

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และการทบทวนเอกสาร

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลเบื้องต้น หลักการหรือทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ประกอบการทำวิจัย เพื่อการพัฒนาโฟมแก้วฉนวนความร้อนจากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลเกี่ยวกับ ความหมายของโฟมแก้ว กลไกการเกิดฟอง ชนิดของสารก่อฟอง ความหมายของฉนวนความร้อน ชนิดและสมบัติของโฟมแก้ว เศษแก้วชนิดโซดา-ไลม์-ซิลิกา และตะกรันจากการหลอมเหล็ก

2.1 โฟมแก้วหรือเซลลูลาร์กลาส (Glass foam or cellular glass)

จากข้อกำหนดของฉนวนกันความร้อนตามเอกสารโครงการฉนวนเขียว (Building materials: thermal insulation) [2] ได้ให้คำจำกัดความเป็นฉนวนที่ประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ ที่ผนึกติดกับเซลล์อื่นๆ จึงมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน

โดยโฟมแก้วเกิดจากการนำแก้วผง (Glass powder) ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์ ซึ่งแก้วเป็นวัสดุที่มีข้อดีหลายด้าน เช่น แข็งแรง ทนการกดอัด ไม่เป็นพิษและเฉื่อยต่อสารเคมี เป็นสารไม่ติดไฟ เมื่อนำมาทำเป็นโฟมแก้วแล้วจะได้วัสดุใหม่ที่มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อน ทนความชื้นจัด ทนการกัดแทะจากหนูและแมลง ทนต่อแบคทีเรีย ทนต่อน้ำ และแรงดันน้ำ ยิ่งไปกว่านั้นโฟมแก้วยังง่ายและสะดวกต่อการก่อสร้าง และยังมีค่าใช้จ่ายในการขนย้ายต่ำด้วย เนื่องจากง่ายต่อการจับถือ ตัด และเจาะ และพร้อมต่อการนำไปใช้งานร่วมกับคอนกรีต จากคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จึงทำให้โฟมแก้วนำไปใช้แทนวัสดุก่อสร้างได้ เช่น เป็นฉนวนกันความร้อน ผนังกันความร้อน พื้นกันความร้อน และเพดานที่อยู่ใต้สภาวะอากาศร้อนหรือเย็น [3]

โดยปกติโฟมแก้วได้จากการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวทำให้เกิดแก๊ส ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้คาร์บอน หรือสารประกอบคาร์บอนेट โดยจะบดเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างผงแก้ว สารก่อฟอง และอาจเพิ่มสารเติมแต่งบางชนิดลงไป จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สในขณะที่ผงแก้ว

จะเกิดโฟโพลาสติกหรือการอ่อนตัวภายใต้การสุกตัวแบบการไหลหนืด จึงทำให้เกิดเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กจำนวนมากถูกกักอยู่ภายในและมีความดันเพิ่มขึ้นจนขยายตัวไปสู่โครงสร้างของโฟมในสามมิติ ซึ่งหลังจากที่แก้วเกิดการเย็นตัวลงจะเกิดเป็นผนังเซลล์ที่มีรูพรุนปิดอยู่ภายในโฟมแก้วนั้น

สมบัติของโฟมที่ผลิตจากแก้วขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดอนุภาควัตถุดิบเริ่มต้น ความแข็งแรงของชนิดและคุณภาพของสารก่อฟองที่เติมเข้าไป และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผา โดยจะพบว่าโฟมที่ได้จะมีความแข็งแรงต่อการกดอัดสูง และมีโครงสร้างที่เสถียร และเมื่อทำการหาลักษณะเฉพาะด้วยค่าความหนาแน่นพบว่ามีความเพียง $0.13 - 0.30 \text{ g/cm}^3$ ที่สามารถนำไปใช้ทำเป็นวัสดุก่อสร้างได้ดังเช่นตัวอย่างโฟมโลหะอะลูมิเนียมในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของโฟมโลหะอะลูมิเนียม [4]

2.2 การเกิดโฟม (Foaming formation)

โฟมเป็นวัสดุที่เกิดจากการกักฟองอากาศหรือแก๊สไว้ในของเหลวหรือของแข็ง โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นโพรง (Cell) ที่มีผนังเซลล์ (Cell wall) ที่แข็งแรงเพียงพอในการกักอากาศไว้ในทำให้เกิดเป็นรูพรุนแบบปิด (Close pore) ซึ่งโพรงที่เกิดขึ้นมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน และมีการกระจายตัวของโพรงอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอเป็นรูปร่างสามมิติที่เรียกว่าเซลล์ลูลาร์ (Cellular) หรือมีโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง ซึ่งสมบัติของโฟมที่นำไปใช้ทำเป็นวัสดุก่อสร้างจะเน้นด้านความหนาแน่นที่มีค่าน้อยหรือมีน้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนความร้อนและฉนวนเสียง และไม่นำไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วการเกิดโฟมแก้วนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แนวทางด้วยกัน คือ การเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของสารจำพวกคาร์บอนและสารประกอบคาร์บอน และการเกิดจากการขยายตัวของอากาศ

2.2.1 การเกิดโฟมจากปฏิกิริยาทางเคมีของสารจำพวกคาร์บอนและสารประกอบคาร์บอน [5]

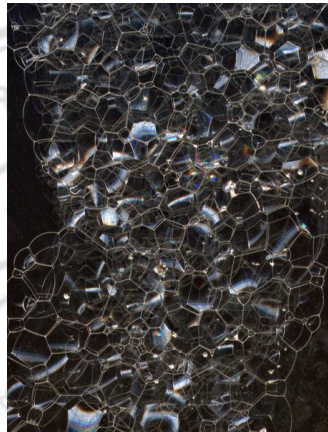
การเกิดโฟมจากปฏิกิริยาทางเคมีนี้จะป็นกระบวนการแบบแห้ง ทำได้โดยการผสมผงแก้วและสารก่อฟองจำพวกคาร์บอนและสารประกอบคาร์บอน เช่น SiC (ซิลิกอนคาร์ไบด์), CaCO₃ (แคลเซียมคาร์บอเนต) เป็นต้น โดยเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 800-900 °C จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะแตกตัวให้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ 2.1 และที่อุณหภูมินี้ผงแก้วจะเริ่มอ่อนตัวจนสามารถไหลตัวได้ โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงแก้วจะเริ่มแข็งตัวจนเกิดเป็นโฟมอากาศภายในเนื้อโฟมแก้วดังภาพที่ 2.2



2.2.2 การเกิดโฟมแก้วจากการขยายตัวของอากาศ

การเกิดโฟมแก้วจากการขยายตัวของอากาศนั้นจัดเป็นวิธีการแบบเปียก โดยจะเริ่มจากการทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นมาก่อนด้วยการผสมสารก่อฟองจำพวกสารลดแรงตึงผิว เช่น สบู่ เป็นต้น กับน้ำ แล้วปั่นจนเกิดฟองอากาศขึ้นมาดังภาพที่ 4.3 แล้วจึงทำการเติมส่วนผสมที่เป็นของแข็ง เช่น ผงแก้ว ตัวเชื่อมประสาน หรือสารเติมแต่งลงไป จากนั้นเมื่อปั่นส่วนผสมทุกอย่างจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึง

เทสลิปโฟมแก้วนํ้าลงในแบบพิมพ์อะคริลิกที่รองด้วยกระดาษเพื่อกันการรั่วซึมของนํ้าสลิป แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 70-100 °C เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จจึงถอดแบบพิมพ์ออกแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 700-900 °C ด้วยอัตราการเผาประมาณ 3 °C/min โดยระหว่างการเผาอากาศจะเกิดการขยายตัวจนเกิดแรงดันอากาศภายใน พร้อมทั้งกับที่แก้วเกิดการอ่อนตัวจนสามารถไหลตัวได้นั้น ทั้งสองกระบวนการที่กล่าวมาจะทำให้เกิดเป็นโพรง หรือรูพรุนภายในเนื้อชิ้นงานขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการแบบเปียกในการเกิดโฟมดังกล่าวที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเกิดโฟมด้วยวิธีการแบบเปียก



ภาพที่ 2.4 แผนผังการเกิดโฟมแก้วด้วยกระบวนการแบบเปียก

2.3 สารก่อฟอง [3]

สารก่อฟองเป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุนซึ่งจะส่งผลต่อรูปร่างของรูพรุนและสมบัติของโฟมแก้วสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารก่อฟองที่ใช้ สารก่อฟอง (Foaming agent) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารก่อฟองชนิดรีดอกซ์ (Redox foaming agents) คือ วัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่นิยมใช้ เช่น ถ่านโค้ก แอนทราไซค์ จีเซลมา แกรไฟต์ และซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งสารก่อฟองชนิดนี้จะปล่อยก๊าซจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วจะค่อยๆ หดไปเมื่อแก้วหลอม

2. สารก่อฟองชนิดเป็นกลาง (Neutralization foaming agents) คือ วัตถุที่ประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอเนตซึ่งจะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกมารวมตัวกันและเกิดเป็นรูพรุน

ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารก่อฟองชนิดที่ 1 เป็นกลุ่มสารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

2.4 ฉนวนความร้อนของโฟม [6]

หมายถึง วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง โดยที่อุณหภูมิทั้งสองด้านจะต้องแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของโฟมแก้วโดยทั่วไปจะมีค่าการนำความร้อน (k) เท่ากับ 0.054 W/m.K และค่าความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 0.136 g/cm^3

ถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน คือ การถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง โดยความร้อนจะเคลื่อนที่ไปตามเนื้อของวัตถุจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไม่ได้เคลื่อนที่ เมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลจะสั่นมากขึ้นจึงชนกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันความร้อนจึงถูกถ่ายโอนไปโดยการสั่นของโมเลกุล วัตถุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสามารถนำมาทำฉนวนกันความร้อนได้ เช่น ไม้ พลาสติก แก้ว เป็นต้น

คุณสมบัติของฉนวนความร้อนที่ดี สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. มีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นต่ำ
2. มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำกล่าวคือยอมให้ความร้อนผ่านตัวฉนวนได้น้อยมาก
3. สามารถทนต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดี
4. มีอัตราการดูดซับความชื้นที่ต่ำมากหรือไม่มีเลย
5. สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะสารเคมี
6. มีความคงตัวสูง เปลี่ยนรูปได้ยาก

7. ต้องทนต่อการขีดไฟ
8. ใช้กับระดับอุณหภูมิที่กว้าง
9. ติดตั้งง่าย ใช้งานได้สะดวก
10. มีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย

2.5 ชนิดและสมบัติของโพลีเมอร์

โพลีเมอร์ที่มีการจำหน่ายบนท้องตลาดโดยทั่วไปมีหลายประเภทแบ่งตามชนิดของวัตถุดิบ และการนำไปใช้งาน ซึ่งโพลีเมอร์ที่มีการนำไปใช้งานส่วนมากมักจะเป็นโพลีเมอร์ที่ผลิตจากโลหะ โดยมีสมบัติดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของโพลีเมอร์ทั่วไป [7-10]

ชนิดโพลีเมอร์	สมบัติของโพลีเมอร์แก้ว		
	ความหนาแน่น (g.cm^{-3})	ความทนทานต่อแรงกดอัด (MPa)	ค่าการนำความร้อน ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
คาร์บอนโพลีเมอร์	0.400	>15	0.25-25
แกรไฟต์โพลีเมอร์	0.545	3	45
อะลูมินาโพลีเมอร์	0.390	2200-2600	25-35
นิเกิลโพลีเมอร์	0.169-0.171	0.3-0.32	10-12

2.6 แก้วโซดา-ไลม์ (Soda-lime glass) [11]

แก้วโซดา-ไลม์ คือ แก้วชนิดหนึ่งที่มีทราย (71-75% โดยน้ำหนัก) เป็นองค์ประกอบหลัก เหมือนแก้วอื่นๆ แต่มีโซดาหรือโซเดียมออกไซด์ (Na_2O เตรียมจากโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต 12-16% โดยน้ำหนัก) กับปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO เตรียมจากหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต 10-15% โดยน้ำหนัก) อยู่ในปริมาณมากด้วย ซึ่งอาจมีการเติมวัตถุดิบอื่นเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติที่เฉพาะขึ้น เช่น สารให้สี เป็นต้น ในบางครั้งอาจมีการแทนแคลเซียมด้วยแมกนีเซียมในหินปูน หรือแทนที่โซเดียมด้วยโพแทสเซียมในโซดาก็ยังจัดว่าเป็นแก้วชนิดโซดาไลม์อยู่ แก้วโซดาไลม์มีราคาถูก หลอมละลายง่าย ถูกใช้ทำขวดน้ำขนาดต่างๆ ทั้งชนิดใสและมีสี แก้วน้ำซึ่งเราสามารถพบเห็นได้ทั่วไปและใช้ทำกระจกแผ่น กระจกหน้าต่าง ซึ่งสามารถนำไปทำกระจกนิรภัยหรือที่เรียกว่า “Safety glass” กระจกกันกระสุนหรือเรียกว่า “Bullet proof glass” ปริมาณของอัลคาไลด์ที่สูงมากในแก้วโซดาไลม์ทำให้จุดหลอมเหลวของแก้วลดต่ำลง แต่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ

ร้อน (Coefficient of thermal expansion ; CTE , α) ประมาณ 20 เท่าจากประมาณ $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ถึง $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ซึ่งแก้วโซดาไลม์เป็นแก้วชนิด Soft glass (แก้วที่มีค่า α ต่ำกว่า $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ จะเรียกว่า Hard glass) เพราะมีค่า CTE สูง

2.7 ตะกรันจากการหลอมเหล็ก [12]

ตะกรันจากการหลอมเหล็กเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็กในการหลอมเศษเหล็ก โดยเศษเหล็กที่เป็นวัตถุดิบมักจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ อาทิ คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ การทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตามต้องการ ต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารมลทินเหล่านี้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกรัน เช่น หินปูนหรือปูนขาวลงไป ตะกรันจากการหลอมเหล็กจึงเป็นสารประกอบโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันจากการหลอมเหล็กค่อนข้างไม่คงที่เท่าใดนัก โดยตะกรันจากการหลอมเหล็กที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณ 25-40 % โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณ 30 และ 15 % มีสีดำนค่อนข้างเข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ ในขณะที่ตะกรันจากการหลอมเหล็กที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็ก (Ladle furnace) มีฤทธิ์เป็นด่างกว่ามาก เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (มาจากปูนขาว) ต่อซิลิกาค่อนข้างสูง มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณ 35-60 % โดยน้ำหนัก มีสีเทาเข้ม แฉ่ง และมักมีเหล็กเจือปนมาด้วย ตะกรันจากการหลอมเหล็กที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กจัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษเช่นเดียวกับตะกรันจากการหลอมเหล็กที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้า

2.8 สารสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tulyaganow และคณะ (2006) [13] ได้ศึกษาโฟมแก้วจากเศษแก้วแผ่นโซดาไลม์และเศษแก้วระบบอะลูมิโนซิลิเกตกลาส โดยใช้ SiC เป็นสารก่อฟอง จากนั้นจึงศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเศษแก้ว และ SiC ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโฟมแก้ว พบว่าการเติมเศษแก้วระบบอะลูมิโนซิลิเกตมากกว่า 1 % โดยน้ำหนัก นั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถการผิ่กตัว และเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของโฟมแก้วได้ (0.239-0.309 MPa) โดยค่าต่างๆเหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของโครงสร้างรูปร่างที่ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยมีการกระจายตัวอย่างเหมาะสมของรูพรุนรูปห้าเหลี่ยม และรูปหกเหลี่ยมที่อยู่โดยรอบพร้อมกับผนังเซลล์ที่มีเนื้อแน่นและพบอีกว่าผลึกของ โวลลาสโตไนต์ (Wollastonite, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และ ไดออปไซด์ (Diopside, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อยู่ในเนื้อโฟมแก้วนั้นมีผลทำให้เกิดผลที่ดีต่อพฤติกรรมเชิงกลของโฟมแก้ว

