

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) [2]

พอลิคาร์บอเนตเตรียมได้ครั้งแรกโดย Einhorn ในปี 1898 โดยปฏิกิริยาของฟอสจีน (phosgene) ไฮโดรควิโนน และ รีซอร์ซินอล (resorcinol) ได้ไฮโดควิโนน พอลิคาร์บอเนตไม่หลอมไม่ละลาย มีความเป็นผลึก และได้รีซอร์ซินอลพอลิเมอร์เป็นอสัณฐาน มีจุดหลอมเหลว 200 °C ปี 1930 แครเตอร์กับแนตตา เตรียมอะลิฟาติกพอลิคาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ได้พอลิเมอร์มีจุดหลอมเหลวต่ำถูกไฮโดรไลซ์ง่าย ต่อมาปี 1956 บริษัท Farbenfabriken Bayer ได้ลองใช้สารประกอบอะโรมาติก เพื่อทำให้ได้แบบพอลิเอธิลีนเทรฟธอลเลต โดยใช้ bisphenol A ทำปฏิกิริยากับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอนิกได้พอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทนความร้อน และไม่ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย ปี 1959 จึงได้เริ่มผลิตทางการค้าในประเทศเยอรมันและสหรัฐอเมริกา

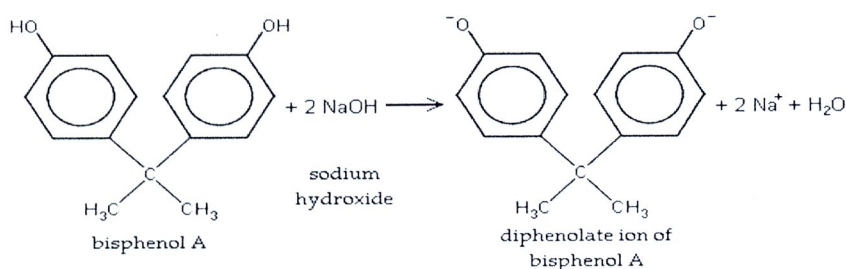
โดยที่ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบพอลิไฮดรอกซีกับกรดพอลิเบสิก จะเกิดการควบแน่นได้พอลิเอสเทอร์ (-COO) แต่ในปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบพอลิไฮดรอกซีกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) จะได้พอลิคาร์บอเนต ซึ่งมีหมู่คาร์บอเนต (-O-(C=O)-O) จึงอาจจัดไว้กลุ่มเดียวกับพอลิเอสเทอร์ได้ และเป็นเทอร์โมพลาสติกได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีสมัยใหม่

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่แข็งแรง โปร่งแสง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ไม่ติดไฟแต่จะทำให้ไฟดับ ทนความร้อนได้สูงจึงใช้แทนกระจกได้เป็นอย่างดี ความแข็งแรงคงที่จนอุณหภูมิถึง 140 °C ความเหนียวก็คงที่จนอุณหภูมิถึง 140 °C เช่นกัน อุณหภูมิ T_g ประมาณ 145 °C กรณีที่ใช้สารตั้งต้นบริสุทธิ์มาก จะได้พอลิเมอร์ใสเหมือนน้ำ แต่ถ้าสารตั้งต้นบริสุทธิ์น้อยลงจะได้พอลิเมอร์สีออกเหลืองๆ ทนต่อแรงดึงประมาณ 8000-10500 lb/in² พอลิเมอร์ตัวนี้ไม่ค่อยละลายในตัวทำละลายทั่วไป แม้จะมีค่าพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกันก็ตาม ก็จะละลายได้เฉพาะ อสัณฐานเท่านั้น จึงสามารถแยกส่วนที่เป็นผลึกออกมาได้ อย่างไรก็ดีมีตัวทำละลายที่ละลายได้อยู่บ้าง เช่น

คลอโรฟอร์ม, cis-1,2-dichloroethylene, methylene chloride, 1,1,2-trichloroethane, และ 1,1,1,2-dichloroethylene พวกอะซีโตน เบนซีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ จะทำให้พอลิเมอร์นี้พองตัวได้แต่ไม่ละลาย

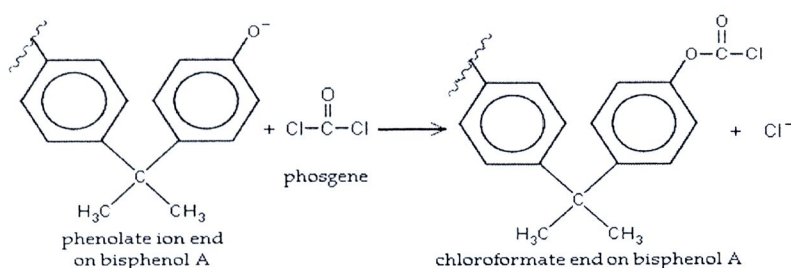
ลักษณะของเรซินมีทั้งเป็นเม็ดใส เป็นผง และเป็นแผ่น เหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เช่น การฉีดเข้าแม่พิมพ์ หรือเอกซ์ทรูชัน ใช้ทำคอมโพไฟฟา กระจกเลนส์คอมโพไฟฟาของรถยนต์ กระจกแว่นตาภาชนะและขวดพลาสติก ใบพัดเรือ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

พอลิคาร์บอนเตสามารถสังเคราะห์ได้จาก bisphenol A และ phosgene (carbonyl dichloride, COCl_2) ขั้นตอนแรกในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอนเตจาก bisphenol A คือการทำ treatment bisphenol A กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการ deprotonates hydroxyl groups ของโมเลกุล bisphenol A ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในภาพที่ 1



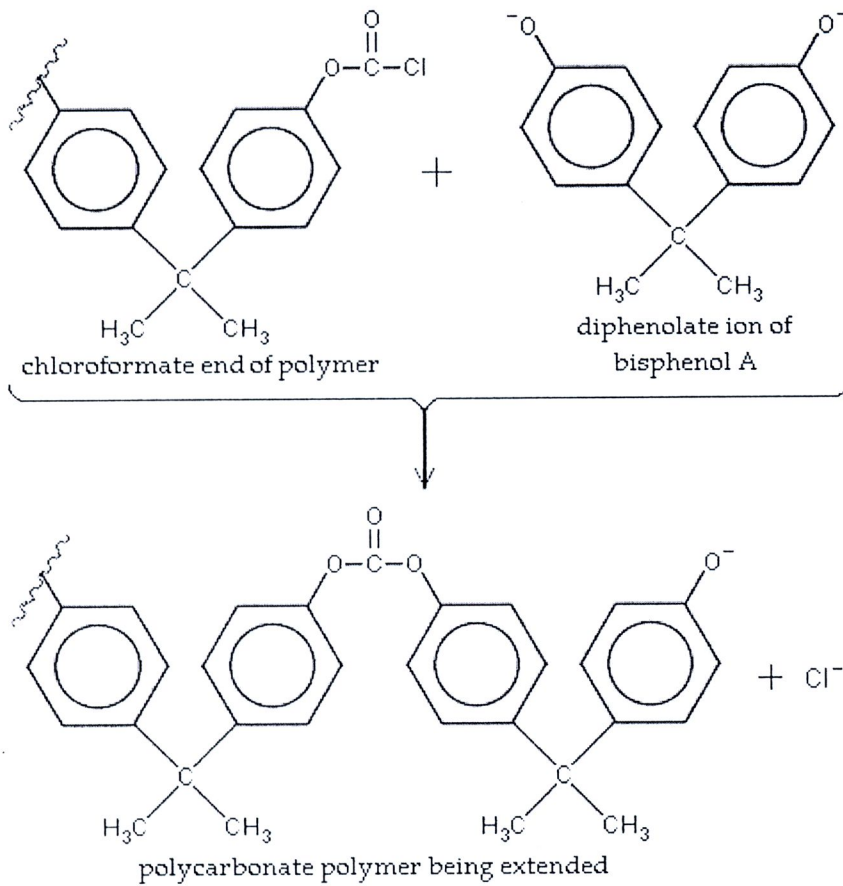
ภาพที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา deprotonates hydroxyl groups ของโมเลกุล bisphenol A [3]

ปฏิกิริยา deprotonated oxygen กับ phosgene โดยการเติม carbonyl ซึ่งทำให้เกิด tetrahedral intermediate หลังจากนั้นประจุลบที่ oxygen จะ form กับ chloride ion (Cl^-) เกิดเป็น chloroformate ดังแสดงในภาพที่ 2

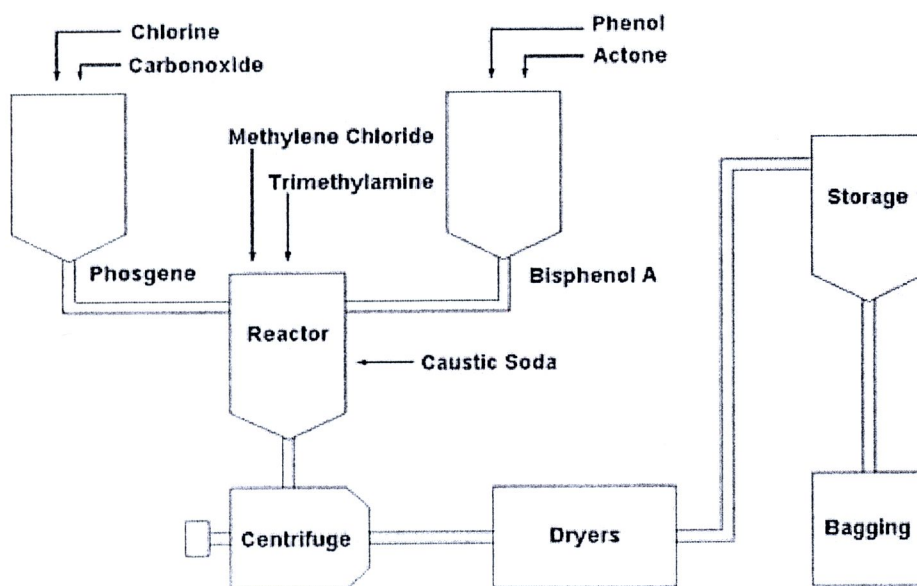


ภาพที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง deprotonated oxygen กับ phosgene [3]

chloroformate ถูก attacked โดยการ deprotonate bisphenol A การขจัด chloride ion และการเกิด dimer ของ bisphenol A เกิดในระหว่างการสร้าง carbonate linkage ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การ deprotonate bisphenol A การขจัด chloride ion และการเกิด dimer ของ bisphenol A [3]



Process diagram of Polycarbonate

ภาพที่ 4 แสดงแผนผังกระบวนการผลิตพอลิคาร์บอเนต [4]

2.1.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) [5, 6]

เส้นใยธรรมชาติ เป็นเส้นใยที่ได้จากพืช และสัตว์ จากรายงานวิจัย พบว่ามีการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก เช่น เส้นใยปอ เส้นใยป่านสนนารายณ์ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด และผงขี้เลื่อยไม้ เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (cellulose) ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์และลิกนิน (lignin) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือเป็น เพคติน (pectin) ไขมัน (wax) และน้ำซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าว พบว่า มีส่วนของเซลลูโลสมากที่สุด

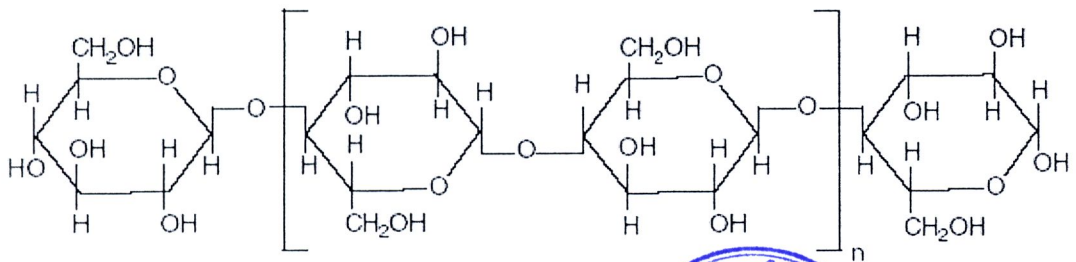
2.1.2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ไม้ยางพารา เส้นใยฝ้าย (Cotton) ปอกระเจา (Jute) ลิ้น (Flax) ป่านลามิ (Ramie) และป่านสนนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

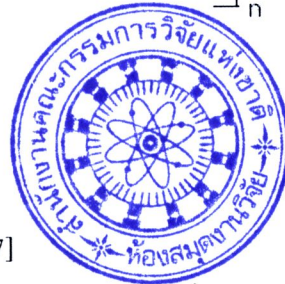
1) เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) แสดงดังภาพที่ 5 เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แทนนิน ไขมัน สาร

ที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



ภาพที่ 5 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose) [6]



2) เฮมิเซลลูโลส [7]

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูโคนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกรบ ชังข้าวโพด เฮกโซแซน สูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีลักษณะที่แตกต่างจากเซลลูโลส (Cellulose) 3 ประการดังนี้

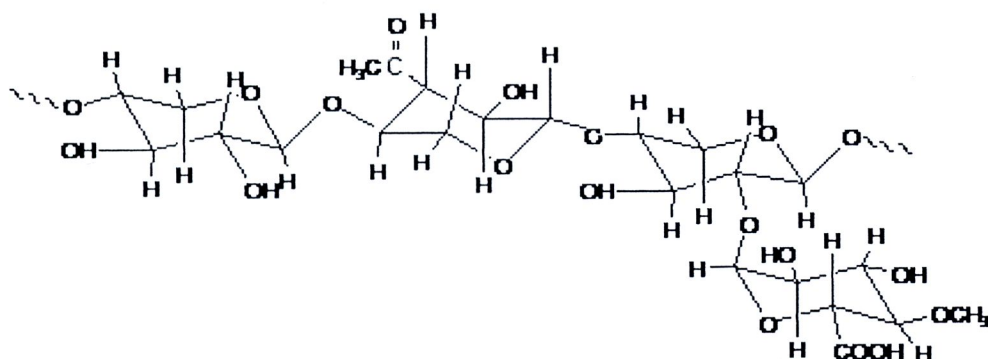
- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเซลลูโลส (cellulose) จะประกอบด้วย ดี-แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (D-anhydroglucopyranose) เท่านั้น

- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีสายโซ่สาขาแต่เซลลูโลส (Cellulose) ประกอบด้วยสายโซ่ตรงเท่านั้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	27.00.2555
เลขทะเบียน.....	245593
เลขเรียกหนังสือ.....	

- ขนาดโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เล็กกว่า

เซลลูโลส (Cellulose) 10 - 100 เท่า



ภาพที่ 6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) [6]

3) ลิกนิน [7]

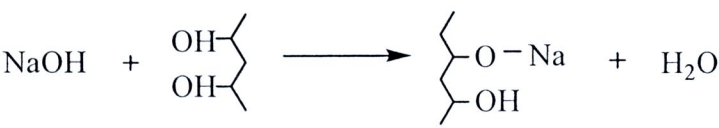
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางกายภาพที่ยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา

2.1.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ [8]

การยึดติดประสานที่ดีระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ เมื่อพิจารณาเส้นใยไม้ซึ่งมีสภาพขั้วทางเคมี (hydrophilicity) สูง ดังนั้นการเข้ากันได้ระหว่างเฟสเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์จึงน้อยทำให้เส้นใยธรรมชาติไม่สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้สม่ำเสมอ ไม่ยึดเกาะกันระหว่างเฟส อีกทั้งเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถดูดซับน้ำได้ดี เนื่องจากมีส่วนของเซลลูโลส ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบอย่างมาก แนวทางที่สำคัญในการปรับปรุงสมบัติวัสดุเชิงประกอบให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการเตรียมผิวเส้นใยด้วยวิธีการปรับปรุงสมบัติผิวของเส้นใย (surface treatment) ตามวิธีการต่อไปนี้

1) การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Alkaline treatment, NaOH) การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อการปรับปรุงผิวของเส้นใยเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ววิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงผิวของเส้นใย โดยจะชะล้างสารพวกลิกนิน (lignin)

ไขมัน (wax) และสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic matters) ที่ผิวของเส้นใยออกไปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงตามภาพที่ 3 ในการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้ ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์เกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Alkaline treatment, NaOH) [8]

2) การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน สารคู่ควบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ไซเลน (Silane coupling agents) เนื่องจากไซเลนนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในพลาสติกเสริมแรง งานเคลือบผิว งานทาสี น้ำหมึก กาว สารยึดติด และยาง และมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี

2.1.3 ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust)

อนุภาคผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust) เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่ง เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ ที่ได้จากการแปรรูปไม้ โดยทั่วไปจะได้ขี้เลื่อย 10 ถึง 16 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อไม้ก่อนที่แปรรูป มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 40-80 ไมครอน (Mesh) ขี้เลื่อยไม้ประกอบด้วยเส้นใย 57.99 เปอร์เซ็นต์ ต่อเนื้อไม้แห้งและ ลิกนินประมาณ 41.24 เปอร์เซ็นต์ ต่อเนื้อไม้แห้ง การเริ่มเสถียรภาพ (Degradation temperature) ของผงขี้เลื่อยไม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผงขี้เลื่อยไม้ที่ใช้จะมีการเริ่มเสถียรภาพหรือสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220°C และ ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป(230-240°C) จะเกิดการสลายตัวไปประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของผงขี้เลื่อยไม้ ผงขี้เลื่อยไม้ส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ที่ขนาด 100-250 ไมครอน [9]

2.1.3.1 ข้อดี ข้อเสียของการนำผงขี้เลื่อยไม้มาใช้งานคอมพอสิต ข้อดี [10]

- 1) ราคาถูก (Low cost) เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้จัดเป็นวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปไม้ ดังนั้นจึงมีราคาถูก ยิ่งเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นที่นิยมนำมาช่วยในการเสริมแรง เช่น ดินเหนียว เส้นใยแก้ว จึงช่วยลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์
- 2) มีน้ำหนักเบา (lighter weight) ผงขี้เลื่อยไม้จัดเป็นวัสดุที่มี

น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรง ทำให้คอมพอสิตที่ได้มีน้ำหนักที่เบากว่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ด้วย

3) จัดเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตน้อยมาก และสามารถนำคอมพอสิตของผงซีลีเนียมมารีไซเคิลใหม่ได้

4) ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานขึ้นรูป นั่นคือช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ เพิ่มค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มความแข็งแรง (Strength)

ข้อเสีย

1) ทำให้กระบวนการผลิตขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น

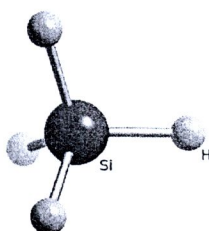
2) ลดเสถียรภาพทางความร้อน

3) ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่ดี

4) ลดความสามารถในการรับแรงกระแทก

5) ไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ได้

2.1.4 ซิเลน (silane) [11]



ภาพที่ 8 แสดงลักษณะโครงสร้างของซิเลน [12]

สารประสานจะทำหน้าที่ในการทำให้ฟิลเลอร์หรือสารเสริมแรงกระจายตัวและยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี และสารประสานอาจจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวประสานหรือเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเสริมแรง โดยการมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างสองเฟสจะทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

ซิเลน เป็นสารเคมีประเภทหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีคือ SiH_4 ดังแสดงในภาพที่ 8 มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ methane ที่อุณหภูมิห้องมันจะมีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ สามารถเกิดการแตกตัวและเผาไหม้เองได้เมื่ออยู่ในอากาศ โดยไม่จำเป็นต้องมีการจุดติดไฟจากภายนอก อย่างไรก็ตามมันก็ยังเป็นสารที่มีความเสถียร มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 88 K จุดเดือด 161 K

ธรรมชาติของไซเลนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะเป็นสารโมเลกุลใหญ่เนื่องจากมีสมบัติ pyrophoricity ที่อุณหภูมิสูงกว่า 420°C ไซเลนจะเกิดการแตกตัวเป็น silicon และ hydrogen ไซเลนและสารที่มี Si-H-bonds จะใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในทางเคมีอินทรีย์และโลหะเคมี

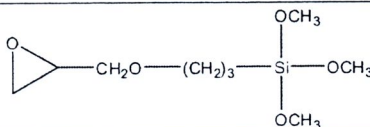
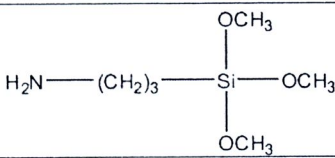
โดยทั่วไปไซเลนจะเป็นซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือน alkane ประกอบไปด้วยสายโซ่อะตอมของ silicon ที่ยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนต์กับอะตอมของ hydrogen สูตรทั่วไปของมันคือ $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ ไซเลนจะมีความเสถียรน้อยกว่าสารประกอบของคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบเดียวกัน เนื่องจากพันธะ Si-Si bond มีความแข็งแรงค่อนข้างจะต่ำกว่า C-C bond ออกซิเจนจะทำให้เกิดการสลายตัวของไซเลนได้โดยง่าย เพราะ Si-O bond เป็นพันธะที่ค่อนข้างจะแข็งแรง

การเรียกชื่อของไซเลน โดยทั่วไปจะขึ้นต้นด้วย di, tri, tetra หรืออื่นๆ ตามจำนวนของอะตอม silicon ในโมเลกุล เช่น Si_2H_6 เรียกว่า disilane และ Si_3H_8 เรียกว่า trisilane เป็นต้น แต่ถ้ามีเพียงตัวเดียวไม่ต้องมีคำขึ้นต้น ไซเลนสามารถเรียกชื่อได้เหมือนกับสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ระบบการเรียกชื่อแบบนี้จะเรียกไซเลนว่า silicon tetrahydride อย่างไรก็ตามการเรียกชื่อแบบนี้จะยุ่งยาก ถ้าไซเลนมีความยาวมาก

ไซโคลไซเลน คือไซเลนที่เป็นวงแหวน เช่นเดียวกับไซโคลอัลเคน นอกนั้นยังมีไซเลนที่เป็นโซ่กิ่ง อนุมูลอิสระเช่น $\cdot\text{SiH}_3$ จะเรียกว่า silyl และ $\cdot\text{Si}_2\text{H}_5$ จะเรียกว่า disilyl เป็นต้น Trisilane ที่มีหมู่ silyl เกาะอยู่ที่อะตอมของซิลิกอนตรงกลางจะเรียกว่า silyltrisilane จะเห็นว่าการเรียกชื่อจะมีหลักการเดียวกับ alkyl radical ไซเลนสามารถรวมตัวกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เหมือนอัลเคน เช่น รวมตัวกับหมู่ $-\text{OH}$ และเกิดเป็น silanol

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของสารประสานคู่ควบไซเลน [13]

Functional group	Chemical name	Structural formula	Molecular weight
Vinylsilane	Vinyltrichlorosilane	$\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$	161.5
	Vinyltris (βmethoxyethoxy) silane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$	280.4
	Vinyltriethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	190.3
	Vinyltrimethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$	148.2
Acryloxy	3-metacryloxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	248.4

Epoxysilane	β -(3,4 epoxycyclohexyl)-ethyltrimethoxysilane	 $C_2H_4Si(OCH_3)_3$	246.4
	3-glycidoxypropyl trimethoxysilane		220.34
Aminosilane	3-aminopropyl-triethoxysilane	$H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)_3$	221.4
	γ -aminopropyl trimethoxysilane		179.29
	N- β (aminoethyl)- γ -aminopropyl-trimethoxysilane	$H_2NC_2H_4NHC_3H_6Si(OCH_3)_3$	222.4
Other	γ -mercaptopropyl-trimethoxysilane	$HSC_3H_6Si(OCH_3)_3$	196.4

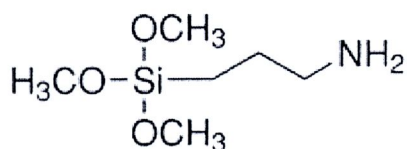
ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างของสารก่อกวนประเภทไฮเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ [13]

สารก่อกวนประเภทไฮเลน	ชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้
1. Vinyl-triethoxy silane 2. Vinyl-tris (2-methoxy) silane 3. 3-Metha acyloxypropyl trimethoxy silane	Unsaturated Polyesters, Pololefins, PVC, PS, ABS, SAN and PMMA
4. 3-Aminopropyltriethoxysilane	Epoxy, Phenolic and Melamine Resins, PA, PHR, PP, PE, PMMA and PC
5. 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane	Epoxy, Phenolic and Melamine Resins, Unsaturated Polyesters, PUR, PC, PS, ABS, SAN, PA, PP, PE and Polysulfides
6. 3-Mercaptopropytrimethoxysilane	Phenolic and Epoxy Resins, PVC, PS, EPPM, Polysulfones and Polysulfides

2.1.3.1 สารคู่ควบไซเลนชนิด γ -aminopropyl trimethoxysilane (Z-6011)

[14]

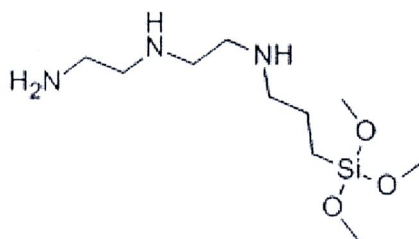
มีสูตรทั่วไปคือ $C_6H_{17}NO_3Si$



ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างของ Gamma-Aminopropyl trimethoxysilane [15]

Gamma-Aminopropyltriethoxysilane (Z-6011) ถูกนำมาใช้เป็น amino-functional coupling agent ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ inorganic และ organic polymers จากโครงสร้างจะเห็นว่ามีโมเลกุลของซิลิคอนอยู่ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงช่วยยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุและมีหมู่ของ amine ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้กับวัสดุเทอร์โมเซต, เทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์

Z-6011 สามารถละลายในน้ำได้อย่างจับปล้น และยังสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์, อะโรมาติกและอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน การนำไปใช้งานสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก (เป็นส่วนประกอบในสายเคเบิล, เส้นใยแก้วเสริมแรงในพลาสติก) ยาง กาว สี หมึก โลหะบริสุทธิ์ และ resins concrete Z-6011 ทำให้คุณสมบัติทาง physical และ electrical ของ mineral-filled phenolics, epoxies, polyamides, polybutylene terephthalate และพวกวัสดุคอมพอสิตที่เป็นเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกอื่นๆจำนวนมาก ซึ่งเมื่อนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่ามีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้สามารถนำมาใช้ปรับปรุงการยึดเกาะและการกระจายตัวระหว่างผงแม่เหล็กที่เป็น organic resins และ inorganic resins ซึ่งช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวและสมบัติทางแม่เหล็กดีเยี่ยม และยังทำให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นด้วย ในเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว Z-6011 เป็นตัวที่ช่วยทำให้สมบัติการโค้งงอ, การอัดแน่น, tensile strength และ shear strengths เพิ่มขึ้น เมื่อนำ Z-6011 มาใช้เป็นตัวประสานในการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วในเทอร์โมพลาสติก อาทิ polyamides, polyesters และ พอลิคาร์บอเนต ก่อนและหลังเมื่อได้รับความชื้น นอกจากนี้ยังทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Z-6011 ยังเป็น adhesion promoter ที่ดีเยี่ยมใน urethane, epoxy และ acrylic latex coating, adhesives และ sealants

2.1.3.2 N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine [16]

ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของ N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine [16]

N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine หรือในชื่อเรียกอื่นๆ เช่น 3-[2-(2-Aminoethylamino)ethylamino]propyltrimethoxysilane, n-(2-aminoethyl)-n'-[3-(trimethoxysilyl)propyl]-2-ethanediamine, N-(2-aminoethyl)-N'-[3-(trimethoxysilyl)propyl]-1 เป็นสารคู่ควบไซเลนที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสีจนถึงสีเหลืองเข้ม มีจุดเดือดอยู่ที่ 114-118°C มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.03 g/mL ณ อุณหภูมิ 25°C โดยมีจุดวาบไฟอยู่ที่ประมาณ 125°C

2.1.4 โฟมพลาสติก (Plastic foams) [17]

โฟม หรือ โฟมพลาสติก (Plastic foams) หมายถึงวัสดุที่มีโพรงเล็กๆ (Cellular materials) ติดต่อกันมากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยเกิดจากกระบวนการใช้สารช่วยพองตัว (blowing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก ซึ่งในปัจจุบันใช้เพนเทน (Pentane) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) โฟมมีทั้งชนิดแข็ง (rigid foam) แข็งปานกลาง (semirigid foam) และยืดหยุ่น (flexible foam)

โฟมพลาสติก เป็นวัสดุที่นับวันจะได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่ายและนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางหลากหลายลักษณะ เช่น กล่องใส่อาหาร ถ้วยขนมหวาน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผ่นรองกันกระแทกในภาชนะบรรจุภัณฑ์ แผ่นหรือฉนวนกันความร้อน และเป็นส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

โดยทั่วไปโฟมจะมีขนาดของเซลล์ 0.05 – 1 มิลลิเมตร โฟมพลาสติกอาจมีขนาดของเซลล์มากกว่า 1 มิลลิเมตร เช่น Thermoset modified PVC foams

โดยทั่วไปโฟมแข็งจะเป็นเซลล์ปิด มักใช้แทนไม้เพื่อทำเฟอร์นิเจอร์เครื่องใช้ในงานอุตสาหกรรม ส่วนโฟมยืดหยุ่นจะเป็นเซลล์เปิด อากาศสามารถหนีออกมาได้เมื่อถูกกดและคืน



รูปได้เร็วเมื่อไม่มีแรงกด จึงนิยมทำเป็นเบาะรองนั่ง

2.1.4.1 ประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset foam) เป็นโฟมพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ที่รู้จักกันดีได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน (PU foam)

2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ เช่น โฟมพอลิสไตรีน (Expandable Polystyrene Foams: EPS foams) โฟมพอลิเอทิลีน (Expandable Polyethylene Foams: EPE foams) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดของโฟมออกจากเกณฑ์อื่นๆ เช่น โครงสร้างในเซลล์ของโฟม, ความแข็งแรงของโฟม และวิธีการผลิต

2.1.4.2 ประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ [18]

1) เซลล์ปิด หมายถึง โฟมที่มีโครงของ Cell ไม่ต่อเนื่องกัน ถูกแยกกันด้วยผนังเซลล์หรือ membrane ซึ่งชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์ขึ้นอยู่กับชนิดของ foaming agent

2) เซลล์เปิด หมายถึง โฟมที่มีโครงของเซลล์ต่อกัน ทำให้ก๊าซสามารถหมุนเวียนถึงกันได้

3) เซลล์ผสม หมายถึง โฟมที่มีทั้ง 2 ชนิดอยู่ในโครงสร้างของโฟม โดยโครงสร้างของเซลล์จะส่งผลต่อสมบัติของโฟมอย่างมาก

2.1.4.3 ประเภทโฟมตามความแข็งแรง

1) แบบต้านทานต่อการเสีรูปร่าง ยืดหยุ่นได้น้อย เช่น PS, PVC (ไม่เติม plasticizer), PUR, UF, PF, UP, EP, PIR, PMI

2) แบบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างได้น้อยแต่ยืดหยุ่นได้ดี เช่น PUR (อ่อน), PVC (อ่อน)

2.1.5 ฉนวนโฟม [19]

ฉนวนโฟมมีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีที่นำมาใช้ รูปแบบที่นำมาใช้มีทั้งแบบพ่น และแบบสำเร็จรูปใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร น้ำหนักเบาไม่ก่อให้เกิดปัญหากับโครงสร้าง และไม่เป็นมลภาวะหรือเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถป้องกันความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงโดยเฉพาะแบบฉีดพ่นเพราะจะใช้กับส่วนใดของอาคารก็ได้ และประหยัดเวลาในการติดตั้ง โดยชนิดของฉนวนโฟมที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

2.1.5.1 ฉนวนพอลิสไตรีนโฟม (Polystyrene, PS – Foam) จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด มี 2 ลักษณะ คือ

1) ฉนวนพอลิสไตรีนแบบอัดรีด (Extruded Polystyrene) ผลิตโดยขบวนการอัดรีด ทำให้มีเซลล์ที่ละเอียดซึ่งมีอากาศผสมกับก๊าซฟลูออโรคาร์บอน (ปัจจุบันมีการใช้ก๊าซประเภทอื่นเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เรือนกระจก) อยู่ภายใน ทำให้มีสภาพในการนำความร้อนที่ต่ำกว่าพอลิสไตรีนแบบหลอ มีโครงสร้างและรูปร่างที่แข็งแรงคงที่มากกว่า ทำให้สามารถทนต่อแรงกดทับได้ดี และต้านทานไอน้ำได้ดี แต่ข้อเสียคือ ติดไฟได้ และหากสัมผัสกับรังสี UV ในบรรยากาศจะมีการเสื่อมสภาพได้ จึงควรมีวัสดุปิดผิวในการใช้งาน ปัจจุบันยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงมีราคาค่อนข้างสูง

2) ฉนวนพอลิสไตรีนแบบหลอหรือขยายตัว (Molded or Expanded Polystyrene) เป็นสไตรีนพอลิเมอร์เช่นกัน แต่ผลิตโดยขบวนการหลอหรือขยายตัว ผลก็คือเซลล์จะหยาบกว่า และมีอากาศบรรจุอยู่ภายใน เมื่อเทียบกับแบบอัดรีดแล้วจะมีสภาพการนำความร้อนสูงกว่า ความหนาแน่นต่ำกว่า ต้านทานไอน้ำได้พอใช้ ติดไฟและก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แต่มีราคาถูกกว่า มีการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสรังสี UV ในบรรยากาศได้เช่นกัน จึงควรเลือกใช้ในโครงสร้างปิดหรือมีแผ่นปิดผิว โดยมีการขึ้นรูปประกอบเป็นผนังมีแผ่นปิด 2 ด้านเพื่อป้องกัน UV และใช้งานได้สะดวก ปัจจุบันมีการผลิตจำหน่ายในประเทศไทยแล้ว

2.1.5.2 ฉนวนพอลิยูเรเทนโฟม (Polyurethane, PU – Foam) เป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง อาทิ การพ่นเพื่อป้องกันความร้อน ได้หลังคาจัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน(k) ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามการนำความร้อนของฉนวนประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นหรือ R-Value จะลดลงตามอายุการใช้งาน เนื่องมาจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์ โดยเฉพาะกรณีสัมผัสกับรังสี UV จะทำให้สีของฉนวนเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเสื่อมสภาพลง โดยเฉพาะโฟมที่ไม่ได้ปิดผิว การดูดซับน้ำจะมีบ้างเนื่องจากไม่ใช่เซลล์ปิดทั้งหมด และในกรณีเกิดเพลิงไหม้แม้ว่าจะมีการผสมสารป้องกันการติดไฟแล้ว แต่ก็ยังก่อให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นอันตราย เนื้อฉนวนมีการขยายและหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากใช้โครงสร้างปิด เช่น ผนังห้องเย็น หรือ มีวัสดุปิดผิวที่แข็งแรงพอก็จะเป็นฉนวนที่ดีมาก

2.1.5.3 ฉนวนพอลิเอทเธลีนโฟม (Polyethelene, PE – Foam) เป็นพอลิเอทเธลีนรีดขึ้นรูปเป็นแผ่นมีฟองละเอียดของก๊าซอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มของฉนวนแบบเซลล์

ปิด มีลักษณะอ่อนนุ่ม จึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ การต้านทานไอน้ำอยู่ในเกณฑ์สูง มีการเสื่อมสภาพได้จากรังสี UV จึงควรมีแผ่นปิดผิวขณะใช้งานหรือไม่สัมผัสกับ UV โดยตรง การเลือกใช้งานป้องกันความร้อนในระบบหลังคาในประเทศไทย ต้องพิจารณาความหนาของฉนวน ให้มี R-Value ที่เพียงพอคือมีความหนาไม่น้อยกว่า 40 มม. ที่ใช้ติดใต้แผ่นหลังคา ซึ่งความหนาดังกล่าวจะต้านทานการไหลผ่านของพลังงานความร้อนได้น้อย และเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์พลาสติกประเภทหนึ่งจึงก่อให้เกิดควันปริมาณมาก และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เป็นอันตรายเมื่อเกิดเพลิงไหม้

2.1.6 การผลิตโฟม [18]

โฟมพลาสติกประกอบด้วยโครงสร้างของเซลล์ซึ่งได้จากการใช้สารเร่งการเกิดโฟม ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งจะเกิดก๊าซจากการเกิดปฏิกิริยาหรือการสลายตัวของสารนั้นๆ ทำให้พลาสติกพองขึ้นเป็นฟองและขยายจนเต็มแม่พิมพ์ ทำให้โฟมที่ได้จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อเป็นชิ้นงานพลาสติก ดังนั้นพลาสติกที่จะเป็นโฟมได้ต้องเป็นพลาสติกที่สามารถลดความหนาแน่นได้ โดยพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้แบ่งเป็น 3 กลุ่มได้แก่

- 1) กลุ่มที่สามารถใช้สารเร่งการเกิดโฟมให้เป็นโฟมได้ เช่น PS
- 2) กลุ่มที่ต้องผ่านการหลอมเหลวแล้วจึงทำให้เกิดฟอง เช่น PS, PE, PVC
- 3) กลุ่มสารเริ่มต้นเป็นของเหลวแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อกลายเป็น

โฟม เช่น PUR, PF, UF

สารที่เร่งการเกิดโฟม (Blowing agent หรือ Foaming agent) แบ่งออกเป็นสารที่ให้ผลทางเคมี (Chemical blowing agent) และทางกายภาพ (Physical blowing agent) นอกจากนี้ยังต้องมีการเติมสารอื่นๆ เช่น Stabilizer ลงไปเพื่อป้องกันการสลายตัวของโฟมหลังจากพุดอกแล้ว ส่วน Nucleating agent จะเติมลงไปเพื่อเป็นตัวก่อให้เกิดโครงสร้างเซลล์ของโฟมขึ้น นอกจากนี้ยังมีพลาสติกเหลว เช่น PVC ที่สามารถขึ้นรูปด้วยการใช้อากาศได้ แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก

2.1.6.1 ก๊าซที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟม

ในโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำถึงปานกลางก๊าซจะครอบคลุมปริมาตรส่วนมากของโฟม ดังนั้นจึงมีผลต่อการควบคุมสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความสามารถในการนำไฟฟ้า และการนำความร้อน โดยหากเป็นก๊าซที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้โฟมที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ และได้เป็นโฟมเซลล์ปิด มีน้ำหนักเบา และยังส่งผลต่อการลอยตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ ก๊าซยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมาก โดยสำหรับโฟมแบบเซลล์ปิดและมีการเสียรูปเชิงกลจะทำให้ก๊าซเกิดการกระจายความแข็งแรงออกไปยังรอบๆด้าน แต่

ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดันโดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งจากการไปรวมตัวกับฟองอื่น และการแพร่ของก๊าซจากพอลิเมอร์ ระบบที่มีเซลล์ขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวของเซลล์ที่สม่ำเสมอ เกิดได้เมื่อระบบมีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้โฟมมีความเสถียร และมีความหนาแน่นสูง แต่ถ้าฟองยังคงขยายจะทำให้ความหนาแน่นลดลง

3) Bubble stabilization เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดความเสถียร เป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งผ่านกระบวนการ crosslink หรือการ cooling จนเย็นตัวทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอ่อนตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ ทำให้โฟมกลายเป็นของแข็งคงรูปเกิดความเสถียร

2.1.6.3 Nucleating agent สำหรับ โฟม [21]

ขั้นตอนแรกในการเกิดฟองก๊าซขึ้นในระบบของเหลว ถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกว่า self nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นต้องมีการเติมอนุภาคของแข็ง ขนาดเล็กเช่น talc หรือ silica ลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็น nucleating agent เพื่อควบคุมขนาด และการกระจายตัวของเซลล์ แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติม nucleating agent เฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซสามารถโตต่อไปได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเกิดฟองขึ้นใหม่

2.1.6.4 ขนาดของเซลล์ โฟม [22]

ขนาดและการกระจายตัวของเซลล์จะมีความแตกต่างกันมากในโฟมต่างชนิดกัน

1) สมบัติของเซลล์โฟมขนาดใหญ่

- Modulus, Shock absorb และ Stiffness โดยขึ้นอยู่กับความหนาของ cell wall
- การเกิดการโค้งงอในระหว่างการอัด
- เป็นฉนวนความร้อนที่ดีเนื่องจากเซลล์ขนาดใหญ่จึงอาศัยการพาความร้อนและการแผ่รังสีแทนการนำความร้อน
- ความสามารถในการซึมผ่านขึ้นอยู่กับแก๊สที่ซึมผ่านผนังเซลล์ได้อย่างอิสระ

2) สมบัติของเซลล์โฟมขนาดเล็ก

- มีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากมีผนังเซลล์มากขึ้น
- ยึดออกได้มากขึ้น

- เกิด defect ที่ละน้อยระหว่างการอัด
- เป็นฉนวนความร้อนที่ดี

2.1.6.5 ความหนาแน่นของโฟม

เนื่องจากความหนาแน่นสามารถใช้ระบุปริมาณสารสัมพันธ์ของพอลิเมอร์และก๊าซรวมทั้งความสม่ำเสมอของโฟมที่เกิดซึ่งส่งผลต่อสมบัติได้ ในทางปฏิบัตินั้นควรผลิตให้โฟมมีความแตกต่างของความหนาแน่นในแต่ละบริเวณน้อยเพื่อให้สมบัติของโฟมที่ได้มีความสม่ำเสมอ สำหรับโฟมที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อ

- Modulus สำหรับพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง
- ความแข็งแรงในพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง
- Yield at break ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุและแปรผกผันกับ

gas-bubbles flaw ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดการแตกหักได้

- Shock absorber ของทั้งแบบ close cell และ open cell
- ความเสถียรของขนาดโฟมทางความร้อน ซึ่งความร้อนจะมี

ผลต่อการขยายตัวหดตัวของโฟม และมีผลมากต่อโฟมแบบ close cell และยังขึ้นกับการซึมผ่านของก๊าซที่ผ่านผิวโฟมได้

- ความเป็นฉนวนความร้อน และฉนวนไฟฟ้า
- การซึมผ่าน
- การดูดซับน้ำ

2.1.6.6 อัตราส่วนระหว่างเซลล์เปิดและเซลล์ปิด เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของโฟมอย่างมาก โดยที่

1) ปริมาณเซลล์เปิดมากจะส่งผลต่อ

- ความอ่อนนุ่ม ความยืดหยุ่น การรองรับน้ำหนัก
- การกระด้างกระดอนและการคืนตัว
- สมบัติเชิงกล
- การดูดกลืนเสียงและความเป็นฉนวน
- การนำความร้อน
- การดูดซับน้ำ
- การซึมผ่าน

2) ปริมาณของเซลล์ปิดมากจะส่งผลต่อ

- การลอยตัว
- ความแข็งแรงและความแข็งแกร่ง
- Compressive set, creep, hysteresis
- ความเป็นฉนวนทางความร้อน
- การหดตัวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโฟม

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดปริมาณอัตราส่วนของเซลล์ทั้ง 2 ชนิด ให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้โฟมมีสมบัติที่ต้องการ

2.1.7 Blowing agent หรือ Foaming agent [20]

สารทำให้เกิดฟอง หรือ ที่มักเรียกกันว่า foaming agent หรือ blowing Agents คือสารที่ทำให้พลาสติกมีโครงสร้างแบบโฟม โดย foaming agent หรือ blowing Agents นั้นสามารถเป็นได้ทั้งก๊าซหรือสารเคมีที่จะเกิดการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยที่เกิดจากสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 แบบ จะกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดันในกระบวนการผลิต เมื่อความดันของกระบวนการลดลงก๊าซจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์ขึ้นในพลาสติก โดยปกติจะสามารถแบ่ง foaming agent หรือ blowing Agents ได้ออกเป็น 2 แบบ คือ Physical foaming agents และ Chemical foaming agents [12]

2.1.7.1 Chemical foaming agents (CFAs)

Chemical foaming agents คือสารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยก๊าซออกมา ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) การเกิดปฏิกิริยากับ CFAs ด้วยตัวเองหรือเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ CFAs ที่ใช้กันส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) Exothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2) Endothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะดูดความร้อนเข้าไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

โดย Chemical foaming agent ทั้ง 2 ประเภท สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

- สารประกอบที่เกิดก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับได้ โดยสารเร่งการเกิดโฟมทางเคมีประเภทนี้ ได้แก่ สารประกอบพวก Ammonium salts ของกรดอนินทรีย์และกรดอินทรีย์ และสารประกอบของ Bicarbonate หรือ Carbonate ของโลหะหมู่ I และ II โดยมีการสลายตัวตามสมการ



โดยที่ G คือ ก๊าซผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อน แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้จึงอาจทำให้ปริมาณก๊าซลดลงและเกิดการหดตัวของวัสดุได้

- สารประกอบที่เกิดก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับไม่ได้ เช่น สารประกอบของ aromatic, aliphatic-aromatic, aliphatic-azo, diazo, diazoamide ฯลฯ ซึ่งจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเร่งการเกิดโฟมทางเคมีชนิดนั้นๆ โดยมีสลายตัวตามสมการ



ส่วนมากก๊าซที่ได้จะเป็น N_2 , CO_2 , NH_3 มักจะเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้

- สารเร่งการเกิดโฟมที่อยู่ในรูปของสารผสม ซึ่งจะปลดปล่อยก๊าซออกมา เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของแต่ละองค์ประกอบ และเกิดก๊าซขึ้นตามสมการ



สารทำให้เกิดฟอง มักถูกนำไปใช้ในพลาสติกด้วยวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนาแน่น หรือความแข็ง ตลอดจนน้ำหนักเพื่อประหยัดต้นทุนวัตถุดิบด้วย สารทำให้เกิดฟองนี้ เป็นสารเคมีที่สามารถผสมเข้าไปในพลาสติกเพื่อก่อเป็นรูปโครงสร้างแบบรังผึ้งโดยผ่านการปล่อยแก๊สในระหว่างกระบวนการผลิต โดยการผลิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดขึ้นรูป calendering และการฉีดแม่พิมพ์

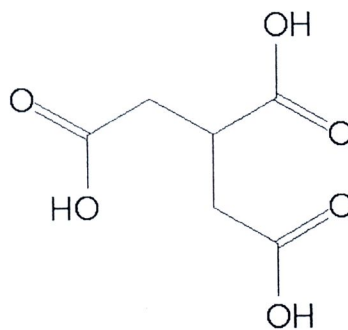
ประโยชน์ของสารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent or Blowing Agent)

- ลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

- ลดต้นทุนการผลิต
- ใช้วัตถุดิบลดลง
- ยกระดับคุณสมบัติทางกายภาพ
- เพิ่มอัตราส่วน ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น

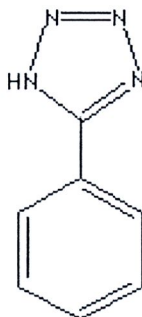
2.1.7.2 Hydrocerol HK 40B [23]

Hydrocerol HK 40B หรือชื่อทางเคมีคือ 1,2,3-Propanetricarboxylic acid เป็น Additive Masterbatch ของ foaming agent มีลักษณะเป็นเม็ดกลมแบน สีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร หนาประมาณ 1-1.3 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 154°C - 159°C และมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 220°C - 230°C 245°C และเมื่อเกิดการสลายตัวจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา มักนำไปใช้กับใช้กับ Thermoplastic หรือ resin ต่างๆ เช่น พอลิคาร์บอเนต, พอลิเอไมด์, ไนลอน และ PET เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงาน เพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิต และได้ชิ้นงานที่แข็งแรง โดยสูตรโครงสร้างของ Hydrocerol HK 40B เป็นไปดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงสูตรโครงสร้างของ Hydrocerol HK 40B [23]

2.1.7.3 5-Phenyl-1H-tetrazoles [24, 25]



ภาพที่ 12 แสดงสูตร โครงสร้างของ 5-Phenyl-1H-tetrazoles [25]

- สูตรทางเคมี: $C_7H_6N_4$
- น้ำหนักโมเลกุล: 146.15
- ลักษณะทางกายภาพ: ผงสีขาว
- การปลดปล่อยแก๊สหลังจากการสลายตัว: 180 ml/g

5-Phenyl-1H-tetrazoles โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นผลึกเล็กๆหรือผง มีสีขาว มีกลิ่นฉุนเล็กน้อย สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 156°C โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ $234^{\circ}\text{C} - 245^{\circ}\text{C}$ และเมื่อเกิดการสลายตัวจะปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกมา เป็นสารอนุพันธ์ที่มักใช้งานทางด้านที่เกี่ยวข้องกับชีววิทยา เช่น ด้านไวรัส ด้านแบคทีเรีย รักษาวัณโรค และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ phosphonates

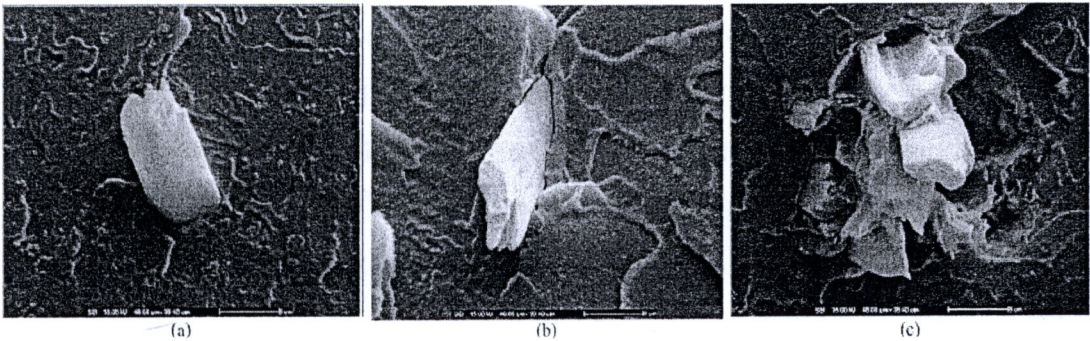
5-Phenyl-1H-tetrazoles จัดเป็นสารประกอบจำพวก organic heterocyclic ซึ่งประกอบด้วยวงเบนซีนและวงแหวนห้าเหลี่ยมที่มีต่ออะตอมของ N อยู่ 4 อะตอมและ C อีก 1 อะตอม จัดเป็นสารจำพวก tetrazole มักถูกใช้เป็นสารทำให้เกิดฟองในพลาสติกที่กระบวนการขึ้นรูปจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงจำพวก polycarbonate (PC), polyamides, fluoro plastics, polyesters, polyphenylene oxides, nylons และ PET

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Mubarak A. และคณะ [26] ที่ทำการศึกษาผลของสารประสานที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ γ - aminopropyl trimethoxy silane(Z-6011), N- (β - aminoethyl)- γ

aminopropyl trimethoxy silane (Z-6020), γ - methacrylate propyl trimethoxy silane (Z-6030), 3 - glycidoxypopyl trimethoxy silane (Z-6040) และ vinyl trimethoxy silane (Q9-6300) ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล และโครงสร้างของคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับ jute ซึ่งได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ของ jute fiber โดยใช้สารประสาน ที่มีหมู่ function ที่ต่างกัน แล้วดูการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของ jute fiber กับ พอลิคาร์บอเนต โดยวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับ jute นั้นจะถูกเตรียมโดยใช้วิธี compression molding จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ XPS, FTIR, ESEM, DSC, dynamic mechanical analysis (DMA) และทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่าไซเลน ชนิด Z-6011 สามารถปรับปรุงพื้นผิวได้ดีที่สุด เนื่องจากได้แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับพอลิคาร์บอเนตได้ดี ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลก็มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้สารประสานตัวอื่นๆ จากผลของการทดสอบโดยใช้เทคนิค XPS และ FTIR นั้น แสดงให้เห็นว่าสารประสานเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด พันธะระหว่างพื้นผิวของ jute fiber กับ พอลิคาร์บอเนต โดยเทคนิค DSC ยังบ่งชี้ว่า T_m จะเพิ่มขึ้นในกรณีของ fiber ที่ปรับปรุงผิวด้วยสารประสาน ซึ่ง Z-6011 กับ Z-6020 นั้นมีการเพิ่มขึ้นของ T_m สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารประสานตัวอื่นๆ และจากการเปรียบเทียบเส้นใย ที่ปรับปรุงผิวด้วยสารประสานชนิด Z-6011 และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน พบว่าเส้นใยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน ค่า Storage และ loss moduli mechanical properties จะเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยของ P. Threepopnatkul และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไซเคียมไฮดรอกไซด์ และสารประสาน 2 ชนิด ได้แก่ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) และ γ -methacryloxy propyl trimethoxy silane (Z-6030) ที่มีต่อการปรับปรุงพื้นผิวของในคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสับปะรด จากการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่า Young's modulus และค่า tensile strength มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่า elongation at break และ impact strength มีค่าลดลง โดยคอมโพสิตที่เส้นใยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน ชนิด Z-6011 จะมีค่า tensile strength และ impact strength สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงโดยใช้สารชนิดอื่น สาเหตุก็เนื่องมาจากโครงสร้างของเส้นใยที่สามารถยึดเกาะกับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารชนิดอื่น ซึ่งสามารถดูได้จาก SEM micrograph ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 13 แสดง SEM micrograph ของ (a) NaOH treated, (b) Z-6011 treated and (c) Z-6030 treated PALF/PC composites [16]

M. Abdelmouleh และคณะ [28] ได้ศึกษาการปรับปรุงเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้สารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆกัน ได้แก่ γ -Methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPS) γ -Aminopropyltriethoxysilane (APS) Hexadecyltrimethoxysilane (HDS) และ γ -Mercaptopropyltrimethoxysilane (MRPS) ในตัวกลางเอทานอล/น้ำ ให้ความร้อนและพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นใยที่มีการปรับปรุงด้วยเทคนิค diffuse reflectance infrared spectroscopy (DRIFT) พบว่ามีการเกิดขึ้นของพันธะ Si-O-Cellulose และ Si-O-Si บนพื้นผิวของเซลลูโลส และยืนยันสมบัติที่ผิวหน้าของด้วยการวัดมุมสัมผัส และวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีพบว่าเกิดพันธะอย่างต่อเนื่องทั้งกับเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์

Zita Dominkovics และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ที่ถูกใช้ในการเสริมแรง polypropylene composite ซึ่งได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้โดยการให้เกิดปฏิกิริยา benzylation กับตัวโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลส ทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่ benzene ring (aromatic ring) ณ หมู่ hydroxyl ของเซลลูโลสในผงไม้ จากนั้นก็จะนำไปผสมกับ polypropylene ขึ้นรูปเป็น composites และนำไปผ่านการทดสอบเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่า อนุภาคของผงไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว จะมีส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกับเมทริกซ์จะก่อตัวเป็นช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของความ stiffness ในโครงสร้างของคอมโพสิต ซึ่งช่องว่างเล็กๆที่เกิดขึ้นอาจรวมตัวเกิดเป็นช่องว่างที่ใหญ่ขึ้นและนำไปสู่การเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดลงของค่า strength และอาจเกิดการแตกหักของชิ้นงานได้

D. Rodrigue และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุโพลีคอมพอสิต HDPE/PP โดยทำการทดสอบสมบัติ Tensile, flexural และ torsion ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Specific flexural complex modulus ของวัสดุโพลีคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยไม้ลงในคอมพอสิต ส่วนค่า Specific tensile modulus ของวัสดุโพลีคอมพอสิตก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่า Specific flexural complex modulus ทั้งนี้ก็เนื่องจากเฟสของเส้นใยไม้ที่มีความ stiff มากกว่าพอลิเมอร์เมตริกซ์นั่นเอง นอกจากนี้ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ค่า specific shear complex modulus มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ในคอมพอสิตกลับส่งผลให้ค่า elongation at break ของวัสดุโพลีคอมพอสิตมีค่าลดลง

Cheng Xiong และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/ผงซีลีเนียม (HDPE/WF) เตรียมจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยการศึกษาอิทธิพลของผงซีลีเนียม สารคู่ควบไซเลน 4 ชนิดได้แก่ vinyltrimethoxysilane (vinyl silane), γ -aminopropyltriethoxysilane (amino silane), γ -glycid oxypropyltrimethoxysilane (epoxy silane) และ γ -ethacryloxypropyltrimethoxysilane (allyl ester silane) นอกจากนี้ยังมีสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในปริมาณต่าง ๆ กัน ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเสริมองค์ประกอบผงซีลีเนียม/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลว และโครงสร้างเชิงจุลภาค ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้งสารคู่ควบไซเลน และพอลิเมอร์เสริมสภาพเข้ากันได้ สามารถช่วยเพิ่มการยึดติดที่ส่วนต่อประสานระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และช่วยเพิ่มสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผงซีลีเนียม/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เมื่อพิจารณาสารคู่ควบไซเลนทั้ง 4 ชนิดพบว่า เมื่อใช้ อีพอกซีไซเลนในวัสดุเสริมองค์ประกอบ ทำให้มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากวงแหวนออกซิเจนมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนได้ดีที่สุดทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าสารคู่ควบอื่นๆ รองลงมาคืออะมิโนไซเลน สำหรับหมู่วินิลในไวนิลไซเลนเนื่องจากมีสายโซ่ที่สั้นกว่าจึงทำให้ยึดติดได้ดีกว่าอัลลิลเอสเทอร์ไซเลน จากการศึกษาความต้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีความต้านแรงดึงสูง (ความต้านแรงดึงเท่ากับ 51.03 เมกะปาสคาล) และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อน อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลีเนียม

Andrzej K. Bledzki และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาถึงผลของชนิดของ Chemical foaming agent และผลของสารก่อกวนโซ่ที่มียอดสมบัติเชิงกลของ wood fibre-PP microfoamed composites ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ injection molding ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Chemical foaming agent ที่เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแบบคายความร้อน จะทำให้ได้คอมพอสิตที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ chemical foaming agent ชนิดดูดความร้อน และชนิดที่ทั้งดูดและคายความร้อน โดยชนิดของ chemical foaming agent ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ได้โครงสร้างของเซลล์โฟมรวมถึงการกระจายตัวที่แตกต่างกันด้วย ในขณะที่ค่า strength ของวัสดุทั้ง specific tensile strength และ specific flexural strength ของโฟมคอมพอสิตที่ได้มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Rajlakshmi Nayak และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาผลของการนำความร้อนของคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยอนุภาค โดยใช้วิธีการคำนวณและวิธีการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค finite element method (FEM) มาใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยไม้สน และนำผลที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้มาจากการทดสอบ โดยการใช้วิธี heat flow meter test โดยคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยไม้สนนี้จะถูกสร้างขึ้นโดยวิธี layup ด้วยมือ และจากการทดลองพบว่าผงซีลี้อยไม้สนจะไปลดความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีเรซิน และจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนของอีพอกซี โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยไม้ลงไป 6.5 vol.% จะไปลดความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีลง 19.8% และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงซีลี้อยไม้สนเป็น 36% ความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีจะลดลง 57.3% ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากวิธี FEM มีค่าสอดคล้องกันกับผลการทดสอบโดยการใช้วิธี heat flow meter test

จากงานวิจัยของ W. Yamsaengsung และ N. Sombatsompop [34] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสารทำให้เกิดฟอง(chemical blowing agent) ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโฟม EPDM และค่า peel strength รวมถึงสมบัติการนำความร้อนของลามิเนตของผงซีลี้อยไม้/ยางธรรมชาติ(NR) คอมพอสิต และยางเอทิลีน-โพรพิลีน ไดอีน(EPDM)โฟม โดยลามิเนตของผงซีลี้อยไม้/ยางธรรมชาติ(NR) คอมพอสิต และยางเอทิลีน-โพรพิลีน ไดอีน(EPDM)โฟม จะถูกเตรียมด้วยวิธี compression molding โดยใช้ 4,4'-oxybis(benzenesulfonylhydrazide) (OBSH) blowing agent ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ OBSH บริสุทธิ์และ OBSH ที่มีเอทิลีน-โพรพิลีนอยู่(EPR-*b*-OBSH) โดยผลของความเข้มข้นของ OBSH ต่อโครงสร้างเซลล์และสมบัติเชิงกลของโฟม EPDM ลามิเนต

จะถูกทดสอบ และจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า EPR-*b*-OBSH จะทำให้โฟม EPDM มีจำนวนโครงสร้างของเซลล์ที่มากกว่า การกระจายตัวของเซลล์ดีกว่าและเป็นแบบแผนมากกว่า และมีจำนวนรูพรุนที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม EPDM ที่มี EPR-*b*-OBSH มีคุณสมบัติการคืนกลับของ elastic แต่มีความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำที่พื้นผิวของโฟมที่ดีกว่า OBSH ส่วนค่า peel strength นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ blowing agent ทั้งสองชนิดลงไปในช่วงแรก เนื่องจาก blowing agent ที่ใส่เข้าไปจะไปช่วยเพิ่มการยึดติดกันที่พื้นผิวของยางทั้งสองชนิด ซึ่งจะช่วยให้ระดับการเกี่ยวพันกันของโมเลกุลที่บริเวณพื้นผิวนี้นี้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ blowing agent จนถึง 3 phr ค่า peel strength จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ นอกจากนี้ในแง่ของความสามารถในการนำความร้อนนั้นการใส่ blowing agent ทั้งสองชนิดลงไปจะทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของ EPDM แ่ลง เนื่องจากโครงสร้างความเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการใช้ blowing agent

จาก patent ของ Frank N. Liberti และคณะ [35] ได้เปิดเผยถึงข้อมูลของการขึ้นรูป Polycarbonate Resin Foam โดยมีการใช้สารประกอบ epoxy ผสมลงในพอลิคาร์บอเนต ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดหรือกำจัดความชื้นในกระบวนการขึ้นรูปโฟมจากพอลิคาร์บอเนต เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโฟมจากพอลิคาร์บอเนตมักประสบปัญหาในเรื่องของความชื้น ซึ่งเป็นตัวที่ส่งผลให้ชิ้นงานจากโฟมพอลิคาร์บอเนตมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง โดยในการทดลองมีการใช้ epoxy ที่ผ่านการทำ functionalized แล้ว ในปริมาณ 0.2% - 1.0% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต โดยในการทดลองยังมีการใส่เส้นใยแก้วเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้อธิบายถึง blowing agent ที่เป็นของแข็งไว้ว่า เมื่อ blowing agent เกิดการสลายตัวจะต้องมีการปลดปล่อยก๊าซจำพวก ammonium หรือ azo ออกมา ซึ่งได้ยกตัวอย่างไว้ เช่น ammonium bicarbonate, diazoaminotoluene, azodicarbonamide แต่ในการทดลองนี้จะใช้ 5-phenyl tetrazole เป็น blowing agent ซึ่งจะทำการผสมในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของพอลิคาร์บอเนตถูกลดลงจนเหลือเพียงประมาณ 0.02% โดยน้ำหนัก และปริมาณ epoxy ที่เพิ่มขึ้นยังมีส่วนช่วยให้ค่า Izod impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย