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็น coupling agent จะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 80%
- การใช้ CFAs ที่มีปฏิกิริยาการสลายตัวแบบดูดความร้อนส่งผลให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความขรุขระลดลง 70% เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม CFAs

L.M. Matuana และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ void fraction และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยต่อสมบัติทางด้านความทนทานต่อการดึงยึดและความทนทานต่อแรง

กระแทกของพอลิไวนิลคลอไรด์คอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไม้ จากการศึกษาพบว่า cell morphology และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยมีอิทธิพลต่อสมบัติทางด้านความทนทานต่อการดึงยึดและความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิไวนิลคลอไรด์คอมพอสิตดังนี้

- ค่า tensile strength และค่า tensile modulus ของชิ้นงานคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างแบบโฟม เมื่อปริมาณ void fraction ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า tensile strength และค่า tensile modulus ลดลง
- ชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีอัตราการลดลงของ tensile strength และค่า tensile modulus ที่มากกว่าชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิว
- ค่า specific elongation at break ของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบโฟมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ void fraction เพิ่มมากขึ้น
- ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิว

- ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อชิ้นงานมีโครงสร้างแบบโฟม โดยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อ void fraction เพิ่มขึ้น และค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิว

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์