Fernandes และคณะ (2009) [5] ได้เตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของโฟมแก้วที่ผลิตจากเศษแก้วแผ่นและเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้า โดยใช้สารประกอบคาร์บอนเป็นสารก่อฟอง ซึ่งชนิดและปริมาณของสารประกอบคาร์บอนตลอดจนอุณหภูมิการเผาผลาญจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ, ค่าความทนต่อการกดอัด, โครงสร้างจุลภาค และช่วงการเกิดผลึก ซึ่งพบว่าโฟมแก้วที่ได้มีค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำ ($0.36-0.41 \text{ g/cm}^3$) และค่าความทนต่อแรงกดอัดสูง ($2.40-2.80 \text{ MPa}$) ซึ่งสามารถเตรียมโฟมแก้วได้จากส่วนผสมที่มีเศษแก้วแผ่น 80 และเถ้าลอย 20 % โดยน้ำหนัก โดยเติมสารประกอบคาร์บอนในปริมาณเล็กน้อย (1-2 % โดยน้ำหนัก) เพื่อเป็นสารก่อฟองและการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารก่อฟองนั้นมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของโฟมแก้ว ซึ่งคาดว่าผลึกเหล่านี้จะเพิ่มความหนืดโดยรวมของระบบจำกัดการขยายตัวของฟองอากาศและจะทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏและความทนต่อแรงกดอัดเพิ่มมากขึ้น สำหรับแต่ละสูตร ค่าความหนาแน่นปรากฏที่ต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 850°C นั้นขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างการลดลงของความหนืดกับการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งจะมีส่วนช่วยในการขยายตัวของของเหลวภายใต้ความดันก๊าซภายในและการปลดปล่อยก๊าซพร้อมกับการยุบตัวที่ละน้อยของโฟมนอกเหนือจากค่าความหนาแน่นปรากฏและระดับของการเป็นผลึกแล้ว ค่าความทนทานต่อการกดอัดของโฟมยังขึ้นอยู่กับรูพรุนภายในและความหนาของผนังเซลล์อีกด้วย การผลิตโฟมแก้วจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการรีไซเคิลเศษแก้วและเถ้าลอย

Chen และคณะ (2012) [14] ได้ศึกษาโฟมแก้วที่ใช้ปริมาณของเถ้าลอยสูงซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีปริมาณสูงมากกว่า 80 % โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารก่อฟองและโซเดียมบอแรกซ์เป็นฟลักซ์ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ใช้อัตราการเผา 3.5°C/min พบว่าโฟมแก้วที่เตรียมจากเถ้าลอย 70 % โดยน้ำหนัก และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารก่อฟองนั้นมีสมบัติโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ไม่ว่าจะเป็นค่าความหนาแน่นที่ต่ำ รูพรุนสูง และความแข็งแรงเชิงกลที่สูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Fernandes และคณะ (2009) [5] ก่อนหน้านี้

จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าสามารถเตรียมโฟมแก้วได้จากเศษแก้วแผ่นต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก หรือจากเถ้าลอย 70 % โดยน้ำหนัก โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารก่อฟอง โดยจะเกิดผลึกขึ้นภายในโฟมแก้วซึ่งอาจมาจากสารก่อฟองที่ใช้หลังการแตกตัวเกิดการหลอมรวมกับเศษแก้วหรือเถ้าลอย ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงอย่างช้าๆจะสามารถเกิดการตกผลึกขึ้นได้ โดยผลึกเหล่านี้จะส่งผลถึงค่าความหนาแน่นและค่าความทนต่อการกดอัดของโฟมแก้วหลังเผา อีกทั้งยังมีผลต่อค่าความหนืดของแก้วที่หลอมแล้วอีกด้วย ซึ่งเมื่อแก้วมีความหนืดสูง การขยายตัวเนื่องด้วยความดันอากาศภายในจึงเกิดได้อย่างไม่เต็มที่ทำให้รูพรุนที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

Bernardo และคณะ (2007) [15] ได้ศึกษาหาความเป็นไปได้ของโฟมแก้วจากเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษผงซัด SiC โดยทำการเติม SiC ลงในผงแก้วที่ 2.5-17.5 % โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงทำการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ด้วยอัตราการเผา 10 °C/min และเผาแช่ไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น การทนต่อแรงกดอัด ความหนาแน่น การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และการวิเคราะห์ทางแร่ พบว่าการเติม SiC เข้าไปในผงแก้วโซดาไลม์เพื่อเป็นสารก่อฟอง จะทำให้โฟมมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 8 % หรือมีความพรุนตัวที่ 92 % นั่นเอง โดยปริมาณที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับที่ 12.5 % โดยน้ำหนัก อีกทั้งค่าความพรุนตัว และค่าความแข็งแรงเชิงกลนั้นยังใกล้เคียงกับตัวอย่างจากทางการค้า จึงทำให้ทราบว่าสามารถเตรียมโฟมแก้วจากส่วนผสมจากกากของเสียได้ และยังสามารถในการถูกชะล้างซ้ำอีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถยืนยันได้ว่าโฟมแก้วที่เตรียมจากกากของเสียนั้นจะเป็นวัสดุที่เสถียรทางเคมี ส่วนการเพิ่มสารออกซิไดซ์ (MnO_2) เข้าไปนั้นมีส่วนช่วยให้โฟมเพิ่มสมบัติความทนทานและทำให้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นจากการใช้กาก SiC โดยความแข็งแรงเชิงกลนั้นมีผลอย่างมากจากความเป็นเนื้อเดียวกันของโฟม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ SiC และสารออกซิไดซ์

จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าสามารถเตรียมโฟมแก้วได้จากกากของเสียไม่ว่าจะเป็นเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษผงซัด SiC โดยปริมาณของ SiC ที่เติมลงไปเพื่อเป็นสารก่อฟองนั้นมีผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของโฟม ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความทนทานของโฟมได้ โดยปริมาณที่เหมาะสมของ SiC สำหรับงานวิจัยนี้คือ 12.5 % โดยน้ำหนัก

Bernardo และ Albertini (2006) [16] ได้ทำการเตรียมโฟมแก้วจากเศษกระจกจอโทรทัศน์ (Cathode ray tubes, CRT) โดยใช้ CaCO_3 เป็นสารก่อฟอง และทำการศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อน เวลาเผาแช่ไฟ และปริมาณของ CaCO_3 โดยใช้อัตราการเผาที่ 5-20 °C/min เวลาเผาแช่ไฟที่ 5-30 นาที และใช้ปริมาณ CaCO_3 ที่ 3, 5, และ 7 % โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 725 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของ CaCO_3 จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น ความทนทานต่อการกดอัด, โครงสร้างจุลภาค, องค์ประกอบทางแร่ และค่าการนำความร้อน พบว่าอัตราการการเผาที่เร็วจะช่วยเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อการบิด และความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ด้วยเวลาในการเผาแช่ไฟ และปริมาณของสารก่อฟอง และโครงสร้างจุลภาคของโฟมแก้วที่ผ่านการให้อัตราการเผาที่เร็วนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าที่อัตราการเผาช้า เนื่องจากเกิดการเกิดโฟมขึ้นอยู่กับการเผาแช่ไฟที่อุณหภูมิการเกิดโฟม ซึ่งอัตราการเผาที่ช้าจะทำให้ได้ความหนาแน่นและความแข็งแรงต่อการบิดในช่วงแคบ โดยจะมีค่าความแข็งแรงต่อการบิดมากกว่า 2

MPa และความหนาแน่นสัมพัทธ์ประมาณ 0.13 g/cm^3 อีกทั้งยังมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ $0.060\text{-}0.070 \text{ W/m.K}$

Méar และคณะ (2006) [17] ได้ศึกษาและสังเคราะห์โฟมแก้วจากเศษกระจกจอโทรทัศน์ที่มี Pb เป็นองค์ประกอบซึ่งจะทำการเตรียมโฟมแก้วโดยใช้ปริมาณของ SiC หรือ TiN ในการเป็นสารก่อฟอง 1 และ 9 % โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิการเผาระหว่าง 750 และ $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 และ 90 นาที ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารก่อฟองและ PbO ในแก้วนั้นจะทำให้เกิดเฟสที่เป็นแก๊สขึ้นภายในโครงสร้าง (CO_2 และ N_2 จาก SiC และ TiN ตามลำดับ) การขยายตัวของแก๊สจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นโพรงหรือรูพรุนขึ้น โดยการวิเคราะห์โครงสร้างอนุภาคแบบส่องกราดถูกนำมาใช้ร่วมกับการหารูพรุนโดยใช้ปรอท เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุรูพรุน ไม่ว่าจะเป็นขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน พบว่าการเพิ่มขึ้นของทั้ง 3 ปัจจัยในการเตรียมโฟมแก้ว (ปริมาณสารก่อฟอง, อุณหภูมิการเผา และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา) มีผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคของโฟมแก้ว ซึ่งการเพิ่มขนาดของรูพรุนนั้นจะทำให้ความต้านทานเชิงกลมีค่าลดลง นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของ PbO ในแก้วยังเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณโลหะ Pb ที่อยู่ในรูปของหยดน้ำ (ฟองอากาศ) บนผิวหน้าของรูพรุน โดยฟองอากาศเหล่านั้นเกิดจากการเชื่อมต่อกันคล้ายๆกับการเชื่อมต่อของรูพรุนซึ่งจะมีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร การเกิดโลหะ Pb ที่เป็นผลจากปฏิกิริยารีดักชันของ PbO นั้นใช้ยืนยันได้ว่าการเตรียมโฟมแก้วนั้นสามารถกำจัดมลพิษบางส่วนจากแก้วที่มีโลหะหนักปะปนได้สำเร็จ

Méar และคณะ (2007) [18] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกล และสมบัติทางความร้อนและไฟฟ้าของโฟมแก้วที่เตรียมจากเศษกระจกหน้าจอโทรทัศน์ (CRT panel) หรือกรวยจอโทรทัศน์ (CRT funnel) หรือส่วนผสมทั้ง CRT panel และ funnel ในอัตราส่วน 2:1 (โดยน้ำหนัก) โดยใช้ TiN และ SiC เป็นสารก่อฟองในปริมาณ 4 และ 5 % โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงทำการเผาที่อุณหภูมิ $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นจึงนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ, ค่าความแข็งแรงต่อการกดอัด ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการนำความร้อน พบว่าโฟมแก้วที่เตรียมได้มีค่าความแข็งแรงต่อการกดอัด $4\text{-}267 \text{ MPa}$ และมีค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ $4\text{-}68 \text{ MPa}$ ส่วนค่าการนำความร้อนนั้นมีค่าต่ำกว่า 0.25 W/m.K ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนความร้อนได้ และมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าของแก้วกระจกทั่วไปซึ่งมีค่า $1.0 \times 10^{-3} \text{ s/m}$ โดยกระจกจอโทรทัศน์ที่สามารถนำไปเตรียมเป็นโฟมแก้วได้คือเศษกระจกกรวยจอโทรทัศน์

Guo และคณะ (2010) [19] ได้ศึกษาโฟมกลาสเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูงจากผลิตภัณฑ์ไมโครที่เตรียมจากกระบวนการเผาผนึก โดยเตรียมจากผงกระจก 93-97 % โดยน้ำหนักและผง SiC 3-7 %

โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 750-850 °C และเพิ่มอุณหภูมิการเผาครั้งละ 50 °C ใช้อัตราการเผา 5 °C/min และเผาแช่ไฟเป็นเวลา 30 min โดยโครงสร้างและเฟสของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะถูกทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยทำการทดสอบองค์ประกอบทางแร่, การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์เชิงความร้อน เพื่อนำไปใช้ในการหาอุณหภูมิต่างๆของโฟมแก้ว ศึกษาและวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงเชิงกล และระบบกลไกการเสริมแรงของผลิตภัณฑ์ไมโคร โดยทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัด พบว่าโฟมแก้วที่เตรียมได้มีค่าความแข็งแรงสูงถึง 5.61-23.73 MPa โดยเป็นผลมาจากปริมาณของสารก่อฟองและอุณหภูมิในการเกิดโฟม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตกผลึกของ Pb, Pb₃O₄ และ Al₆Si₂O₁₃ จึงมีส่วนช่วยให้โฟมแก้วมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าเศษกระจกจอตอร์ทันที่มี Pb เป็นองค์ประกอบสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมโฟมแก้วได้ โดยอัตราการเผารวดเร็วนั้นจะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโฟมแก้ว ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของโฟมแก้ว อีกทั้งอุณหภูมิการเผา, ระยะเวลาในการเผาแช่ไฟและปริมาณของสารก่อฟองนั้นยังมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโฟมแก้วด้วย โดยขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นนั้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมแก้วมีค่าลดลง และจากองค์ประกอบของกระจกจอตอร์ทันที่มี Pb ผสมอยู่ด้วยนั้น เมื่อเกิดการเย็นตัวลงจะเกิดการตกผลึกของ Pb, Pb₃O₄ และ Al₆Si₂O₁₃ ซึ่งจะช่วยให้โฟมแก้วมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved