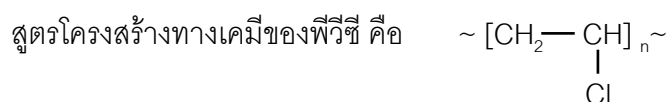


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พีวีซี (Polyvinyl (Chloride); PVC)

พีวีซีหรือพอลิไวนิลคลอไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบ ออสันฐาน(Amorphous) มีสมบัติอยู่ในช่วงกว้างซึ่งขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ประกอบอยู่ในสูตรของ สารคอมพาวด์จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีสามารถถูกนำไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย



การจัดเรียงตัวของหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ส่วนใหญ่จะเชื่อมต่อกันแบบหัวต่อหาง (Head-to-Tail) และมีการจัดเรียงตัวภายในสายโซ่ส่วนใหญ่เป็นแบบ อะแทคติก (Atactic) คือ หมู่แทนที่จะกระจายตัวอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของระนาบแบบคละกัน

ข้อดี : ราคาถูก น้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่ไหม้หรือลุกติดไฟ เนื่องจากมีอะตอมคลอรีนในโมเลกุล เมื่อติดไฟสามารถดับได้ด้วยตนเอง มีควันเล็กน้อย ไม่ดูดกลืนน้ำ ใสไม่มีสี ความหนาแน่น 1.4 g/m^3 อุณหภูมิเริ่มอ่อนตัวประมาณ 80°C และทนทานต่อสารเคมี (High chemical resistance) เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80°C

ข้อเสีย : เปราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่ทนสภาวะอากาศ ความร้อน และแสง UV

2.1.1 ประเภทของพีวีซีและการสังเคราะห์

พีวีซี สามารถแบ่งประเภทตามปริมาณสารพลาสติกไซเซอร์ ได้ดังนี้

- พีวีซีชนิดอ่อน คือ พีวีซีที่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticised PVC)
- พีวีซีชนิดแข็ง คือ พีวีซีที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Unplasticised PVC, uPVC)

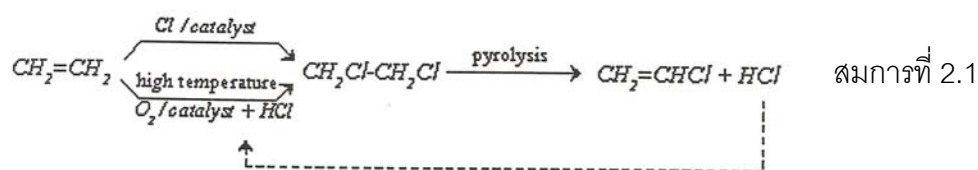
2.1.1.1 การผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์

การผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ สามารถทำได้ 2 วิธี

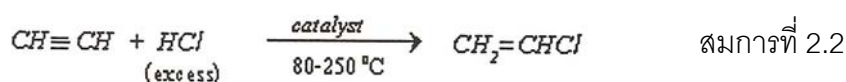
1. กระบวนการผลิตโดยใช้เอทิลีนเป็นสารตั้งต้น (Ethylene route)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง เรียกกระบวนการนี้ว่า Balanced process จากสมการที่ 2.1 เอทิลีนจะเกิดปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (Chlorination reaction)

และปฏิกิริยาออกซีคลอรีเนชัน (Oxychlorination reaction) ร่วมกันทำให้เกิดไดคลอโรอีเทน (Dichloroethane) หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการไพโรไลติกดีไฮโดรคลอรีน (Pyrolyticdehydrochlorination) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนเพื่อให้กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) กรดไฮโดรคลอริกที่ได้จะถูกกลั่นนำมาใช้ใหม่ในขั้นตอนออกซีคลอรีน เปลี่ยนเอทิลีนไปเป็นไดคลอโรอีเทน ต่อไป



2. กระบวนการผลิตโดยใช้เอเซททีลีนเป็นสารตั้งต้น(Acetylene route)



กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกทำให้อะเซททีลีนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination reaction) ดังสมการที่ 2.2 (Titow, 1990)

2.1.1.2 กระบวนการสังเคราะห์พีวีซี

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์พีวีซี ประกอบด้วย 3 วิธี

1. การพอลิเมอไรเซชันแบบสารแขวนลอย (Suspension polymerization) เป็นผงสีขาวและมีขนาดอนุภาคประมาณ 125 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าการกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน มีรูปทรงสูงทำให้ดูดซับพลาสติกไซเซอร์ได้ดีมีลักษณะเป็นก้อน พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้ มีสัดส่วน 80% ใช้สำหรับงานทำท่อ กรอบประตูหน้าต่าง และงานที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

2. การพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) เป็นผงเนื้อละเอียดและมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.2-1.5 ไมโครเมตร มีรูปทรงต่ำทำให้ดูดซับพลาสติกไซเซอร์ได้น้อย พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้มีอยู่ ประมาณ 10-15% เหมาะสำหรับงานทำหนังเทียม กระเบื้องยาง ถุงมือ

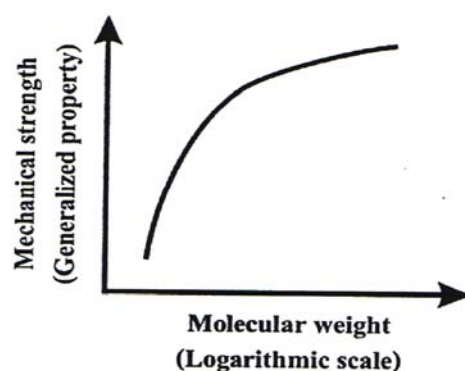
3. การพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization or mass polymerization) เป็นของเหลวใสบริสุทธิ์ น้ำหนักโมเลกุลสูง ผิวแข็งมีความหนาแน่นสูงทำให้สามารถดูดซับสารเติม แต่งไม่ดี พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้มีอยู่ ประมาณ 10% เหมาะสำหรับงานที่ต้องสัมผัสกับอาหารเนื่องจากพีวีซีที่ได้มีความบริสุทธิ์ (Titow, 1990 และ Nicholas, 1989)

2.2 สมบัติของพีวีซี โดยทั่วไป

พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่เมื่อนำมาใช้ผลิตต้องผสมด้วยสารอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น ทั้งในขณะทำการผลิตและนำไปใช้งาน พีวีซีถูกนำมาใช้งานในสองลักษณะคือ พีวีซีแข็ง (Rigid PVC) และพีวีซีนิ่ม (Flexible PVC) ทำให้พีวีซีมีสมบัติที่หลากหลาย โดยขอกล่าวถึงสมบัติของพีวีซีในแต่ละด้านดังนี้

2.2.1 สมบัติทางกล

พีวีซีที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ จะมีความแข็งแรงสูง มีความเปราะ (Brittle) เพราะการใช้งานจะทำให้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) ของพีวีซี คือ 80-84 องศาเซลเซียส โครงสร้างส่วนใหญ่ที่เป็นออสซิลลูชันของพีวีซี มีการพันกันอย่างไม่เป็นระเบียบ สมบัติเชิงกลของพีวีซีขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล สารเพิ่มความอ่อนตัว (Plasticizer) ระดับการหลอมตัวและผลของการบ่ม (Annealing) จากภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติทางกลของพีวีซี พบว่าน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมบัติทางกลมีค่ามากกว่าหรือมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่จากกราฟพบว่าผลของน้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อสมบัติทางกลอย่างมากในช่วงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแต่เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลสูงพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสมบัติทางกล ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำหนักโมเลกุลที่มากขึ้นมีผลทำให้พีวีซีไหลได้ยากขึ้นความสามารถขึ้นรูปจึงลดลง พีวีซี สามารถเกิดการสลายตัวทางความร้อนมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติทางกลลดลง ดังนั้นในการเลือกพีวีซีมาผลิตชิ้นงานจึงควรเลือกพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมโดยต้องคำนึง ให้มีสมบัติอยู่ระหว่างสมบัติทางกลและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี



ภาพที่ 2.1

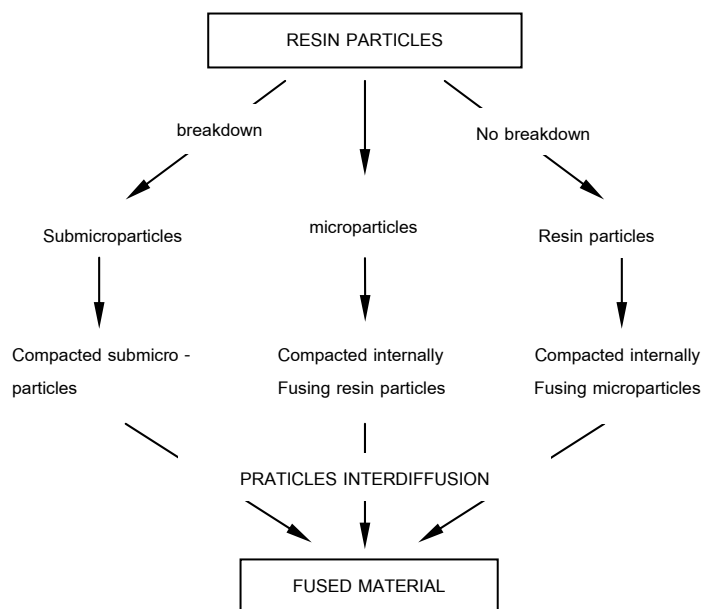
ผลของน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกล (Nass, 1986)

ส่วนการเติมพลาสติกไซเซอรลงในพีวีซีมีผลทำให้พีวีซีมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้าย แก้วลดลง และเปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่แข็ง และมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกลายเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวมีความสามารถในการยืดตัวสูงขึ้น แต่มีความทนแรงดึงต่ำกว่า ดังนั้นการนำพลาสติกไซเซอรมาใช้ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จะช่วยปรับปรุงสมบัติในการไหลตัวของพีวีซีให้ดีขึ้น ทำให้สามารถนำพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ตัวแปรตัวหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของพีวีซีอย่างมาก คือ ดัชนีการหลอมตัวของพีวีซี Gothan และ Hitch ได้ทำการศึกษาความต้านทานต่อการล้าของพีวีซีที่หลอมตัวเข้ากันดีเปรียบเทียบกับพีวีซีที่หลอมตัวได้ไม่ดี พบว่าพีวีซีที่หลอมตัวดีมีความสามารถในการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร (Cycle) ได้ดีขึ้น Menges และ Borndsten ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับความทนแรงกระแทกของพีวีซีที่มีการใช้พอลิเอทิลีน/พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyethylene, PE/Polyvinyl acetate, EVA) เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส มีสมบัติความทนแรงกระแทกมากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิ 180 และ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอนุภาคปฐมภูมิ (Primary particle) ของพีวีซีสามารถหลอมรวมเข้ากับพอลิเอทิลีน / พอลิไวนิลอะซิเตต ได้ดีกว่า ส่วนผลของการบ่มชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพีวีซีทั้งกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เช่นในงานวิจัยของ Shinosaki และคณะ พบว่าการบ่มชิ้นงานพีวีซีที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว) เป็นเวลา 20 นาทีมีผลทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น 15% และความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง 40% ทั้งนี้เป็นเพราะการบ่มมีผลทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่วนงานวิจัยของ Illers ได้รายงานผลของการนำชิ้นงานพีวีซีไปบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน มีผลทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเกือบ 400% จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของพีวีซี คือ น้ำหนักโมเลกุลของพีวีซี สารเติมแต่งที่มีอยู่ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์ และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป (Nass, 1986)

2.2.2 สมบัติทางความร้อน

สำหรับสมบัติทางความร้อนของพีวีซีในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะประกอบไปด้วย กลไกการหลอมรวมตัว (Gelation) และการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี (Thermal degradation)

1. กลไกการหลอมตัวของพีวีซี



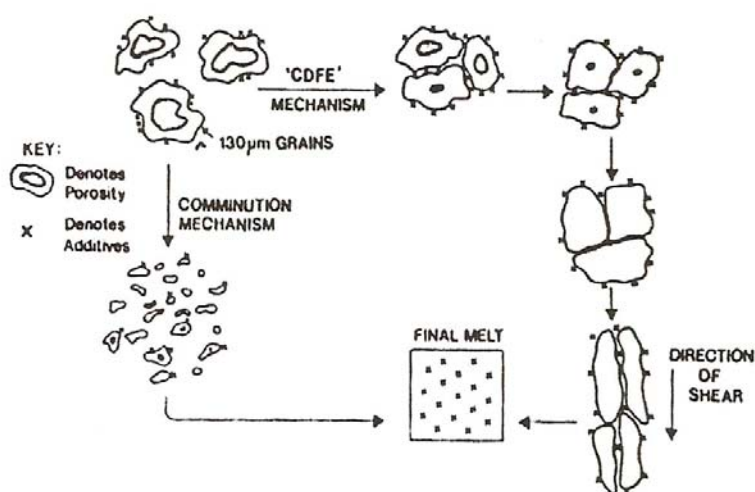
ภาพที่ 2.2

แผนผังแสดงกลไกการหลอมรวมตัวหรือการเกิดเจลของพีวีซี (Krzewki, 1981)

จากภาพที่ 2.2 กลไกการหลอมตัวของพีวีซี สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) เมื่อพีวีซีเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปแล้ว กลไกการหลอมจะเริ่มจากการทำให้อนุภาคของพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคหยาบๆ และมีรูพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่ละเอียดมากขึ้น เรียกว่า Microparticles (Primary particle) ซึ่งมีขนาดประมาณ 1 ไมครอน หรืออาจแตกออกจนมีขนาดเล็กกว่านั้น คือ Submicroparticles (Domains) มีขนาดประมาณ 200 – 800 อังสตรอม การที่อนุภาคจะแตกออกจนมีขนาดเล็กลงแค่นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป แรงเฉือน ความดัน ประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่วนผสมของสารคอมพาวด์และสมบัติของเรซิน หลังจากอนุภาคแตกออกแล้วอนุภาคจะถูกกดอัดและเริ่มหลอมตัวเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายระหว่างขอบของอนุภาค (Sintering or interdiffusion) รอยต่อระหว่างอนุภาคจะไม่ปรากฏถ้าการหลอมตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Krzewki, 1981) ประเภทของเครื่องจักรที่ทำให้อนุภาคเกิดการลดขนาดก่อนแล้วจึงเกิดการหลอมตัว คือ Banbury Mixer และ Brabender Plasticoder การที่มันทำให้อนุภาคเกิดการลดขนาดก่อนนั้นจะส่งผลทำให้สารเติมแต่งมีการกระจายตัวได้ดี ทำให้สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) สามารถกระจายตัวได้ดี (Allsopp, 1982)

2) อนุภาคของพีวีซีจะไม่เกิดการแตกออกของอนุภาคเมื่อพีวีซีเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป แต่อนุภาคจะผ่านเข้าสู่กลไกการหลอมตัว ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการกดอัด (Compaction) การทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น (Densification) การหลอมตัว (Fusion) และการยืดตัวออกของเกรนหรืออนุภาค (Elongation) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เกรนจะถูกทำให้มีรูพรุนลดลง หลังจากนั้นเกรนถูกทำให้ยืดตัวออกตามทิศทางแรงเฉือน และหลอมตัว กลไกการหลอมตัวของพีวีซีในรูปแบบนี้จะเกิดในเครื่องรีดแบบเกลียวหนวนคู่ Two roll mill และเครื่องอัดขึ้นรูปแบบใช้แม่พิมพ์ ในช่วงการทำให้ความหนาแน่นมากขึ้นการกระจายตัวของสารเติมแต่งยังไม่มีดีพอ สารเติมแต่งจะอยู่บริเวณของขอบเกรนทำให้บริเวณตรงกลางของเกรนพีวีซีเกิดการสลายตัว แต่เมื่อเกรนมีการยืดตัวออกจากการกระจายตัวของสารเติมแต่งจะดีขึ้น (Allsopp, 1982 และ Owen, 1984)



ภาพที่ 2.3

กลไกการหลอมตัวของพีวีซีในระหว่างการขึ้นรูป (Allsopp, 1982)

2. การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี

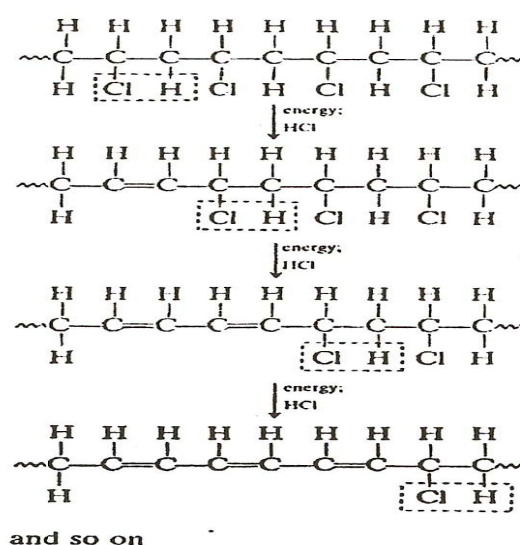
ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยปกติแล้วพีวีซีนั่นไม่เสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากพลังงานจำเพาะ (Specific energy) ที่ใช้ในการทำให้พีวีซีหลอมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมลและ 25.9 กิโลแคลอรีต่อโมล ด้วยเหตุนี้ในการขึ้นรูปพีวีซีจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในพีวีซีด้วยการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันและการเปลี่ยนแปลงสี (Dehydrochlorination and colour development)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงปานกลาง (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริกขึ้น กรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดเร็วขึ้น คือมันทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Auto-catalyst) เช่นเดียวกับกรดตัวอื่นๆ พีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่ผิดปกติในพอลิเมอร์ซึ่งพวกมันทำหน้าที่กระตุ้นให้พันธะระหว่างคลอรีนและคาร์บอนสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่

(Labile structure) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการดีไฮโดรคลอรีนชั่น โครงสร้างที่ผิปกติ เช่น ส่วนที่หลุดจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปลายสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว พันธะไม่อิ่มตัวภายในสายโซ่ กิ่งก้านของสายโซ่โครงสร้างที่มีต่อกันแบบหัวต่อหัวและโครงสร้างที่เกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดดีไฮโดรคลอรีนชั่น คือคลอรีนที่ทำพันธะกับคาร์บอนที่เป็นส่วนของกิ่ง

(Tertiary chlorine) ประมาณ 70 – 80% และกรณีคลอรีนที่อยูใกล้ตำแหน่งของพันธะคู่ภายในสายโซ่

(Internal allylic chlorine) อีกประมาณ 10 -15% ส่วนกรณีที่โมโนเมอร์ต่อกันด้วยรูปแบบปกติการเกิดดีไฮโดรคลอรีนชั้นเริ่มต้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยเกิดขึ้นในแบบสุ่ม (Random) พันธะคู่แบบ Conjugated หรือ Polyene sequence ถูกสร้างขึ้นภายในสายโซ่ของพีวีซี ขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนและคลอรีนหลุดออกจากโซ่ หรือ เรียกว่า Unzipped ผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปถูกแสดงในภาพที่ 2.4

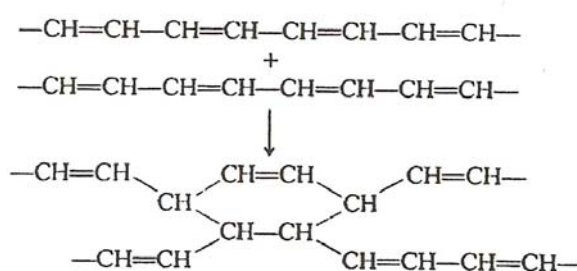


ภาพที่ 2.4

แผนผังแสดงการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน (Owen, 1984)

ผลของการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซีที่มีต่อสมบัติอื่นๆ

สมบัติที่ด้อยลงของพีวีซีส่วนใหญ่เกิดมาจากการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี นอกจากเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันซึ่งทำให้เกิดพอลิอินแล้วพีวีซีสามารถเกิดการแตกของสายโซ่ (Chainscission) การเกิดออกซิเดชัน ณ ตำแหน่งที่มีความอ่อนแอในสายโซ่พันธะคู่ พันธะที่ถูกทำให้แตกออกและตำแหน่งที่ถูกกระตุ้น การเชื่อมโยงกันด้วยพันธะทำให้เกิดเป็นเจลและการเกิดวงแหวน (Cyclisation) กลไกที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง Polyene sequence ของสายโซ่ที่อยู่ใกล้กัน เรียกว่า Diels – Alder reaction ดังแสดงในภาพที่ 2.5 การเกิดวงแหวนนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในสายโซ่มากกว่าระหว่างสายโซ่ กลไกการเกิดวงแหวนในระหว่างการสลายตัวด้วยความร้อนของพีวีซีเกิดขึ้นที่พอลิอิน ณ ตำแหน่งปลายของสายโซ่พีวีซี ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เบนซีนและไซโคเฮกซะไดอิน เนื่องจากการเกิดวงแหวนเกิดที่ปลายของสายโซ่ ดังนั้นปริมาณของเบนซีน จึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซี (Titow, 1990; Owen, 1984)



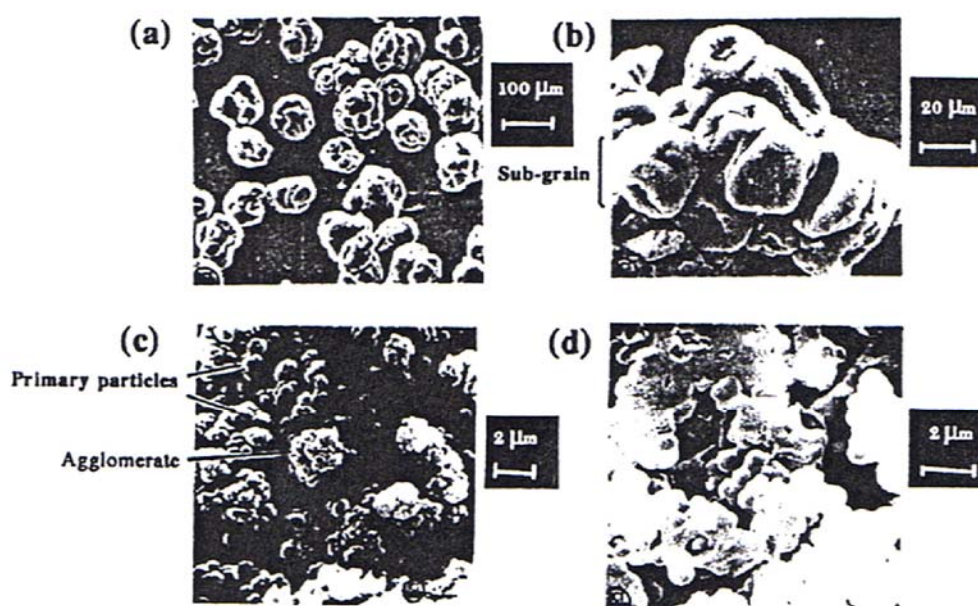
ภาพที่ 2.5

กลไกการเกิดการเชื่อมโยงระหว่าง Polyene sequence
ของปฏิกิริยา Diels – Alder (Owen, 1984)

2.2.3 สมบัติทางกายภาพ

ในที่นี้กล่าวถึงเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างของอนุภาคพีวีซีและความหนาแน่นรูปร่างของอนุภาคพีวีซีที่ได้จากการสังเคราะห์ ดังแสดงรูปที่ 2.6 พบว่า การจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของพีวีซีเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปเล็ก เป็นดังนี้ Grains → Sub-grains → Agglomerate → primary particle → Micro domains รูปร่างของอนุภาคพีวีซี ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยกระบวนการที่ใช้ในการสังเคราะห์ประกอบด้วย 4 วิธีหลักๆ คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบสารแขวนลอย กระบวนการแบบอิมัลชัน กระบวนการแบบบัลด์ และกระบวนการ

แบบสารละลาย รูปร่างของอนุภาคพีวีซีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในระดับ Macro – morphology (ขนาดของกลุ่มก้อนพีวีซีรวมตัวกันที่มีขนาดมากกว่า 10 ไมครอน) แต่เริ่มมีรูปร่างที่คล้ายคลึงกันมากขึ้นเมื่อมีขนาดอยู่ในระดับ Micro – structure (ขนาดอยู่ในช่วง 10 – 0.1 ไมครอน) และมีลักษณะคล้ายคลึงกันอย่างชัดเจนในระดับ Sub – micron (มีขนาดต่ำกว่า 0.1 ไมครอน) ในทางการค้าพีวีซีส่วนใหญ่สังเคราะห์มาจากระบวนการแบบสารแขวนลอย และรูปร่างของพีวีซีในระดับ Macro – morphology ที่ได้จากระบวนการนี้มีรูปร่างที่มีความหลากหลายมากกว่าการเตรียมด้วยกระบวนการอื่น



- (a) Grains
- (b) Sub-Grains
- (c) Primary Particles
- (d) Agglomerates

ภาพที่ 2.6

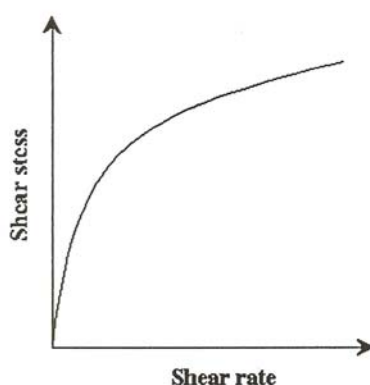
รูปร่างลักษณะของพีวีซีในระดับขนาดต่างๆ (Allsopp, 1982)

พีวีซีที่ใช้ในทางการค้าส่วนใหญ่ผลิตจาก การหยดโมโนเมอร์ที่มีเสถียรภาพปานกลาง ซึ่งอนุภาคของแกรนไม่สม่ำเสมอส่งผลให้มีขนาดที่หลากหลายและมีรูพรุนสูง เนื่องจากหยดโมโนเมอร์มีแรงตึงผิวต่ำและการกวาดด้วยความเร็วสูง ส่วนการผลิตเรซินสำหรับการใช้ในกรณีพิเศษจะ

ถูกผลิตด้วยวิธีที่ต่างกันออกไปคือ การหัดโมโนเมอร์ที่มีเสถียรภาพในการแขวนลอยตลอดกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้ อนุภาคพีวีซีที่ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลม Sub-Grains มีขนาดละเอียด และมีรูพรุน (Porosity) และอนุภาคมีความหนาแน่นสูง เนื่องมาจากหัดโมโนเมอร์มีแรงดึงดูดปานกลางและมีการกว่นต่ำ จะเห็นว่าอุณหภูมิและระดับการกว่นมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของเกรน ความเร็วในการกว่นต่ำไป มีผลให้โครงสร้างของเกรนมีความหนาแน่นมากไปเป็นเกรนที่มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็นตัวทำหน้าที่ควบคุมน้ำหนักโมเลกุล (อุณหภูมิสูง น้ำหนักโมเลกุลลดลง) และโครงสร้างของเกรนโดยถ้าสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกรนมีรูพรุนลดลง นอกจากนั้นสมบัติต่างๆ ของพีวีซีบางส่วนได้รับอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพีวีซีในระดับโครงสร้างจุลภาค เช่น พื้นที่ผิว รูพรุน ความสามารถในการดูดซับ พลาสติไซเซอร์ การหลอมตัวหรือการเกิดเจลลันถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพีวีซีในระดับจุลภาค (Allsopp, 1982)

2.2.4 สมบัติการไหล

พีวีซีโดยปกติมีสมบัติการไหลในลักษณะเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป คือมีลักษณะการไหลแบบของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian fluids) ชนิดซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) ยกเว้นกรณีพีวีซีเจล (PVC Paste) มีสมบัติการไหลแบบของไหลไดลาแทน (Dilatant) ซึ่งของไหลในกลุ่มนี้เป็นของไหลที่มีความหนืดเฉือน (Shear viscosity) สูงขึ้นเมื่อมีอัตราการเฉือน (Shear rate) ของไหลซูโดพลาสติกมีค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน จากกราฟ ภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนลดลง (Nass, 1986)



ภาพที่ 2.7

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของ
ของไหลชนิดซูโดพลาสติก (Pseudo plastic fluids) (Titow, 1990)

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการไหลของพีวีซีมีอยู่หลายประการซึ่งเป็นผลมาจากสารเติมแต่งและกระบวนการขึ้นรูป เช่น กรณีการเติมสารหล่อลื่นภายใน ลงในพีวีซีคอมปาวด์จะช่วยปรับปรุงการไหลของพีวีซีหลอมให้ดีขึ้นโดยการทำให้ความหนืดลดลง ส่วนกรณีการเติมสารช่วยในการขึ้นรูป (Processing aids) และสารปรับปรุงแรงกระแทก ส่วนใหญ่แล้วจะทำให้ความหนืดของพีวีซีสูงขึ้น ยกเว้นกรณีของ Poly- α -methylstyrene (PAMS) เป็นสารช่วยในการขึ้นรูปทำให้ค่าความหนืดลดลง (Titow, 1990) พีวีซีที่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วจะมีความหนืดมากกว่าพีวีซีบริสุทธิ์ ทั้งนี้ในระหว่างการขึ้นรูปพีวีซีจะได้รับแรงเฉือน และความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดกลไกการหลอมตัวของพีวีซีขึ้นส่งผลทำให้พีวีซีที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วมีอนุภาพที่มีรูปทรงลดลงและเกิดการพันกันของสายโซ่ระหว่างอนุภาคขึ้น จึงทำให้มีแรงกระทำระหว่างกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพีวีซีบริสุทธิ์ (ศรินทร ทองแสง, 2543)

2.3 สารเติมแต่งของพีวีซี

ในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์พีวีซีสารเติมแต่งเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะว่าพีวีซีมีสมบัติการทนต่อความร้อนน้อย มีความหนืดสูง ดังนั้นจำเป็นต้องผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงพีวีซีและลดจุดด้อยของพีวีซีให้ลดลงที่สุด เพื่อสามารถนำไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ สารเติมแต่งที่สำคัญมีดังนี้

2.3.1 สารเพิ่มความเสถียรภาพ (Stabilizers)

ในการผลิตและการใช้งานพีวีซี ที่เป็นวัสดุที่ไวต่อความร้อนและสลายตัวด้วยแสง ซึ่งต่างกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ด้วยเหตุที่พีวีซีไม่มีเสถียรภาพต่อความร้อนส่งผลให้ใช้พลังงานที่ต่ำ เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี พลังงานที่ใช้ประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล ด้วยเหตุผลข้างต้น ทำให้พีวีซีไม่สามารถทำการผลิตด้วยความร้อนได้ถ้าปราศจากสารเพิ่มความเสถียรภาพ โดยตัวอย่างสารเพิ่มความเสถียรภาพ มีดังนี้

1. สารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer)

ทำหน้าที่ป้องกันการเสียสภาพ เนื่องจากความร้อนของพีวีซี โดยที่สารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อนต้องช่วยไม่ให้เกิดกระบวนการดีไฮโดรคลอรีเนชัน (Dehydrochlorination) หรือต่อต้านทานปฏิกิริยานี้ได้ โดยที่ไม่เกิดการสลายตัวจะเกิดต่อเนื่องขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถหยุดได้โดยโมเลกุลของสารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อนจะเข้าไปจับกับอะตอมของคลอรีน เพื่อหยุดการสลายตัว ป้องกันการเกิดพอลิอื่น ทำให้พอลิเมอร์ยังคงเสถียรภาพและไม่มีการเปลี่ยนสี สารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อนแบ่งได้หลายกลุ่ม เช่น

1.1 สารประกอบโลหะตะกั่ว (Lead compound) มีเสถียรภาพทางความร้อนดี เหมาะใช้ งานที่นำไปทำเป็นฉนวน แต่ไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใสและการนำไปใช้ งานที่สัมผัสกับอาหารหรือยาเพราะมีองค์ประกอบของโลหะหนัก สารประกอบโลหะตะกั่วมีราคา ถูกจึงนิยมนำมาใช้กับงานท่อ รางระบายน้ำ งาน ภายนอกอาคาร

1.2 สารประกอบอินทรีย์ดีบุก (Organotin stabilizer) เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทาง ความร้อนที่มีประสิทธิภาพมาก ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส มีราคาแพง แต่นิยมใช้ เพราะใช้ในปริมาณน้อยประมาณ 2 pph

1.3 สารประกอบโลหะอื่นๆ (Other Metal-Based stabilizers) ส่วนใหญ่จะเป็น สารในกลุ่ม Cadmium, Zine, Calcium, Aluminium ซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมการอัดรีดท่อขนาดเล็ก

2. สารเพิ่มความเสถียรภาพต่อแสง (Light stabilizer)

แสงอัลตราไวโอเลต (UV) ที่ส่องมายังพื้นโลกมีความยาวคลื่นในช่วง 280-400 นาโน เมตร แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 295 นาโนเมตรขึ้นไป สามารถทำให้เกิดการ สลายตัวของพีวีซีได้ โดยทั่วไปสารเพิ่มความเสถียรภาพต่อแสงจะใช้ปริมาณที่ไม่มากประมาณ 0.05-2 เปอร์เซ็นต์ และที่นิยมใช้สามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

2.1 Organic UV Absorber มีสมบัติในการดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตที่ทำให้ เกิดความเสียหายกับวัตถุ โดยจะดูดซับในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 280-400 นาโนเมตร ในทาง การค้า Organic UV Absorber ของ PVC จะเป็นสารจำพวก Modified benzophenones เช่น 2,2-dihydroxy benzophenone, benzotriazole derivative

2.2 Inorganic UV-Screening agents ตัวอย่างสารจำพวกนี้ได้แก่ Carbon black และ Titanium dioxide เป็นสีข้มที่สำคัญ นิยมใช้กันอย่างมากในพลาสติก เนื่องจากมี สมบัติเป็นสารเพิ่มความเสถียรภาพต่อแสงในพอลิเมอร์จำนวนมากรวมถึง PVC

2.3 Free radical scavenger การเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนและการ สลายตัวด้วยแสง สามารถยับยั้งและต้านทานได้ โดยการใส่สารเติมแต่งที่มีผลในการกำจัดอนุมูล อิสระ (Free radical) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสลายตัว ตัวอย่างเช่น ในพีวีซีจะใช้ Hindered-Phenol antioxidant เป็นต้น

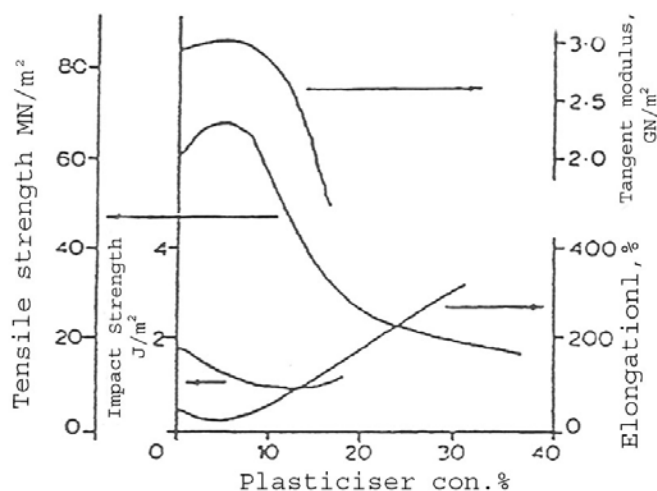
สารเพิ่มความเสถียรภาพที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์
- ราคาไม่แพง

- ควรมีเสถียรภาพต่อการเสื่อมสภาพชนิดต่างๆ เช่น ความร้อน แสง ความชื้น ออกซิเจน โอโซน กรด-เบสและเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น
- ไม่ควรระเหยง่าย ไม่มีกลิ่น และไม่ทำให้เกิดตำหนิแก่ผลิตภัณฑ์ หรือเกิดสีเมื่อผสมเข้ากับพอลิเมอร์
- ต้องสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์และต้องไม่เกิดการเคลื่อนย้ายออกมาที่ผิวของวัสดุ(Blooming)
- เมื่อผสมเข้ากับพอลิเมอร์แล้วจะต้องไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์และการประยุกต์ใช้งาน

2.3.2 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizers)

เป็นสารที่เติมลงในพีวีซี เพื่อลดสภาพความแข็ง ทำให้เกิดการอ่อนตัว ยืดหยุ่น และเพื่อเพิ่มความหลากหลายในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่น จะมีผลต่อการเพิ่มความยืดหยุ่น ลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และเพิ่มสมบัติด้านแรงกระแทก โดยทั่วไปสารเพิ่มความยืดหยุ่นจะเป็น Organic ester ที่มีจุดเดือดสูง และสารเพิ่มความยืดหยุ่นส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่ม Plathalic anhydride ที่มีหมู่แอลกอฮอล์ มีคาร์บอน 4-8 อะตอม (สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้งานจะมี 8 อะตอม) ปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ เพราะเมื่อเติมลงไปทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากขึ้น จึงมีผลต่อการลดความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และเพิ่มการยืดตัว (%Elongation) แต่ในแง่ของความต้านทานแรงกระแทก (Impect strength) ในช่วงแรกที่มีปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่ำ จะเข้าไปแทรกอยู่ในพื้นที่ว่าง (Free volume) ทำให้จำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง แต่เมื่อสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นเพราะ PVC มีสภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8

ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ต่อค่าความ
ต้านทานแรงกระแทก (Titow, 1990)

สมบัติของพลาสติกไซเซอร์ที่ควรพิจารณาสำหรับการนำไปใช้ คือความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ประสิทธิภาพ (Efficiency) ความถาวร (Permanence) และอายุการใช้งาน (Aging)

พลาสติกไซเซอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (Primary plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เติมในพอลิเมอร์โดยไม่ต้องใช้ร่วมกับพลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่นๆ เช่น

- Phthalates เช่น Di-octyl phthalate (DOP)
- Adipates เช่น Di-isooctyl adipate (DIOA)
- Azelates เช่น Di-octyl azelate (DOA)
- Trimellitates เช่น Tri-octyl trimellitate (TOTM)
- Sebacates เช่น Di-isooctyl sebacate (DIOS)

2. พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) มีราคาถูกกว่าพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ มักใช้คู่กับพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ เช่น

- Epoxydized soybean oil (EPO) ทำหน้าที่ทั้งเป็นพลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มเสถียรภาพ เป็นการนำน้ำมันพืชที่ไม่อิ่มตัวและกรดไขมัน (ถั่วเหลือง) มาเติมออกซิเจนทำให้รวมตัวกับพรีพอลิเมอร์ได้ดีและเมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวไปจับคลอรีนอะตอมที่หลุดจากพรีพอลิเมอร์

- Cereclor ® S52 เป็น Chlorinated hydrocarbon ซึ่งทำหน้าที่ทั้งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟและพลาสติกไฮเซออร์ สามารถรวมตัวกับพีวีซีได้ดี

เนื่องจากการขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซออร์ ดังนั้นการเลือกใช้ที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาปัจจัยต่อไปนี้

- ราคา
- ความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์
- ลักษณะเฉพาะในการขึ้นรูป
- สมบัติทางความร้อน ไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล
- ความทนทานต่อน้ำ เคมีภัณฑ์ สภาพอากาศ ฝุ่นและจุลินทรีย์
- ความเป็นพิษ
- ผลต่อสมบัติทางวิทยาระแส
- วิธีการขึ้นรูป
- สมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ (Titow, 1990)

2.3.3 สารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers)

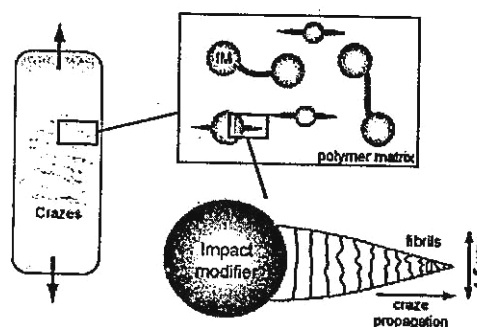
สารปรับปรุงแรงกระแทกมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ทำให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกของพีวีซีถูกปรับให้ดีขึ้นโดยการเติมยางลงไป ซึ่งยางที่เติมลงไปนั้นไม่สามารถเข้ากันได้กับพีวีซีเมทริกซ์ จึงพบว่า พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเป็นสองเฟส เมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทกในช่วงแรกเมทริกซ์จะดูดซับแรงเอาไว้หลังจากนั้นจึงส่งผ่านแรงไปยังเฟสของยาง ยางทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการกระแทกเอาไว้ทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะ

กลไกหลักที่ทำให้พอลิเมอร์มีความเหนียวมากขึ้นเมื่อเติมสารปรับปรุงแรงกระแทก มีอยู่ 3 กลไก ดังนี้

1. การเกิด Craze ในเนื้อเมทริกซ์ (Crazing)

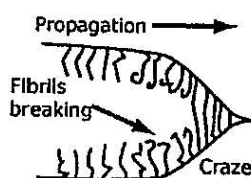
Craze คือรอยแตกร้าว (Crack) ชนิดหนึ่งที่มีไฟบริลของสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ถูกเรียงตัวเชื่อมโยงรอยแตกร้าว ดังภาพที่ 2.9 เมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทก ตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิด Craze คือ บริเวณใกล้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารปรับปรุงแรงกระแทก เนื่องจากตำแหน่งที่มีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุด และ Craze เริ่มแผ่ขยายขนาดไปจนกระทั่งถูกยับยั้งด้วยอนุภาคของสารปรับปรุงแรงกระแทกอนุภาคอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นอนุภาคของสารปรับปรุงแรงกระแทกจึงสามารถเป็นทั้งตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิด Craze และควบคุมการขยายของ Craze ช่วยทำให้

Craze ไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นรอยแตกร้าวที่แผ่ขยายขนาดด้วยการทำให้ไฟบริลเกิดการขาด ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2.10 ขนาดของอนุภาคของสารปรับปรุงแรงกระแทกหรืออนุภาคยางที่ทำให้ได้วัสดุมีความทนแรงกระแทกที่ดีควรมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของ Craze คือประมาณ 1-5 ไมครอน



ภาพที่ 2.9

กลไกการเกิด Craze ในพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารปรับปรุงแรงกระแทก

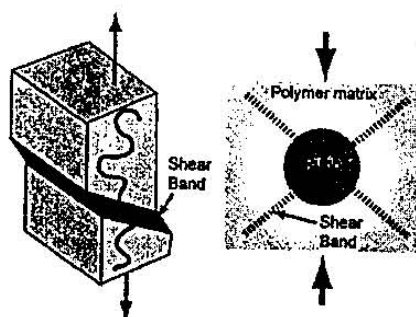


ภาพที่ 2.10

การเปลี่ยนรูปจาก Craze ไปเป็นรอยแตกร้าวที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

2. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเฉือน (Shear yielding)

การเติมสารปรับปรุงแรงกระแทกอาจทำให้วัสดุพอลิเมอร์มีความเหนียวมากขึ้นด้วยกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเฉือนซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพลาสติก คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่สามารถคืนกลับได้ ดังภาพที่ 2.11 กลไกนี้เป็นกลไกการดูดซับพลังงานการกระแทกที่มีประสิทธิภาพมาก และทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการแผ่ขยายของ Craze และ Crack ทำให้การแตกหักเกิดได้ช้าลง

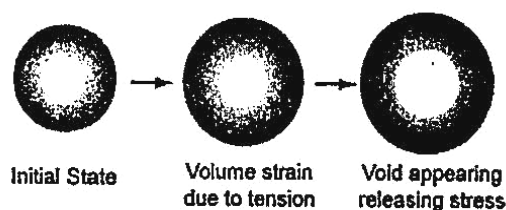


ภาพที่ 2.11

กลไกการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเฉือน

3. การเกิดช่องว่างขึ้นภายในอนุภาคของสารปรับปรุงแรงกระแทก (Cavitation)

สารปรับปรุงแรงกระแทกที่เป็นพวกลายอาจเกิดปรากฏการณ์เกิดช่องว่างหรือรูขึ้นบริเวณแกนกลางของอนุภาคยาง ดังภาพที่ 2.12 การเกิดช่องว่างขึ้นภายในอนุภาคยาง มีส่วนช่วยในการปลดปล่อยความเค้น โดยการสร้างพื้นผิวใหม่ขึ้น ทำให้เกิดการกระจายพลังงานที่สะสมไว้ แต่กลไกนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานน้อยกว่าการเกิด Craze และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเฉือน อย่างไรก็ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวที่ก่อให้เกิดหรือเป็นตัวเร่งก่อให้เกิดกลไกการเกิด Craze และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเฉือนได้ต่อไป (Titow, 1990 Gachter, 1990 และ <http://www.specialchem4polymers.com>)



ภาพที่ 2.12

กลไกการเกิดช่องว่างขึ้นในอนุภาคของสารปรับปรุงแรงกระแทก

จากกลไกทั้งสามนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เพียงกลไกเดียวหรือเกิดหลายๆ กลไกร่วมกัน สารปรับปรุงแรงกระแทกที่ใช้สำหรับการปรับปรุงแรงกระแทกของพีวีซี เช่น

- Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) เป็นสารเพิ่มแรงกระแทกที่นิยมใช้กันมาก สำหรับงานที่ไม่ต้องทนต่อสภาวะ ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านทานแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำๆ สัดส่วนที่เหมาะสมในการเติม ABS ลงในพีวีซี คือ 65/35 อีกทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการฉีกขาด (Tear resistance) การขัดถู (Abrasive resistance)

- Methyl methacrylate butadiene styrene (MBS) เป็นสารเพิ่มแรงกระแทกที่นิยมใช้กับงานที่ต้องการความใส เช่น ฟิล์ม เพราะจะทำให้ผิวที่มันเงา และมีความต้านทานความร้อนดี

- Chlorinated Polyethylene (CPE) เป็นสารเพิ่มแรงกระแทกของพีวีซี ที่ผลิตจากกระบวนการ Chlorination ของ HDPE โดยที่นิยมใช้กันทั่วไปจะมีปริมาณ Cl ประมาณ 25-40% (Titow, 1990)

2.3.4 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่นเป็นสารเติมแต่งที่จำเป็นและมีผลต่อพฤติกรรมของพีวีซี ภายใต้ความร้อนและแรงเฉือนของเครื่องจักรในการผลิต ในการอัดรีดพีวีซีการเติมสารหล่อลื่นสามารถเพิ่มผลผลิตหรือ ลดความร้อน และลดกำลังของเครื่องจักรในการเพิ่มผลผลิต เนื่องจากการเติมสารหล่อลื่นสามารถลดแรงต้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยไม่เปลี่ยนสมบัติของพอลิเมอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการเพิ่มปริมาณช่องว่างให้กับสายโซ่พอลิเมอร์ เพราะว่าสารหล่อลื่นเป็นสารที่มีลักษณะที่ช่วยให้เกิด Internal rotation ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ง่าย สารหล่อลื่นที่ใช้ในพีวีซีโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

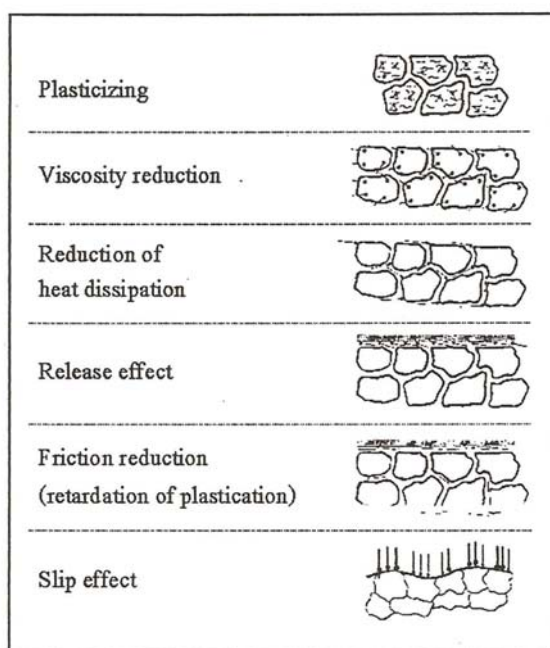
- สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricant)

สารหล่อลื่นภายในเป็นสารหล่อลื่นที่สามารถผสมเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง (Viscosity reduction) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการไหลดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์ลงด้วยซึ่งมีผลทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในระหว่างการได้รับแรงเฉือนมีลดลง (Reduction of heat dissipation) แต่สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนพอลิเมอร์ (Heat distortion temperature) ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นในการเติมสารหล่อลื่นจึงความเติมในปริมาณน้อยๆ (โดยทั่วไปประมาณ 0.3-3%) สารหล่อลื่นภายในของพีวีซี เช่น Fatty acid esters, Glycerol esters ส่วน Fatty acid salt โดยเฉพาะ Calcium stearate สามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อ

ลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการทำงานของสารหล่อลื่นภายในที่กล่าวมาข้างต้น

- สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant)

สารหล่อลื่นภายนอกเป็นสารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (Friction-Reducing effect) ช่วยลดการเกิดความร้อนที่มากเกินไป การเกิดเป็นฟิล์มของสารหล่อลื่นขึ้นระหว่างพื้นผิวโลหะและพอลิเมอร์ช่วยลดการเกาะติดระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (Release effect) และยังช่วยป้องกันการเกิดการเสียรูปของพอลิเมอร์หลอม (Prevention of melt fracture) เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นมีผลทำให้อัตราการเลื่อนผ่านผนังโลหะของพอลิเมอร์ (Wall slippage) มีเพิ่มมากขึ้น และด้านการเกาะติดของพอลิเมอร์ที่ผนัง (Stick-Slip effect) สารหล่อลื่นภายนอกของพีวีซี เช่น Paraffin wax, polyethylene wax เป็นต้น แบบจำลองการทำงานของสารหล่อลื่นภายนอกแสดงใน ภาพที่ 2.9 (Gachter, 1990)



ภาพที่ 2.13

แบบจำลองการทำงานของสารหล่อลื่น (Gachter, 1990)

2.3.5 สารช่วยผลิต (Processing aids)

เป็นสารเติมแต่งอีกชนิดที่มีความสำคัญมาก เพราะช่วยปรับปรุงความสามารถในการผลิตพีวีซีทำให้เกิดการหลอมตัวเร็วขึ้น ช่วยให้เกิดเป็นเนื้อเดียวกัน ลดเวลาหลอมตัวใน

กระบวนการอัดรีด ช่วยปรับปรุงการผลิตให้มีผลผลิตที่มากขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบสูง ช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น เช่น สมบัติทางกล ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก สารที่ช่วยผลิตที่ใช้ในทางการค้า แสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับสารช่วยขึ้นรูปสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด

1. เป็นสารช่วยขึ้นรูปที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จำพวก MMA Copolymer ช่วยสนับสนุนการเกิดหลอมตัวซึ่งจะช่วยให้การปรับปรุงการกระจายตัวและทำให้มีผิวที่มันเงา ช่วยสนับสนุนการบวมตัว ปรับปรุงความแข็งแรงหลอมเหลว (Melt strength) ลดการเกิดรอยฟืนฉลาม (Shark skin)
2. เป็นสารช่วยผลิตที่ประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่เข้ากันได้และเข้ากันไม่ได้กับพีวีซีช่วยปรับปรุงการยึดติดกับโลหะ (Metal release) ลดแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทำการผลิต

ตารางที่ 2.1

แสดงผู้ผลิตและชื่อทางการค้าของสารช่วยขึ้นรูป (Processing aids) ที่ใช้ในทางการค้า

Processing aids type	Supplier	Trade names/grades
ABS	GE Plastics	Blendex 290, 862, 863, 864
Acrylics, modified acrylics	Barlocher	Barorapid 3F, 10F
	BASF	Vinuran KR3833, KR3835
	Elf Atochem	Metablen P-501, P-503, P-550, P-551, P-552, P-700, VP-701, P-710
	Huls	Vestiform R210, R315, R450
	Kaneka Texas	Kane Ace PA-10, PA-20, PA-30, PA-40, PA-50, PA-100, PA-101
	Protex	Modarez APVC8, APVC100
	Rohm and Haas	Paraloid K-120N, K-120ND, K-125, K-130B, K-400, K-415, K-175

ที่มา : Lutz, 2001

โดยสารขึ้นรูปพีวีซีมีกลไกการทำงาน ดังนี้

- ช่วยเร่งการหลอมตัวของพีวีซีให้เกิดเร็วขึ้น โดยปกติพีวีซีจะขึ้นรูปที่อุณหภูมิประมาณ 190°C และมีรูปแบบการไหลแบบ Plug flow แต่เมื่อเติมสารช่วยในการขึ้นรูปลงไปจะ

ส่งผลให้พีวีซีเกิดการไหลแบบ Shear flow ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การปรับปรุงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารช่วยขึ้นรูป พฤติกรรมการไหลของสารเหล่านั้น และความสามารถในการละลายของสารเหล่านั้นในพีวีซี โดยพฤติกรรมในการละลายและความสามารถในการละลายในพีวีซีมีอิทธิพลมาจากองค์ประกอบของสารช่วยขึ้นรูป น้ำหนักโมเลกุล ขนาด เกรน และรูปร่างของเม็ด สารช่วยในการขึ้นรูปมีผลทำให้พีวีซีเกิดการไหลแบบ shear flow และทำให้พีวีซี ณ บริเวณที่ติดกับผนังมีเวลาอยู่ภายในเครื่องนานขึ้นและได้รับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้เกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง แต่แรงเฉือนที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยให้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างผลกระทบทั้งสองขึ้น ดังนั้นจึงควรเติมสารช่วยขึ้นรูปในปริมาณที่เหมาะสม ปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานให้มันเงามากขึ้น

- หลีกเลี่ยงการเกิดการเสียรูปของพอลิเมอร์หลอม สารช่วยขึ้นรูปจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

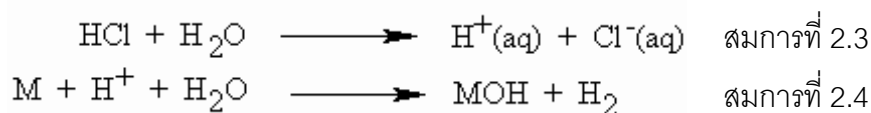
- เพิ่มอัตราการบวมตัวของชิ้นงาน โดยสารช่วยขึ้นรูปมีผลทำให้พีวีซีไหลผ่านผนังได้ยากขึ้น จึงเกิดแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นโมเลกุลมีการจัดเรียงในทิศทางการไหลเพิ่มมากขึ้น เมื่อออกจากดาย จึงมีการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมออกมาทำให้เกิดการบวมได้มากขึ้น

- ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพีวีซีในสถานะของแข็ง โดยการเติม PMMA เพื่อทำให้ค่าทนแรงดึงและความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้น (Gachter, 1990 และ Lutz, 2001)

2.3.6 สารพองฟู (Blowing agent)

เป็นสารที่สามารถให้แก๊สเมื่อเกิดการสลายตัวหรือสามารถกลายเป็นแก๊สได้เมื่ออยู่ในระบบที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่เกิดขึ้นจึงเกิดความพยายามออกสู่ภายนอก ดังนั้นหากทำให้สารพองฟูสลายตัวหรือกลายเป็นแก๊สในขณะที่พอลิเมอร์ยังมีความอ่อนตัวสูงๆ ก็ย่อมจะทำให้แก๊สที่เกิดการเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอกได้ง่ายขึ้น และในขณะที่แก๊สเคลื่อนตัวออกมาก็จะเกิดแรงผลักดันให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ขยายตัวและมีผิวที่เป็นรูพรุนเกิดขึ้น การใช้สารพองฟุมักจะนิยมผสมเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ เพื่อให้สามารถพอลิเมอร์พองตัวได้ในอัตราที่สูงสุด หรือทำให้สารพองฟูแทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในเนื้อ (Matrix) ก่อนจะทำให้ปลดปล่อยแก๊สออกมา อัตราการสลายตัวหรือการให้แก๊สนั้นจะมีผลโดยตรงกับขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากต้องการให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กจะต้องทำให้การสลายตัวของสารพองฟูนี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ แก๊สที่ถูกปล่อยออกมานั้นมีได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารพองฟูที่ใช้ โดยปกติแก๊สที่ปล่อยออกมามักจะได้แก่ CO_2 , H_2O , N_2 , HCl ดังนั้นชนิดของแก๊สที่ได้ออกมาอาจจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ใช้ได้ โดยเฉพาะแก๊สที่มีสภาพความเป็น

กรดหากแก๊สเหล่านี้อยู่ในสถานะที่เหมาะสม เช่น หากมีไอน้ำในระบบหรือบริเวณข้างเคียงจะทำให้แก๊สบางชนิดกลายเป็นสารละลายของกรดซึ่งจะมีฤทธิ์กัดกร่อนอุปกรณ์ที่เป็นโลหะได้



อุณหภูมิของการสลายตัวจะเป็นอุณหภูมิสำคัญที่ต้องคำนึงถึงตลอดเวลาโดยเฉพาะขณะทำการผสม (ต้องผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ) นอกจากนี้สำหรับสารที่จะกลายเป็นแก๊ส อุณหภูมิจุดเดือดก็จะเป็นอุณหภูมิสำคัญในการพิจารณา โดยปกติสารเคมีชนิดสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีจุดเดือดต่ำๆ สามารถทำหน้าที่เป็นสารพองฟูได้ โดยมีข้อกำหนดว่าต้องสามารถซึมเข้าไปอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์ได้โดยไม่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการละลาย ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาทำเป็นสารพองฟู ได้แก่ Pentane, Chloro-Fluoro carbon (CFC) ซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติและมีจุดเดือดต่ำ สามารถซึมเข้าไปใน Polymer matrix ได้ค่อนข้างดี มีปริมาณการซึมซับสูงและไม่ใช้สารตัวทำละลายของพอลิเมอร์

วิธีการผสมสารพองฟูใน 2 กลุ่มนี้จะใช้วิธีการที่ต่างกัน คือ

1. กลุ่มที่สลายตัวให้แก๊สจะใช้วิธีการผสมด้วยวิธีการสำหรับสารเติมแต่งโดยทั่วไป เพียงแต่ ต้องระวังถึงอุณหภูมิของการผสมว่าจะต้องไม่ทำให้เกิดการสลายตัวในขณะที่ทำการผสม เพราะหาไม่แล้วประสิทธิภาพของการพองตัวของพอลิเมอร์จะเกิดได้ต่ำมาก

2. กลุ่มที่กลายเป็นแก๊ส กลุ่มนี้ต้องทำให้เกิดการแทรกตัวเพื่อการซึมซับเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer matrix) ให้มากที่สุดและลึกที่สุด ดังนั้นการจะทำให้การซึมซับเข้าไปได้ดีนั้น ต้องอาศัยอุณหภูมิและความดันเข้าช่วยในการแทรกตัวเข้าไป ข้อควรระวังก็คือความดันที่ใช้และความแข็งแรงของอุปกรณ์ที่ใช้เพราะมีโอกาสเกิดการระเบิดเนื่องจากการใช้ความดันที่สูงเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้

2.3.7 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติมถูกเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อหรือลดการหดตัวในแม่พิมพ์ ลดต้นทุนและยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์อีกด้วย สารตัวเติมเป็นได้ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่สารตัวเติมส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์ ปัจจัยที่มีความสำคัญในการเลือกใช้สารตัวเติมคือ

1. ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ขนาดอนุภาคเล็กทำให้ทนแรงดึงมอดุลัสและแข็งแรงสูงกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคใหญ่

2. รูปร่างสารตัวเติม
3. พื้นที่ผิวทางเคมีของสารตัวเติม พิจารณาจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารตัวเติม

สารตัวเติมแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมชนิดช่วยเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตและช่วยเสริมแรง ทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น สารตัวเติมช่วยเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica)

2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณ หรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์

ตัวอย่างสารตัวเติม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีราคาถูกแต่มีความหนาแน่นสูง นิยมใช้เป็นสารช่วยกระจายตัวเช่น กรดสเตียริก มาเคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงได้ดีที่สุดในยางเพราะมีขนาดอนุภาคเล็ก และทลคัมซึ่งเป็นแร่ประเภทแมกนีเซียมซิลิเกตมีราคาถูกค่อนข้างต่ำใช้กันมากในงานพลาสติก โดยเฉพาะพอลิพรอพิลีน

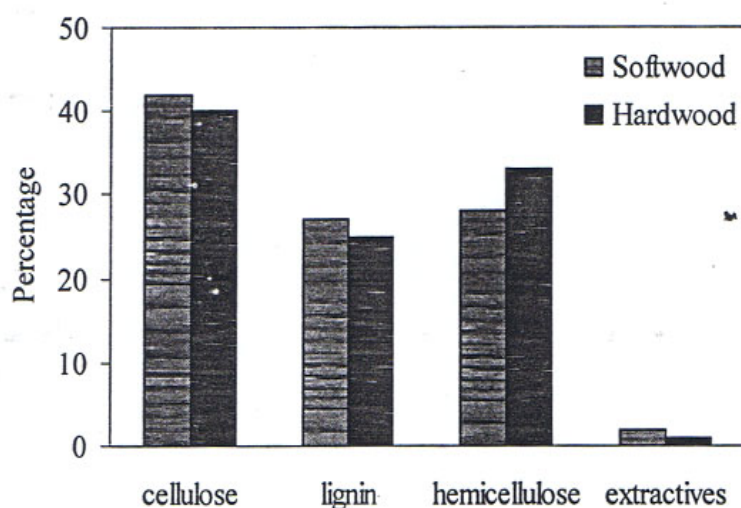
2.3.8 สารให้สี (Coloreat)

ปัจจุบันพบว่า 2 ใน 3 ของพลาสติกจะใช้สารให้สี ที่มีความเข้มข้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เพราะโดยทั่วไปแล้วชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนมากจะมีสี เพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะที่ปรากฏดึงดูดความสนใจ โดยเฉพาะรถยนต์ เครื่องใช้และภาชนะภายในบ้าน การเลือกใช้ถือว่าเป็นเรื่องที่ยาก ดังนั้นจึงควรสอบถามตัวแทนจำหน่ายก่อนนำไปใช้เพื่อลดการเกิดปัญหาที่ตามมา การแบ่งสารให้สีอาศัยหลักความสามารถในการละลาย โดยสารให้สีที่ละลายได้จัดว่าเป็นสีย้อม (Dyes) และ ส่วนสารให้สีที่ไม่ละลายน้ำจัดเป็นรงควัตถุสี (Pigment) ซึ่งกระจายตัวเป็นอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่องตลอดเรซินส่งผลให้เกิดสีขึ้น

สีมีผลกระทบต่อการผลิตโดยเฉพาะในงานอัดรีด (Extrusion) ผงสีสามารถทำให้อัตราการหลอมเหลวของพีวีซีคอมเปาวด์เปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อลักษณะความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบผลของสีผสมกับพีวีซีทำได้โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์ ซึ่งจะแสดงลักษณะการหลอมเหลวของมันได้ชัดเจน มีประโยชน์ในการปรับแต่งส่วนผสมต่างๆ ให้ได้คอมเปาว์ที่มีเนื้อสม่ำเสมอ ตัวอย่างลักษณะของรงควัตถุสีอินทรีย์ที่นิยมใช้เช่น ไอรอนออกไซด์ มีความสามารถในการบดบังที่ดีมาก มีเสถียรภาพทางความร้อนดี ความต้านทานต่อแอลคาไลน์ดี มีความต้านทานต่อการจางหายไปดี และการกระจายตัวดีแต่สีค่อนข้างหม่น ช่วงของสีเริ่มจากสีเหลืองจนถึงสีดำ (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

2.4 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เช่น เส้นใยจากไม้ หรือ ขี้เลื่อย เส้นใยปอและป่าน เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose) ประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์และ ลิกนิน (Lignin) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลพบว่า มีส่วนของเซลลูโลสมากที่สุด ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเส้นใย โดยองค์ประกอบทั้งหมดอยู่ในผนังเซลล์ของเนื้อไม้และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทั้งสิ้น นอกจากนี้ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบยังขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อไม้ และโดยทั่วไปไม้เนื้อแข็งจะมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสมากกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีลิกนินน้อยกว่า ไม้เนื้ออ่อน โดยรายละเอียดของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง แสดงดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14

เปรียบเทียบองค์ประกอบของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง

(Hon และ Shiraishi, 2001)

2.4.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย (Cotton) ปอกระเจา (Jute) ลิ้น (Flax) ป่านรามี่ (Ramie) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

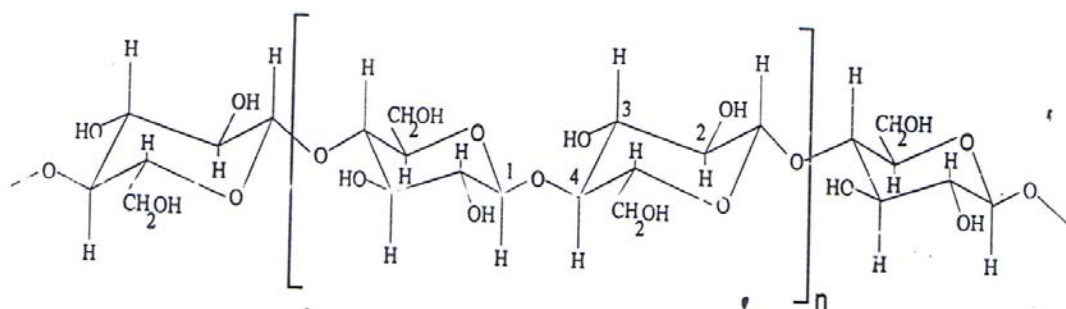
องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

Composition	Cotton	Jute	Flax	Ramie	Sisal
Cellulose	82.7	64.4	64.1	68.6	65.8
Hemi-Cellulose	5.7	12.0	16.7	13.1	12.0
Pektin	5.7	0.2	1.8	1.9	0.8
Lignin	-	11.8	2.0	0.6	9.9
Water soluble	1.0	1.1	3.9	5.5	1.2
Wax	0.6	0.5	1.5	0.3	0.3
Water	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

ที่มา : Bledzki และ Gassan 1999

2.4.1.1 เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลกและพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด ปริมาณของเซลลูโลสในพืชต่างชนิดกันมีปริมาณไม่เท่ากัน เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) เป็นหน่วยซ้ำๆ กัน มีโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โดยสูตรโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15

สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส (Hon และ Shiraishi, 2001)

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส คือ Poly (β -1 $\rightarrow$ 4-D-anhydroglucopyranose) แต่หน่วยของเซลลูโลสเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose, $C_6H_{12}O_5$) เพราะเกิดการขจัดน้ำออกจากกลูโคส เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก ประกอบกับการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโมเลกุลทำให้เซลลูโลสมีองศาความเป็นผลึกสูง (Degree of crystallinity) คือมีค่าประมาณร้อยละ 60-80 ทำให้คุณสมบัติการหลอมตัวสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัวและมีความสามารถในการละลายต่ำ ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมี โดยมีสารเคมีที่มีความสามารถในการละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดกำมะถัน (เข้มข้นมากกว่า 68%) กรดเกลือ (เข้มข้นมากกว่า 41%) สารประกอบแอมโมเนียมจตุรภูมิ (Quaternary ammonium compound)

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส มีดังนี้

1. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ 1.5 g/cm^3 ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอนจะแปรตามแหล่งที่มา และการปรับปรุงทางเคมี

2. การดูดความชื้น

เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูด คายไอน้ำ และของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ จนกระทั่งถึงจุดสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น เมื่อเส้นใยมีความชื้นสูงขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น

3. การละลายและความหนืด

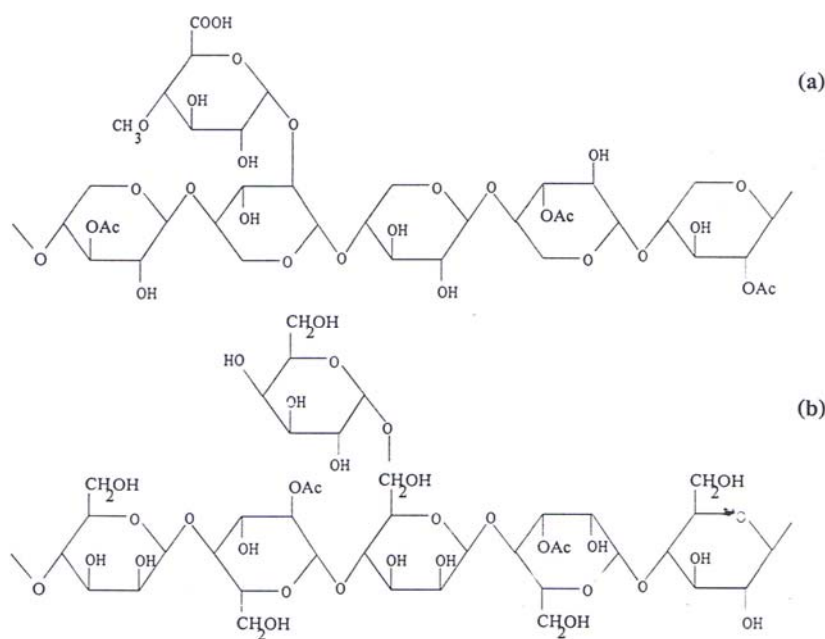
เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแก่เข้มข้น เช่น 72% ของกรดซัลฟูริก 40% ของกรดไฮโดรคลอริก ในสารละลายกรดแก่ที่อุณหภูมิห้องเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วและปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ สารละลายเกลือเข้มข้นและสารละลายอัลคาไลด์ไฮดรอกไซด์จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการบวมตัว ส่วนเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้ ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสและ อนุพันธ์ โดยที่ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

ในอุตสาหกรรม นิยมนำเส้นใยเซลลูโลสมาทำผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น กระดาษ ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ส่วนประกอบสำคัญในเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.4.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันของน้ำตาล โดยชนิดของเฮมิเซลลูโลสขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มาเกาะอยู่และมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบกิ่งก้าน (Branches) โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีสายไซโมเลกุลสั้นกว่าเซลลูโลส โดยมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัญฐาน (Amorphous polymer) ที่มีการจัดเรียงตัวของสายไซโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ และสามารถละลายในตัวทำละลายพวกอัลคาไลด์ (Alkalide) ได้

โดยทั่วไปไม้เนื้อแข็งกับไม้เนื้ออ่อนจะประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างกัน คือในไม้ เนื้ออ่อน องค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างเป็นแบบ Acetylated galactoglucomannans และมีบางโครงสร้างเป็นแบบ Arabino-4-O-methylglucuronoxylans ส่วนในไม้เนื้อแข็งองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างเป็น O-acetyl-4-methylglucuronoxylans และมีบางส่วนมีโครงสร้างเป็น Glucomannans แสดงดังภาพที่ 2.16



(a) O-acetyl-4-methylglucuronoxylan from hardwood

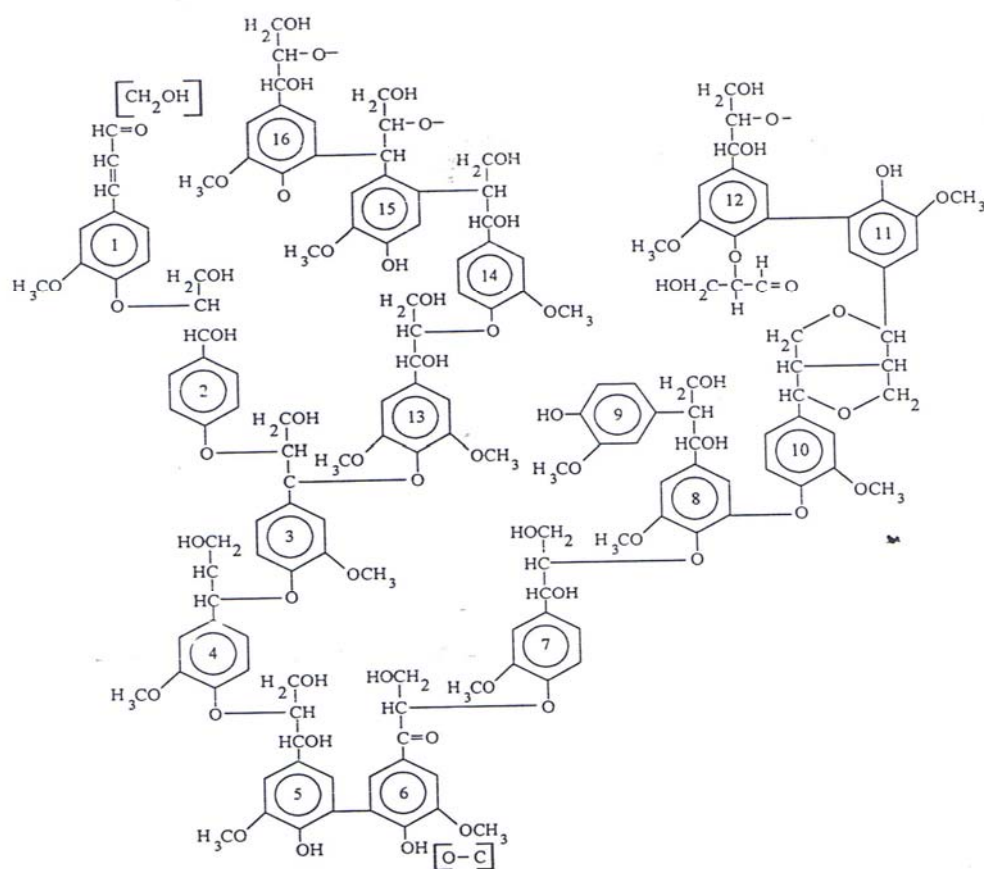
(b) O-acetyl-galactoglucomannan from softwood

ภาพที่ 2.16

โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Hon และ Shiraishi, 2001)

2.4.1.3 ลิกนิน (Lignin)

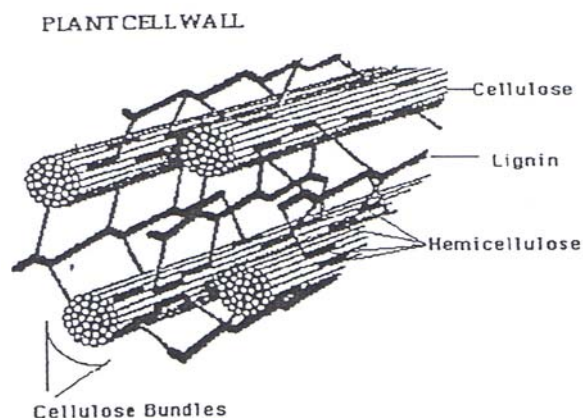
ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic Alcohol) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินไม่ละลายน้ำ มีสมบัติที่ให้ความแข็งแรง ด้วยเหตุนี้ทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทานและลิกนินมีค่า T_g (Glass transition temperature) ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส ตัวอย่างโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.17 (Hon และ Shiraishi, 2001)



ภาพที่ 2.17

โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (Hon และ Shiraishi, 2001)

ไม่ว่าจะชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในไมื่อดังภาพที่ 2.18 (Kroschwitz, 1990)



ภาพที่ 2.18

การเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ (J.I. Kroschwitz, 1990)

2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงที่สามารถใช้ได้ทั้งในเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีสมบัติทางกลดี เช่น มีความแข็งแรง และมีความแข็งสูง เป็นต้น แต่มีความหนาแน่นต่ำ ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจากค่าที่ได้พบว่าเส้นใยลินิน (Flax) และเส้นใยที่ได้จากเยื่อกระดาษ (Kraft) มีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยแก้วชนิด E ซึ่งเป็นชนิดที่นำไปใช้งานพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.3

สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเมื่อเทียบกับเส้นใยเสริมแรงทั่วไป

Fibers	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Hemp	-	1.6	690	-

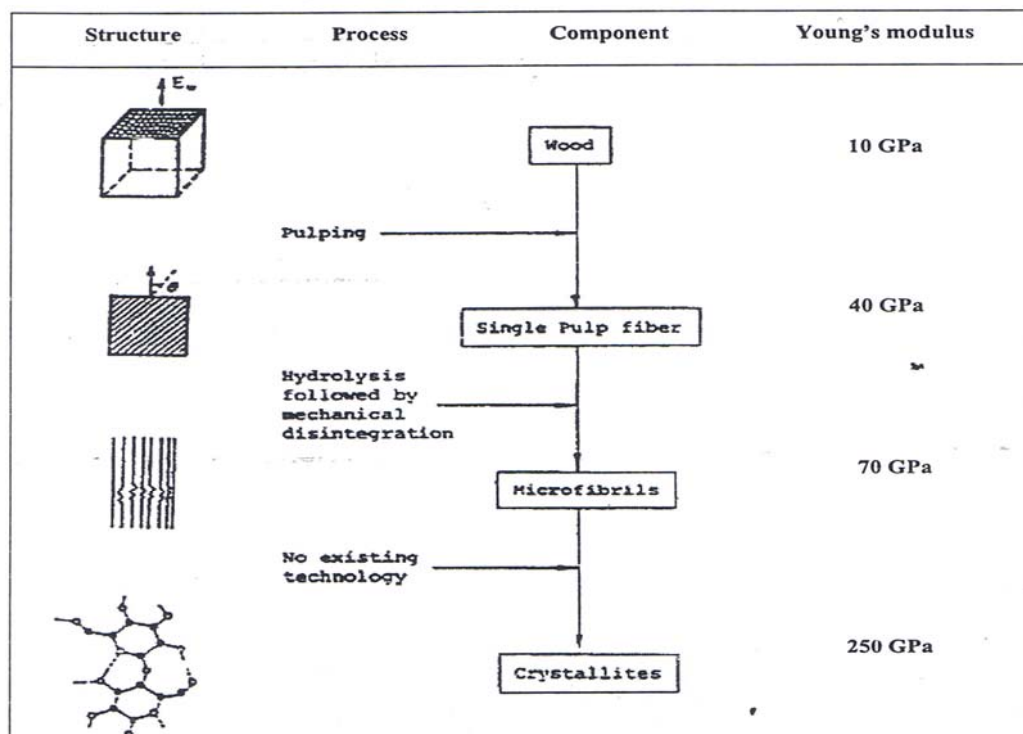
ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเมื่อเทียบกับเส้นใยเสริมแรงทั่วไป

Fibers	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128.0
Sisal	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Coir	1.2	30.0	175	4.0-6.0
Viscose(cord)	-	11.4	593	11.0
Soft wood kraft	1.5	-	1000	40.0
E-glass	2.5	2.5	2000-3500	70.0
S-glass	2.5	2.8	4570	86.0
Aramide(normal)	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63.0-67.0
Carbon(normal)	1.4	1.4-1.8	4000	230-240.0

ที่มา : Bledzki และ Gassan, 1999

จากตารางข้างต้น พบว่า ช่วงค่าของสมบัติดังกล่าวมีอุปสรรคอย่างหนึ่งที่ทำให้ค่าของผลิตภัณฑ์จากเส้นใยธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของเส้นใยธรรมชาติในระหว่างการเติบโต และปัจจัยอื่นๆ อีกเส้นใยธรรมชาติสามารถผลิตเป็นเส้นใยเสริมแรงได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลที่ได้แตกต่างกันออกไป จะเห็นได้ว่าเส้นใยธรรมชาติที่ได้ยังไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้ค่ามอดุลัสประมาณ 10 GPa แต่เมื่อผ่านกระบวนการทางเคมี โดยแยกเส้นใยเซลลูโลสออกจากเนื้อไม้แล้วนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้ค่ามอดุลัสสูงถึง 40 GPa และเมื่อทำการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสจะได้เส้นใยขนาดเล็ก (Microfibril) ซึ่งให้ค่ามอดุลัสประมาณ 70 GPa แต่โดยตามทฤษฎีแล้วเซลลูโลสสามารถให้ค่ามอดุลัสได้สูงถึง 250 GPa อย่างไรก็ตามยังไม่ มีวิธีที่สามารถแยกเซลลูโลสออกมาจากเส้นใยขนาดเล็กได้ ในปัจจุบันจึงนิยมทำการเตรียมเส้นใยธรรมชาติถึงเพียงกระบวนการที่สอง (Microfibril) เท่านั้น แสดงดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง การผลิต องค์ประกอบและค่ามอดุลัส
ของเส้นใยธรรมชาติ (Bledzki และ Gassan, 1999)

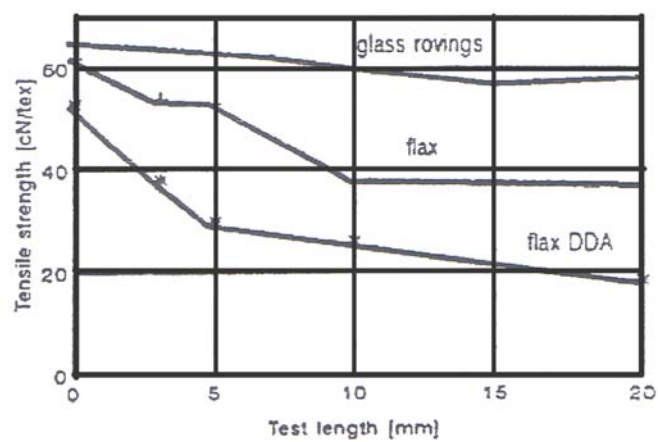
จากโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งชอบน้ำ จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติสามารถดูดความชื้นได้ ปริมาณความชื้นของเส้นใยธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนที่ไม่เป็นผลึกและช่องว่างภายในเส้นใย โดยในสภาวะปกติเส้นใยธรรมชาติจะมีปริมาณความชื้นสูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกลและลักษณะทางกายภาพ คือ เมื่อนำมาผสมกับพลาสติกจะเกิดช่องว่างระหว่างเฟสของเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก ทำให้สมบัติทางกลของพลาสติกที่ได้ไม่ดีนัก แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4
สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่มีความชื้นอยู่

Fiber	Relative tensile strength (wet)(%)	Relative elongation (wet)(%)
Cotton	105-110	110-116
Jute	100-105	100
Flax	102-106	125-133
Remie	115-125	100
Sisal	90-120	100
Glass	75-100	100
Aramide	78-80	-
Carbon	100	100

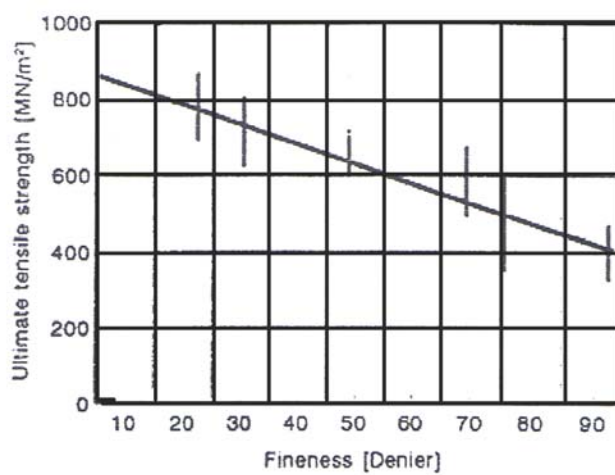
ที่มา : Bledzki และ Gassan, 1999

ในกรณีของเส้นใยแก้วค่าความแข็งแรง (Tensile strength) ของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับความยาวและชนิดของเส้นใยนั้นๆ แสดงดังภาพที่ 2.20 พบว่า ความแข็งแรงของเส้นใยลินินจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยมากกว่าเส้นใยแก้ว แต่สำหรับเส้นใยสับปะรดความยาวของเส้นใยจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงน้อย นอกจากนี้ความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติยังขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมเส้นใย เช่น การเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมได้แสดงดังภาพที่ 2.21 (Bledzki และ Gassan, 1999)



ภาพที่ 2.20

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อความยาวของเส้นใยลินินเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้ว (Bledzki และ Gassan, 1999)



ภาพที่ 2.21

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับขนาดของเส้นใยธรรมชาติ (Bledzki และ Gassan, 1999)

2.4.3 ผงไม้ (Wood flour)

มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ได้จากการนำชี้เลื่อย เศษไม้หรือไม้แผ่นบางๆ มาบดให้เป็นผง โดยทั่วไปผงไม้ที่นำมาใช้เป็นฟิลเลอร์ในพลาสติกมีขนาดอนุภาคประมาณ 40-80 mesh แต่ผงไม้ที่มีความละเอียดถึง 140 mesh ก็มีการผลิตด้วย ผงไม้เป็นฟิลเลอร์อินทรีย์ที่ใช้ในพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต (เช่น ฟีนอลิกเรซิน อีพอกซีเรซิน) ส่วนใหญ่ โดยผงไม้จะช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงด้วย แต่ก็ต้องคำนึงถึงจุดอ่อนของการใช้ผงไม้ด้วย ได้แก่ แรงยึดที่ต่ำระหว่างพอลิเมอร์และผงไม้ การขึ้นรูปทำได้ยากขึ้นและไม่สามารถใช้ได้ทีอุณหภูมิการขึ้นรูปสูง กว่า 180 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อนและความทนทานต่อสภาวะอากาศลดลง รวมทั้งมีความทนทานแรงกระแทกลดลงด้วย สำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้ผงไม้เป็นฟิลเลอร์ได้แก่ PE, PP, PVC, PF, EP, UF, MF (อรอุษา สรวารี, 2546)

2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ส่วนซึ่งแต่ละส่วนเป็นองค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้จากการพิจารณาวัสดุเชิงประกอบอาศัยหลัก 3 ประการดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องอยู่ในสัดส่วนที่พอเหมาะและมีปริมาณมากกว่า 5%
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกันดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงมีสมบัติที่แตกต่างจาก

สมบัติของส่วนผสมเช่น ในกรณีพลาสติก แม้ว่าในกระบวนการผลิตจะมีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นรูปและเหตุผลทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุเสริมแรง

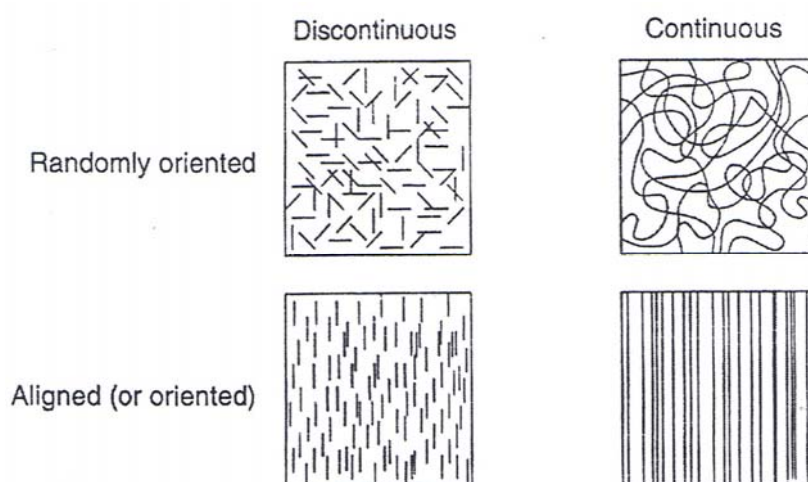
- ส่วนผสมต้องไม่กลืนกันเป็นเนื้อเดียวสามารถแบ่งเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบหลัก 2 ส่วนที่กล่าวถึงคือส่วนเสริมแรง (Reinforcement) และส่วนของเมทริกซ์ (Matrix)

2.5.1 องค์ประกอบหลักของวัสดุเชิงประกอบ

2.5.1.1 ส่วนเสริมแรง (reinforcement)

ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสสูง จึงเป็นส่วนที่คอยรับแรงหลักของวัสดุเชิงประกอบและส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดและที่เป็นประเภทเส้นใย เช่น เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเส้นใยพวกนี้อาจเป็นเส้นใยยาวและเส้นใยสั้นและอาจเกิดเป็นเส้นใยพันกันหรือทอให้เป็นโครงสร้างแบบต่างๆ โดยการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ จะขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานดังแสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22

การจัดเรียงตัวที่ต่างกันของส่วนเสริมแรง (Astrom, 1997)

2.5.1.2 ส่วนเมทริกซ์ (Matrix)

ส่วนเมทริกซ์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนเสริมแรงอยู่ในตำแหน่งและมีการจัดเรียงตัวตามที่กำหนด โดยส่วนนี้อยู่ล้อมรอบและคอยปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงแดดและอากาศ เป็นต้น ส่วนนี้จะมีค่าความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่องทำให้สามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรงได้ง่ายและเมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะและเซรามิกส์ เป็นต้น

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

- สัดส่วนของส่วนผสม (Volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสมเป็นดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\chi_c = \chi_m V_m + \chi_f V_f \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่ χ_c คือ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ต้องการทราบ

χ_m คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์

χ_f คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง

V_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์

V_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (Interface)

ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญซึ่งเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย

- รูปร่าง ขนาด การเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์

- สมบัติขององค์ประกอบของวัสดุผสม

- สภาวะแวดล้อม (Mathews และ Rawlings, 1994)

2.5.3 ทฤษฎีการยึดเกาะระหว่างเฟสของวัสดุเชิงประกอบ

ในวัสดุเชิงประกอบ เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยในบริเวณระหว่างเฟส (Interphases) ได้หลายวิธีด้วยกัน โดยกลไกการยึดเกาะหลักๆ 5 กลไกด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 2.23 ซึ่งอาจเกิดแบบใดแบบหนึ่งหรือเกิดร่วมกันก็ได้ ดังต่อไปนี้

2.5.3.1 การดูดซับและการเปียก

การดูดซับและการเปียกเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้กันมากพอจนสามารถเกิดแรงดึงดูดทางกลได้ (Physical attraction) เช่น เกิดการเปียก (Wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็ง ส่วนในกรณีของของแข็งสองชนิดที่อยู่ใกล้กันมากพอในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอม ความขรุขระของพื้นผิวจะขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะกันได้ ในกรณีนี้จึงเกิดการยึดเกาะแบบดูดซับ (Absorption) และการเปียก (Wetting) ได้ยาก ซึ่งการยึดเกาะแบบ

การดูดซับและการเปื่อยนี้ เกิดจากการกระจายตัวของแรงระหว่างโมเลกุลที่สัมผัสกัน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการยืดเกาะแบบนี้จะมีความแข็งแรงสูง แต่ในความเป็นจริงแล้วกลับมีความแข็งแรงน้อยมาก อาจเนื่องจากพื้นผิวเส้นใยที่มีความสกปรก การเกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการขึ้นหรือการหดตัวของเมทริกซ์เอง ทำให้เกิดแรงเค้น (Wtress) และช่องว่างระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

2.5.3.2 การแพร่เข้าหากัน

การแพร่เข้าหากัน เกิดจากการยืดเกาะพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิด โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งหมดแพร่เข้าหากัน ความแข็งแรงของการยืดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) และความสามารถในการแพร่ โดยการพันกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้น การยืดเกาะแบบการแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ตัวทำละลายทาที่บริเวณพื้นผิว หรือการเติมสารพลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งกลไกการยืดเกาะแบบนี้เกิดขึ้นได้กับเส้นใยที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดในคอมโพสิตที่มีพื้นผิวของเส้นใยแข็งและไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล

2.5.3.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์

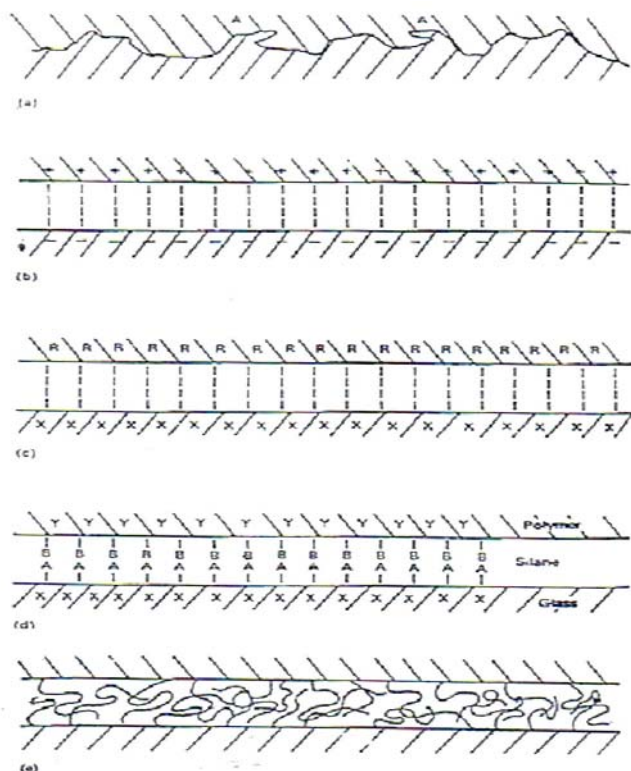
กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดมีประจุต่างกันอย่างอยู่ใกล้กันคือ พื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นลบ ความแข็งแรงของกลไกการยืดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุ แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) ซึ่งไม่ใช่แรงยืดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยืดเกาะชนิดอื่นคือ ช่วยให้เกิดการยืดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่น การยืดเกาะของสารควบแน่นประเภทสารไฮโดรเจนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวกมีการยึดได้ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวเส้นใย

2.5.3.4 พันธะเคมี

กลไกนี้จะเกิดเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดพันธะเคมีได้ ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยืดเกาะที่แข็งแรง และความแข็งแรงของกลไกการยืดเกาะขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นมี 5 ชนิด คือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) พันธะที่เกิดจากแรงไอออนิก (Ionic forces) พันธะโลหะ (Metallic bonds) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) และพันธะที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der waals forces)

2.5.3.5 การยึดเกาะทางกล

ในกระบวนการผลิตเมื่อเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวของเส้นใยในขณะที่เป็นของไหล ซึ่งทำให้เมทริกซ์สามารถแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย หรือในร่องบนพื้นผิวเส้นใยแล้วทำให้เกิดการเชื่อมโยง เมทริกซ์จะแข็งตัวติดกับพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เมทริกซ์แทรกตัวเข้าไปได้ และความหนืดของเมทริกซ์เอง



- (a) Mechanical bonding
- (b) Electrostatic bonding
- (c) Chemical bonding
- (d) Chemical bonding as applied to a silane coupling agent
- (e) Interdiffusion bonding

ภาพที่ 2.23

กลไกการยึดเกาะของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส (Astrom, 1997)

2.5.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุเชิงประกอบ

1. ข้อดี

- สมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ค่ามอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) และความแข็งจำเพาะ (Specific stiffness) มีค่าสูง เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นต่ำและน้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุได้
- มีสมบัติหลากหลาย เช่น ด้านทนต่อการสึกหรอ ทนต่อการล้าตัวและมีเสถียรภาพ ด้านรูปร่างสูง
- มีอายุการใช้งานได้นาน

2. ข้อเสีย

- ต้นทุนด้านเครื่องจักรในการผลิตวัสดุสูง
- เชื่อมติดกับวัสดุอื่นได้ยาก
- การตรวจวิเคราะห์สมบัติยาก
- ทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก (อิทธิพล แจ่มชัด, 2544)

2.6 คอมโพสิตจากไม้และผลิตภัณฑ์ (Wood-based composites and panel production)

คอมโพสิตของไม้ในทางการค้า แบ่งออกได้หลายประเภท เช่น Plywood, Flakeboard, Particle board และ Hardboard เป็นต้น โดยแต่ละประเภทมีลักษณะและการผลิตแตกต่างกันไปดังนี้

Plywood หรือ ไม้อัด ผลิตจากไม้แผ่นบางๆ ที่ถูกนำมาวางซ้อนกันโดยใช้กาวเป็นตัวประสาน โดยวางแผ่นไม้ให้ทิศทางของแกรนในแต่ละแผ่นตั้งฉากกัน และส่วนใหญ่จะทำให้มีจำนวนชั้นเป็นเลขคี่ เพื่อให้ความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการหดตัวอยู่ที่ชั้นกลาง และเพื่อให้มีการโค้งงอน้อยที่สุด

Particle board มีลักษณะเป็นแผ่นไม้ที่ผลิตจากเศษไม้ชิ้นเล็กๆ ที่ได้จากการเลื่อย ไซ หรือเจาะ โดยเศษไม้ถูกนำมาอัดรวมกันโดยใช้เรซินเป็นตัวประสาน เรซินที่นิยมใช้คือ Phenolformaldehyde และ Isocyanate resin

Flakeboard มีกรรมวิธีในการผลิตเหมือนกับ Particle board แต่มีโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยที่โครงสร้างของ Flakboard ทำมาจากแผ่นไม้ขนาดเล็กๆ มาอัดรวมกัน และ

ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Waferboard และ Oriented strandboard ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ Waferboard จะใช้แผ่นไม้ที่กว้างแต่ Oriented strandboard จะใช้แผ่นไม้ที่แคบและยาว

Hardboard มีลักษณะเป็นแผ่นไม้ที่ผลิตจากเส้นใยลิกโนเซลลูโลส (Ligno-cellulosic fibers) นำมาอัดรวมภายใต้ความร้อนและความดัน ให้มีความหนาแน่น 31 ปอนด์ต่อคิวบิกฟุต (Pounds per cubic foot) หรือมากกว่าและอาจใส่วัสดุอื่นเติมลงไปเพื่อปรับปรุงให้ได้สมบัติตามความต้องการ เช่น ความแข็ง หรือ ความต้านทานการขีดถู เป็นต้น (Wood Engineering Handbook Forest Product Laboratory)

2.6.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตจากไม้และเทอร์โมพลาสติก

ไม้เป็นเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นสารอินทรีย์ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมากและสามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไม้ เช่น อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมกระดาษ มักจะมีเศษไม้หรือผงไม้ที่เหลือใช้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำเศษหรือผงไม้มาผสมพลาสติกเพื่อทำเป็นคอมโพสิต ความแตกต่างระหว่างไม้กับพลาสติกผสมไม้นั้นก็อาจมีความแตกต่างอยู่บ้าง แต่พลาสติกผสมไม้จะสามารถขึ้นให้มีลักษณะกลวงได้ มีข้อต่อทางด้านข้างของชิ้นงาน ดังนั้น การใช้งานไม้คอมโพสิตจึงมีความสามารถในการใช้งานได้สะดวกกว่า

เทอร์โมพลาสติกที่เข้าร่วมกับไม้จะต้องหลอมหรืออ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวของไม้ โดยทั่วไปประมาณ 100-250 องศาเซลเซียส เทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ผสมกับไม้ได้แก่ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง

วัสดุอื่นๆ สามารถเติมลงไปในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอมโพสิต สารเติมแต่งเหล่านี้จะเสริมพันธะระหว่าง เทอร์โมพลาสติกและองค์ประกอบไม้ เช่น สารคู่ควบ (Coupling agents) สารที่เพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสีอัลตราไวโอเลต (UV stabilizers) และ สารช่วยผลิต (Processing acids)

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงการแปรไม้กับเทอร์โมพลาสติก คือ ความชื้น เพราะความชื้นทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศและได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพต่ำ วัตถุดิบที่ใช้จึงควรผ่านการอบให้แห้งก่อนหรือใช้เครื่องมือที่มีช่องระบายความชื้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิการสลายตัวของ

เส้นใยไม้ และ เกิดการแตกหักของไม้ที่เป็นองค์ประกอบ (Bledzki : Gassan, 1999 และ Wood Engineering Handbook)

ตารางที่ 2.5

การเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของการใช้ไม้เป็นวัสดุเสริมแรง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติ มีราคาถูก ไม้เป็นอันตรายต่อกระบวนการผลิต	1. มีความแตกของเส้นใยระหว่างผสม
2. เมื่อเปรียบเทียบกับสารเติมที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic filler) แล้วเส้นใยไม้มีความหนาแน่นต่ำกว่ามีค่าความแข็งแรง (Strength) และมอดุลัสสูง	2. มีการกระจายตัวของไม้ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำ เนื่องจากเส้นใยไม้จะจับกลุ่มรวมกัน การเติมสารช่วยกระจายตัวหรือเพิ่มอุณหภูมิของการผสมจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้
3. เยื่อไม้มีสมบัติค่าความแข็งแรงและมอดุลัสเท่ากับการใช้เส้นใยแก้ว เป็นวัสดุเสริมแรงโดยเทียบที่ความหนาแน่น	3. มีการยึดเกาะกันของโครงสร้างพอลิเมอร์กับเส้นใยไม่ดี ทำให้เกิดปัญหาในการรวมตัวเกาะกัน แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยใช้สารคู่ควบหรือทำการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี
4. มีค่าความแข็งแรงดี	-
5. เมื่อเทียบกับเส้นใยแก้วและเคฟลาร์แล้ว เส้นใยจากไม้เป็นอันตรายน้อยที่สุดเพราะเป็นวัสดุธรรมชาติ	-
6. วัสดุผสมของไม้กับเทอร์โมพลาสติกสามารถผลิตได้โดยกระบวนการผลิตทั่วๆ ไปได้ เช่น การฉีด การอัดรีด เป็นต้น	-

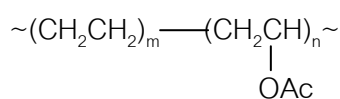
ที่มา : Meister และ Chen, 1993

2.7 อีวีเอ (Ethylene vinyl acetate copolymers)

อีวีเอเป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มโพลีโอลิฟิน เนื่องจากเป็นโคโพลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75 – 90% และไวนิลอะซิเตทเป็นตัวเสริมแต่ง

ให้เกิดการยึดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็ง อีวีเอเกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซีเตท โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้จะต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียวสารก่อให้เกิดอนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo – Bis - Isobutyronitrile, Orange peroxides และ Persulphates

2.7.1 โครงสร้างของอีวีเอ



ภาพที่ 2.24

แสดงโครงสร้างของอีวีเอ

2.7.2 สมบัติของอีวีเอ (Raff, 1971. ชัชวาลย์ สุรสวัสดิ์, 2531 และ นิพนธ์ วงศ์วิเศษ สิริกุล, 2537)

1. เป็นโพลิเมอร์พลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
2. มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.93 – 0.95
3. สามารถละลายได้ในสารอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbons) ที่อุณหภูมิสูง
4. จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ ณ อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60 - 80^{\circ}\text{C}$
5. มีค่า Dielectric strength เท่ากับ 21 kV/mm.
มีค่า Dielectric constant ณ 1 MHz เท่ากับ 2.8
มีค่า Power factor ณ 1 MHz เท่ากับ 0.03 ถึง 0.04
6. สมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่
Melt flow index เท่ากับ 1.3 – 4 (g/10 sec)
Hardness (IRHD) เท่ากับ 90 – 95
Tensile Strength เท่ากับ 1.3 – 2.0 kgf/mm²
Extension at break เท่ากับ 500 – 700%

7. มีค่า T_g ตั้งแต่ 20°C (ของไฮโมพอลิเมอร์) จนถึง -20°C และมี Second transition บริเวณ -125°C

8. มีความโค้งงอดี ที่อุณหภูมิต่ำ
9. มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์
10. ทนต่อสภาพการใช้งาน การชักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
11. สามารถใช้สีได้ง่ายและสวยงาม
12. ขึ้นรูปได้ง่าย
13. มีความยืดหยุ่น และโค้งงอได้ดี โดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์

2.7.3 การประยุกต์ใช้

1. EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำ มักใช้เป็น Wax additives ในงานการเคลือบกระดาษ นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์

2. EVA ที่มีคุณสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

3. EVA Foam ใช้ในงานการผลิตรองเท้า เบาะรองนั่ง

2.7.4 สารเติมแต่งของการผลิตโฟมอีวีเอ

1. สารให้ฟอง (Blowing agent)

ควรมีลักษณะเป็นสารที่ไม่เสถียรเมื่อให้ความร้อน สามารถแบ่งชนิดของสารให้ฟองได้ ดังนี้คือสารให้ฟองแบบกายภาพ (Physical blowing agent) ได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นของเหลวและมีจุดเดือดต่ำ เช่น ไฮโดรคาร์บอน คลอรีนไฮโดรคาร์บอน ฟลูออรีนไฮโดรคาร์บอน โดยจะทำให้เกิดเซลล์โฟมเมื่อสารดังกล่าวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ โดยสารให้ฟองแบบกายภาพ ควรมีสมบัติดังนี้

- ไม่มีกลิ่น และไม่เป็นพิษ
- ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน
- ไม่ติดไฟ
- ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของพอลิเมอร์
- เสถียรต่อความร้อนและเฉื่อยต่อสารเคมีอื่นๆ เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซต่ำ
- เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ ควรมีอัตราในการแพร่ผ่านเยื่อของพอลิเมอร์ต่ำ

สารเชิงซ้อนอินทรีย์ของไนโตรเจน (Organic nitrogen compound) จะต้องมีความเสถียรเมื่อเก็บรักษา ณ อุณหภูมิปกติและในระหว่างการสังเคราะห์ เมื่อนำไปใช้งาน จะต้อง

สามารถควบคุมการปลดปล่อยก๊าซด้วยอุณหภูมิในการสลายตัว (Decomposition temperature) ได้ โดยสารให้ฟองแบบสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของไนโตรเจนควรมีสมบัติ ดังนี้

- ช่วงอุณหภูมิในการปลดปล่อยก๊าซควรเป็นช่วงสั้น
- ควรปลดปล่อยก๊าซ ณ อุณหภูมิที่เฉพาะเจาะจง และปลดปล่อยในอัตราที่เร็ว
- ก๊าซที่ได้ไม่ควรมีสมบัติกัดกร่อน
- สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้อย่างทั่วถึง
- ควรมีความเสถียรขณะเก็บรักษา
- ไม่เป็นพิษทั้งก่อนและหลังการให้ฟองแล้ว
- ภายหลังการให้ฟองแล้วสารที่เหลือไม่ควรมีกลิ่น หรือมีสี และต้องไม่มีผล

ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโฟมที่ได้

- ไม่ควรคายความร้อนออกมาขณะสลายตัว
- ควรทำงานได้ดีในสภาวะมีพื้มีไดๆ นั่นคือ ความดันไม่ควรมีผลต่ออัตราการ

สลายตัว

ตัวอย่างสารให้ฟองแบบสารเชิงซ้อนไนโตรเจนเช่นอะโซบิสฟอรัมาไมด์ (Azo-Disformamide) หรือ เรียกว่า อะโซไดคาร์โบไมด์ (Azo- Dicarboxamide, AZ) มีโครงสร้างดังนี้ $\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{N}=\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$ สามารถสลายตัวในอากาศที่อุณหภูมิ 195- 200°C มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวในพลาสติกเท่ากับ 160 - 200°C และมีลักษณะภายนอกเป็นผลึกของแข็งสีเหลือง สลายตัวด้วยความร้อนได้ก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และแอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ ในปริมาณเล็กน้อย สามารถติดไฟได้เองและสารที่เหลือภายหลังการให้ก๊าซจะมีลักษณะเป็นสีขาว ไม่มีกลิ่น

2. สารช่วยการกระจายตัว (Dispersing agent)

นิยมใช้กันมาก คือ กรดไขมัน (Fatty acids) ได้แก่ กรดสเตียริก ใช้เป็นสารช่วยในการผสมทำให้สารตัวเติมต่างๆ กระจายตัวได้ดี เป็นสารหล่อลื่น ไม่ให้อิฐเเหียวติดลูกกลิ้งขณะผสม

3. สารเชื่อมโยงโมเลกุล (Curing agent)

ที่นิยมใช้กันมากคือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์คงรูปร่างขณะใช้งาน

4. สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Accelerator)

จะช่วยกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลของอีวีเอเร็วขึ้น สารเหล่านี้จะอยู่ในรูปของออกไซด์ของโลหะกรดอินทรีย์หรือเกลือของกรดอินทรีย์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ ซิงค์สเตียเรต โดยสารดังกล่าวจะเป็นตัวรับความร้อน นำความร้อนให้กับอีวีเอ ช่วยให้สารให้ฟองทำงานได้ดีขึ้น

5. สารตัวเติม (Filler)

จะช่วยในการลดต้นทุน หรืออาจเป็นสารเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต หรือบางครั้งอาจใส่เพื่อปรับปรุงสมบัติโฟมอิวีเอ เช่น ใช้ SGP เพื่อปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำของอิวีเอ

2.8 วิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

การยึดติดกันระหว่างเฟสของเมทริกซ์และเส้นใยธรรมชาติที่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงถือว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม การปรับปรุงผิวของเส้นใยธรรมชาติจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติโดยการทำให้เส้นใยมีความสามารถในการยึดเกาะกับเมทริกซ์ดีขึ้นโดยปกติแล้วเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic material) และเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic material)

วิธีการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

2.8.1 การปรับปรุงผิวด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical method)

วิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีทางกายภาพ มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการปรับปรุงผิวด้วยวิธีการทางความร้อน (Thermotreatment) และการปรับปรุงผิวด้วยวิธีการใช้ไฟฟ้า (Electrical discharge) เป็นต้น การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีทางกายภาพมีผลทำให้สมบัติพื้นผิวของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การทำให้เส้นใยมีผิวที่ขรุขระมากขึ้น หรือการทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพในด้านรูปร่างเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นวิธีการปรับปรุงเส้นใยด้วยวิธีกายภาพจึงมีอิทธิพลต่อพันธะในเชิงกลกับพอลิเมอร์ (Bledzki และ Gassan, 1999)

2.8.1.1 การปรับปรุงผิวด้วยกระบวนการทางความร้อน

ทำโดยการนำเส้นใยธรรมชาติ เช่น ไม้ มาผ่านกระบวนการให้ความร้อน ความร้อนมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มีอยู่ในโมเลกุลของเซลลูโลสเกิดการสร้างพันธะระหว่างกันขึ้น และถ้ายังให้อุณหภูมิสูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้นยิ่งมีผลทำให้ไม่มีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และมีเสถียรภาพในด้านรูปร่างมากยิ่งขึ้น (Juodeikiene และ Minelga, 2003)

2.8.1.2 การปรับปรุงผิวด้วยการใช้ไฟฟ้า

ได้มีการปรับปรุงผิวทั้งของเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ วิธีการนี้เหมาะสำหรับพอลิเมอร์ที่มีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน

เป็นต้น ตัวอย่างการปรับปรุงผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าวิธีหนึ่งคือ การปรับปรุงผิวด้วยการใช้พลาสมา ณ อุณหภูมิต่ำ (Cold plasma treatment) การปรับปรุงผิวด้วยวิธีการนี้จะมีผลกระทบกับวัสดุเฉพาะบริเวณผิวที่อยู่ด้านบนสุดของพื้นผิวเท่านั้น แต่ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุ หลักการของการทำพลาสมา ณ อุณหภูมิต่ำ คือ การใช้ก๊าซที่มีอิเล็กตรอนอยู่ด้วยจำนวนหนึ่งไม่มากนัก ซึ่งมีพลังงานสูงมีค่าอยู่ในช่วง 1-10 eV พลังงานนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Radical) และไอออนภายใต้อุณหภูมิต่ำ อนุภาคของก๊าซที่ถูกกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ พอลิเมอร์มีผลทำให้เกิดเรดิคัลของพอลิเมอร์ขึ้นที่ผิวของวัสดุ เรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงหรือเกิดการสลายตัว เกิดเป็นชั้นผิวที่มีหมู่ที่มีขั้วเกิดขึ้นในกรณีการปรับปรุงผิวด้วยออกซิเจนพลาสมา พบว่าอะตอมของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับพอลิเมอร์ทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิล เป็นต้น มีผลทำให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการเปียกเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ผลของการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ชนิดของถึงปฏิกิริยา อัตราการไหลของก๊าซ ความดันของก๊าซ และเวลาในการทำพลาสมา เป็นต้น (Mahlberg, 1999 และ Yosomiya, 1990)

2.8.2 การปรับปรุงผิวด้วยวิธีทางเคมี (Chemical methods)

เป็นวิธีที่ทำให้พอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติสามารถเข้ากันได้มากขึ้น โดยการนำวัสดุหรือสารตัวที่สามเข้ามาทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยง

ทฤษฎีการสร้างพันธะของสารคู่ควบ มีดังนี้

1. ทฤษฎีการสร้างพันธะทางเคมี (Chemical bonding theory) คือ สารคู่ควบทำหน้าที่เป็นสะพานของพันธะทางเคมีเชื่อมโยง สารเสริมแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์เข้าไว้ด้วยกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ซึ่งเป็นพันธะระหว่างเฟสที่มีความแข็งแรงมากที่สุด

2. การเปียกและผลของพลังงานพื้นผิว (Wetting and energy effects) คือ สารคู่ควบประเภทไฮลีนมีผลทำให้พื้นผิวของสารเสริมแรงถูกปรับปรุงทำให้มีแรงตึงผิววิกฤต (Critical surface tension) สูงกว่าแรงตึงผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลวส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถเปียกผิวสารเสริมแรงได้

3. ทฤษฎีการสร้างชั้นผิวที่สามารถเสียรูปได้ (Deformable layer theory) เฟสที่สามารถเกิดการเสียรูปได้ มีความยืดหยุ่นเหมาะสมสำหรับในกรณีที่วัสดุผสมเกิดความเค้นขึ้นที่พื้นผิวรอยต่อเฟสซึ่งเกิดจากความแตกต่างของการหดตัวเนื่องจากความร้อนของเรซินและสารเสริมแรงในขณะที่วัสดุผสมถูกหล่อเย็น

4. ทฤษฎีการสร้างชั้นผิวที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Restrained layer theory) สารเคลือบทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเฟสขึ้น เกิดเป็นชั้นผิวที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Restrained layer) ที่รอยต่อระหว่างเฟสเกิดพันธะที่มีความแข็งแรงเกิดขึ้นและมีความต้านทานต่อการแตกออกของพันธะระหว่างเฟสที่อาจเกิดได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การเกิดปฏิกิริยากรด-เบส (Acid-base reaction) การปรับปรุงการยึดกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์และสารเสริมแรงอาจทำได้โดยการใช้สารเคลือบบางชนิดเข้ามาทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเป็นกรดของพื้นผิววัสดุ

การพัฒนาทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกของพันธะที่เกิดขึ้น โดยสารเคลือบในวัสดุผสมเป็นปัญหาที่ค่อนข้างมีความซับซ้อน ทฤษฎีของพันธะทางเคมีเป็นหลักเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการนำมาอธิบายผลของการปรับปรุงผิวด้วยสารเคลือบ ดังนั้นการพิจารณาแนวคิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น ซึ่งประกอบด้วยรูปร่างของเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส (Interphase) การทำปฏิกิริยาระหว่าง กรด-เบสที่รอยต่อระหว่างเฟส ความสามารถในการเปียก

วิธีการปรับปรุงผิวด้วยวิธีทางเคมี มีดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงแรงดึงดูดผิว

เส้นใยธรรมชาตินั้นมีพลังงานพื้นผิวที่สัมพันธ์กับความชอบน้ำของเส้นใย วิธีการหนึ่งซึ่งใช้ในการปรับปรุงผิว ทำโดยการลดความชอบน้ำของเส้นใยลง เช่น การปรับปรุงผิวเส้นใยเซลลูโลสด้วย กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำให้เส้นใยมีสมบัติชอบน้ำลดลงซึ่งมีผลทำให้เส้นใยกระจายตัวใน พอลิเมอร์ได้ มากขึ้น สารเคลือบบางประเภทอาจทำให้เกิดสมบัติความชอบน้ำขึ้นที่พื้นผิวรอยต่อ ระหว่าง เฟสโดย พบว่าในกรณีที่ใช้สารไฮโดรเจนที่มีหมู่อะมิโน (Amino groups) เป็นหมู่ฟังก์ชันนัล เช่น อีพอกซี (Epoxy) และยูรีเทนไฮโดรเจน (Urethan silane) ถูกใช้เป็นสารรองพื้น (primer) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความไวต่อการเกิดชั้นระหว่างรอยต่อของเฟส เอมีนส่วนที่เหลือช่วยทำให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการเข้ากับสารเสริมแรงซึ่งชอบน้ำได้ดีขึ้น

2. การเชื่อมโยงทางเคมี

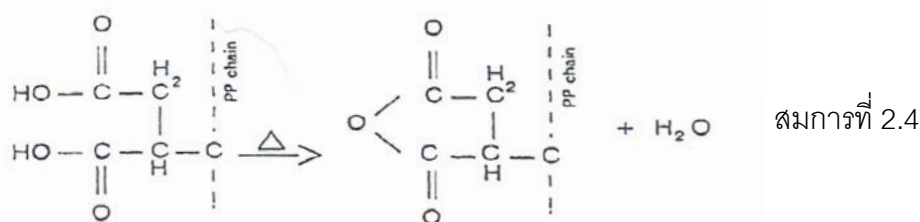
วิธีการดัดแปรด้วยวิธีทางเคมีที่สำคัญวิธีหนึ่ง คือ การเชื่อมโยงกันด้วยพันธะทางเคมีซึ่งมีส่วนในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเฟส พื้นผิวของเส้นใยถูกปรับปรุงด้วยสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสะพานของพันธะทางเคมีเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยธรรมชาติ

1. การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบกิ่ง (Graft copolymerization)

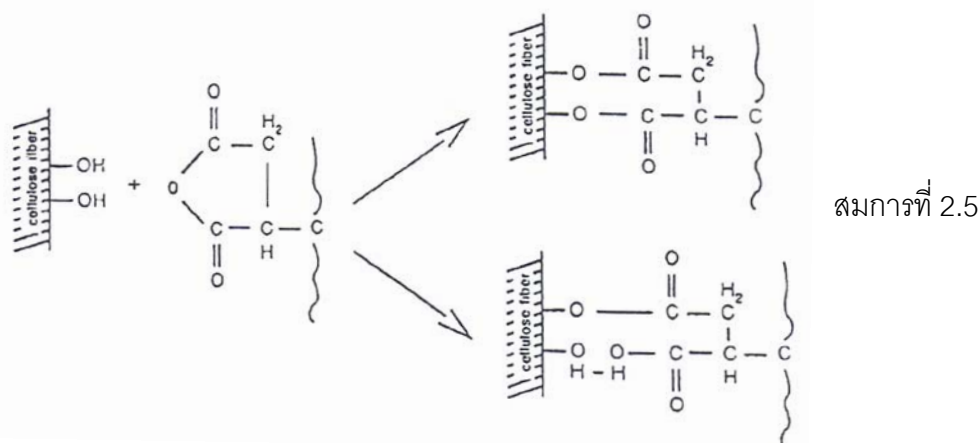
วิธีการทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบกิ่งเป็นวิธีการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการทำให้เส้นใยในเซลลูโลสเกิดอนุมูลอิสระขึ้น โดยการนำเส้นใย

เซลลูโลสมาแช่ในสารละลายที่มีอิออนและนำไปฉายรังสีที่มีพลังงานสูงมีผลทำให้โมเลกุลเซลลูโลสเกิดการแตกออกและอนุมูลอิสระถูกสร้างขึ้น หลังจากนั้นตำแหน่งอนุมูลอิสระของเซลลูโลสจะถูกตัดแปรด้วยสารละลายที่เหมาะสมเพื่อทำให้มันสามารถเข้าได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ตัวอย่างเช่น ไวนิลโมโนเมอร์ เมทิลเมทาครีเลต พอลิสไตรีน เป็นต้น โคพอลิเมอร์ที่ได้จะแสดงลักษณะของสมบัติทั้งของเส้นใยและพอลิเมอร์ที่นำมากราฟท์ตัวอย่าง การปรับปรุงผิวด้วยวิธีการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น การปรับปรุงผิวด้วยเส้นใยเซลลูโลสด้วยโคพอลิเมอร์ของพอลิพรอพิลีน-มาลิกแอนไฮไดรด์ (polypropylene-maleic anhydride, MAH-PP) ทำให้ร้อน ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส กลไกการเกิดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- กลไกการกระตุ้นโคพอลิเมอร์ด้วยความร้อน (อุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส) ก่อนนำมาปรับปรุงผิวเส้นใย เป็นดังสมการที่ 2.7



- กลไกการเกิดเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ของเซลลูโลส หมู่กรดแอนไฮไดรด์ของ MAH - PP เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย ดังสมการที่ 2.8 พันธะที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้การถ่ายเทความเค้นจากเมทริกส์ไปยังเส้นใยเกิดได้ดีนำไปสู่ความทนแรงดึงที่สูงขึ้น ส่วนสายโซ่ของ PP ที่มีอยู่ใน MAH-PP มีผลในการปรับปรุงความแตกต่างของพลังงานพื้นผิวโดยทำให้พลังงานพื้นผิวของเส้นใยมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับของพอลิพรอพิลีน ดังนั้น จึงมีผลทำให้ความสามารถในการเปียกและการยึดเกาะกันระหว่างเฟสดีขึ้น



2. การปรับปรุงผิวด้วยสารประกอบที่มีหมู่ของเมทานอล (Treatment with compounds which contain methanol groups)

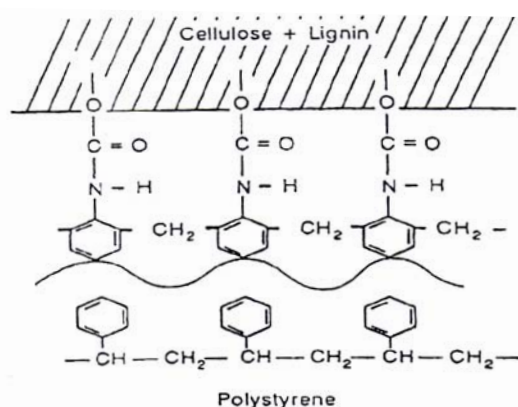
สารประกอบที่มีหมู่เมทานอล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) อยู่ภายในโครงสร้างสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์เซลลูโลสได้อย่างเสถียร ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเซลลูโลสได้ดี ตัวอย่างเช่น การนำเซลลูโลสมาปรับปรุงผิวด้วย เมทานอลเมลามีน (Methanolmelamine) หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมระหว่างเซลลูโลสและพอลิเอสเตอร์ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester, UP) พบว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยช่วยให้วัสดุดูดซับความชื้นลดลง เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมในขณะเปียกน้ำ

3. การปรับปรุงผิวด้วยสารไอโซไซยาเนต (Treatment with isocyanates)

ในวัสดุผสมที่มีพีวีซีหรือพอลิสไตรีน (PS) เป็นเมทริกซ์และใช้เส้นใยไม่เป็นสารเสริมแรงสามารถใช้วิธีการปรับปรุงผิวด้วยสารไอโซไซยาเนต เช่น การใช้พอลิเมทิลีน-พอลิฟีนิล-ไอโซไซยาเนต (Polymethylene-polyphenyl-isocyanate, PMPPIC) เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสด้วยพันธะโควาเลนต์ดังสมการที่ 2.9



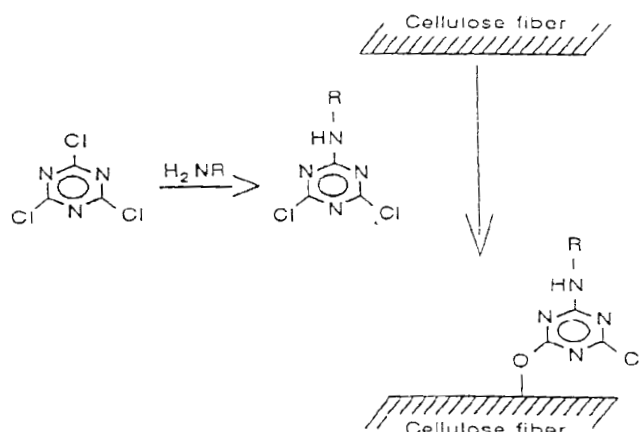
ในกรณีที่เมทริกซ์คือ PS อิเล็กตรอนตรงตำแหน่งพันธะ π ที่มีอยู่ในวงเบนซีนของ PMPPIC และ PS สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกันได้ ส่งผลให้สารทั้งสองมีแรงยึดเกาะระหว่างกันที่ดี ดังแสดงในสมการที่ 2.10



สมการที่ 2.6

4. การปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไตรอะซีน (Triazine coupling agents)

อนุพันธ์ของไตรอะซีนสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับเซลลูโลสได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.11 มีผลทำให้เส้นใยดูดซับน้ำน้อยลงเนื่องจากการลดลงของจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสทำให้เส้น ใย สามารถ เข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.7



สมการที่ 2.7

5. การใช้สารไซเลนที่มีหมู่ของสารอินทรีย์เป็นสารคู่ควบ (Organosilanes as coupling agents)

สารไซเลนทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยธรรมชาติได้ เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารไซเลนมีส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเปลี่ยนไป เป็นหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่เซลลูโลสได้และมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นการใช้สารไซเลนเป็นสารคู่ควบจึงมีผลทำให้พันธะระหว่างเฟสมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

2.8.3 การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยด่าง (Alkali treatment of natural fibers)

การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยด่าง (Mercerization) ตามมาตรฐาน ASTM D1965 ทำโดยการนำเส้นใยธรรมชาติใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้น เพื่อทำให้เส้นใยเกิดการบวมและกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยและในบางกรณีเช่น ปอกระเจา การแช่ในด่างมีผลทำให้ทั้งลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออก กระบวนการดังกล่าวนี้มีผลทำให้บริเวณระหว่างไฟบริลมีความหนาแน่นและความแข็งแรงลดลง ดังนั้นเมื่อเส้นใยถูกดัดยัดจึงมีผลทำให้ไฟบริลจัดเรียงตัวตามทิศทางแรงดึงได้มากขึ้น การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของไฟบริลมีส่วนทำให้เส้นใยสามารถ

รับแรงได้มากขึ้น นอกจากนี้การปรับปรุงผิวด้วยไฮดรอกไซด์ยังมีส่วนทำให้มุมการบิดเกลียวมีมุมลดลงส่งผลทำให้การส่งผ่านแรงเกิดได้ง่ายขึ้นเส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

2.9 สารคู่ควบประเภทสารไซเลน (Silane coupling agent)

สารไซเลนที่มีหมู่สารอินทรีย์ (Organofunctional silanes) คือสารไซเลนที่เป็นของผสมระหว่างซิลิคอนและสารอินทรีย์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์หรือเรซิน จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นหรือสารคู่ควบระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงที่เป็นพวกแร่ธาตุหรือเส้นใยธรรมชาติ

การทำหน้าที่ของสารคู่ควบไซเลน อาจแบ่งตามความหนาของชั้นผิวที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อเฟส ได้ดังนี้

1. สารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifier) ในทางทฤษฎีสารไซเลนอาจสร้างชั้นผิวเพียงชั้นเดียว (Monolayer) แต่ในทางปฏิบัติอาจสร้างได้หลายชั้น ซึ่งหน้าที่ของชั้นผิวเหล่านี้ คือการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมีเท่านั้นโดยไม่ได้แสดงสมบัติทางกลของพวกมันออกมา

2. สารรองพื้น (Primer) โดยทั่วไปมีความหนาของฟิล์มประมาณ 0.1-10 ไมครอน และต้องมีสมบัติทางกล เช่น ความทนแรงดึงและความเหนียวเพียงพอที่จะสามารถรับแรงในทางกลได้เมื่อวัสดุผสมได้รับความเค้น สารรองพื้นอาจเป็นชั้นฟิล์มของไซเลนที่ถูกไฮโดรไลซ์หรือเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกปรับปรุงด้วยสารไซเลน โดยปกติแล้วมักถูกผสมกับตัวทำละลายก่อนนำมาทาบนพื้นผิววัสดุเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

3. กาว (Adhesive) ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งเป็นตัวประสานพื้นผิวของวัสดุที่ไม่สามารถเข้ากันได้ให้ติดกัน ไซเลนบริสุทธิ์ถูกนำมาใช้เป็นการน้อยมาก นิยมนำโมโนเมอร์ของไซเลนมาผสมกับสารเสริมแรงหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวในการเตรียมวัสดุผสมมากกว่า

2.9.1 โครงสร้างทางเคมีของสารไซเลนโดยทั่วไป คือ X_3SiY

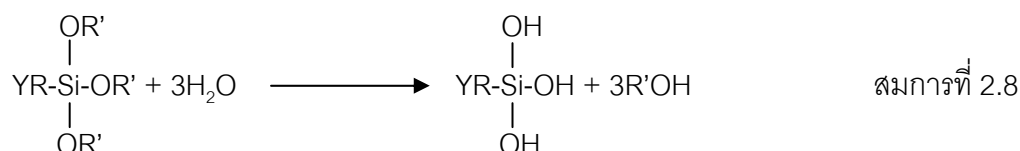
โดยที่ X คือ ตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysable groups หรือ Alkoxy groups) โดย X เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเกิดเป็นสารไซลานอล (Silanol) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลล์ลูโลสได้และสามารถทำปฏิกิริยาควบนั่นเองได้ (Self condensation)

Y คือ หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ (Organofunctional group) (Plueddemann, 1991)

2.9.2 กลไกการสร้างพันธะ

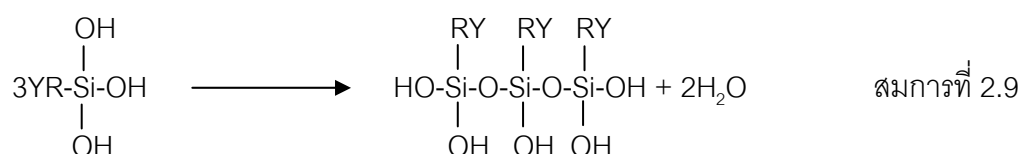
กลไกโดยทั่วไปของสารไฮเลนที่มีหมู่ Alkoxy ในการสร้างพันธะกับพื้นผิวของเส้นใยที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ



จากสมการที่ 1 แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารไฮเลนกับน้ำ โดยทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง ของหมู่ Alkoxy (X หรือ OR') เกิดเป็นสารไฮลานอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย

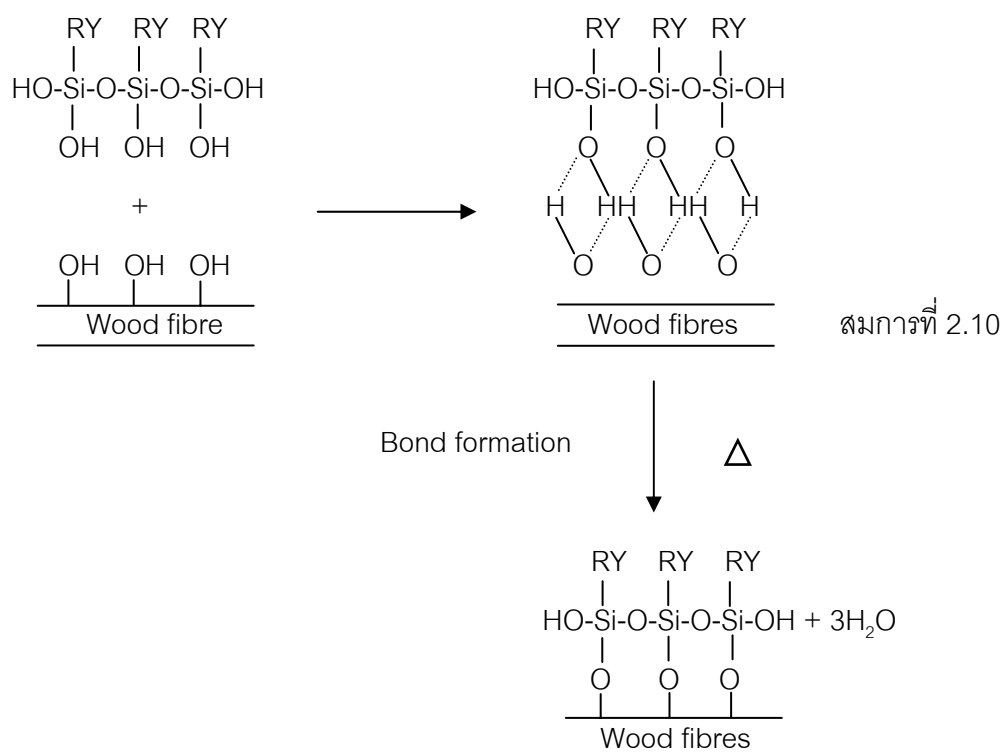
ขั้นตอนที่ 2: การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



จากสมการที่ 2 แสดงปฏิกิริยาการควบแน่นกันเองของสารไฮลานอล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย โดยทั่วไปแล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดียวกับของกรณีการเกิดไฮโดรไลซิส

ขั้นตอนที่ 3: การสร้างพันธะระหว่างสารไฮลานอลและเส้นใยเซลลูโลส

จากสมการที่ 3 แสดงการสร้างพันธะระหว่างสารไฮลานอลและเส้นใย โดยการสร้างพันธะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะกรดหรือเบส เพื่อเร่งให้กลไกการสร้างพันธะเกิดได้เร็วขึ้น และให้ความร้อนในระหว่างการทำปฏิกิริยา นอกจากการทำปฏิกิริยาของไฮลานอลกับหมู่ไฮดรอกซิลของพื้นผิวเส้นใยแล้วยังมีการสร้างพอลิไซลอคเซนเกิดขึ้นด้วย



ขั้นตอนที่ 4: การเกิดแรงกระทำระหว่างกันของพอลิเมอร์และสารไซเลน

ในขั้นตอนนี้พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ สามารถเข้ากับเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยลดลงและสารไซเลน ณ ตำแหน่ง Y ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์หรือมีความสามารถในการเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น

2.9.3 การปรับปรุงผิวซีลด้วยสารอะมิโนไซเลน

กรณีเตรียมความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนักผงไม้ โดยมีวิธีการ ดังนี้

1. เริ่มจากการนำผงไม้ไปอบในตู้อบ ณ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
2. ทำการเตรียมสารละลายอะมิโนไซเลนที่มีความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก เตรียมโดยการหยดสารอะมิโนไซเลนลงในน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน (Deionized water) และมีการเติมกรดอะซิติก (Acetic acid) ลงไป 1% โดยน้ำหนัก กวนสารละลายด้วยแท่ง กวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction)

3. นำผงไม้ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมาแล้วแช่ในสารละลายที่เตรียมได้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ผงไม้ดูดซับสารละลายได้อย่างสม่ำเสมอ

4. นำผงไม้ที่ผสมกับสารละลายอะมิโนไซเลนแล้วมาอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

Yam และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมวัสดุผสมที่ได้จากการนำขดนมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) มาผสมกับเส้นใยต้นแอสเทิน โดยทำการศึกษเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวกับเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนและผ่านการปรับปรุงด้วยอะเซทิเลต โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่า ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง แต่ส่งผลให้ค่ามอดุลัสเพิ่มสูงขึ้นและพบว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงมีผลให้วัสดุผสมมีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงยังคงมีปริมาณลิกนินและไซจากธรรมชาติหลงเหลืออยู่มาก ซึ่งมันมีส่วนช่วยทำให้เส้นใยกระจายตัวในสารเมทริกซ์ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วได้และจากการศึกษาผลของรูปร่างสกรูและอุณหภูมิการทำคอมปาวด์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม พบว่า รูปร่างของสกรูที่มีช่วงเวลาการผสมนานขึ้นต้องใช้อุณหภูมิการทำคอมปาวด์ต่ำลง เนื่องจากการใช้เวลานานอาจเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนทำให้วัสดุผสมที่ได้มีสีคล้ำ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติจะสูญเสียความแข็งแรง ณ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และการใช้อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ลิกนินอาจเริ่มเกิดการสลายตัว

Maldas, D. และ Kokta, B.V. (1991) ได้ทำการศึกษาผลของการทำแผ่นปาร์ติเคิลที่ใช้พีวีซี (PVC) พอลิสไตรีน (PS) หรือพอลิสไตรีนเกรดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) เป็นตัวประสาน (Binder) กับเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ ซึ่งแยกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ปรับปรุงผิวด้วยไอโซไซยาเนต และไม่ได้ปรับปรุงผิว พบว่ากรณีที่ปรับปรุงผิวด้วยไอโซไซยาเนต ทำให้ได้แผ่นปาร์ติเคิลที่มีคุณสมบัติทางกลดีกว่ากรณีที่ไม่มี การปรับปรุงผิว ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ขึ้น มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และพบว่าการใช้พีวีซีเป็นตัวประสานมีผลทำให้ได้แผ่นปาร์ติเคิลที่มีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด

Matuana, L.M. และคณะ (1997) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณพลาสติกไซเซออร์ (DOP) และการปรับปรุงผิวของเส้นใยที่มีต่อสัดส่วนของโพรง (Void fraction) ในวัสดุผสมโฟมพีวีซีเส้นใยไม้ พบว่าในกรณีที่เส้นใยปราศจากการปรับปรุงผิว จะมีผลทำให้แรงยึดเกาะกับวัสดุผสมโฟมพีวีซีต่ำลง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแรงยึดเกาะ และก๊าซสามารถแพร่จากวัสดุผสมไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ ส่วนวัสดุผสมโฟมพีวีซี /เส้นใยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิว เมื่อเพิ่มปริมาณ DOP มีผลทำให้สัดส่วนของโพรงเพิ่มขึ้นแต่การใช้ DOP ปริมาณมากเกินไปอาจไปกระตุ้นให้เกิดการสูญเสียก๊าซส่งผลให้สัดส่วนของโพรงลดลง

Matuana, L.M. และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการยึดติดกันระหว่างพีวีซีและไม้อัด ที่นำมาเคลือบติดกันโดยในการศึกษาได้ทำการเตรียมผิวไม้อัดโดยเคลือบด้วยสารอะมิโนซิลเลน (Aminosilane), สารไดคลอโรไดเอทิลซิลเลน (Dichlorodiethylsilane), ฟาทาลิกแอนไฮไดรราย (Phthalicanhydride) หรือพอลิพรอพิลีนมาลิกแอนไฮไดรราย เพื่อเป็นการปรับปรุงผิว ทำการวัดแรงดึงผิว และวัดการยึดติดกันของพีวีซีและไม้อัด พบว่าการยึดติดกันระหว่างพีวีซีและไม้อัดซึ่งวัดจากค่าความแข็งแรงเฉือนที่เกิดจากการดึง (Tensile shear strength) ของไม้อัด 2 แผ่นที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มพีวีซีแล้วนำมาเชื่อมติดกัน ในกรณีที่ไม้อัดถูกเตรียมผิวด้วยสารอะมิโนซิลเลน ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดระหว่างพีวีซีและไม้อัดให้ดีขึ้น แต่สารคู่ควบตัวอื่นที่นำมาไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงการยึดติดระหว่างพีวีซีและไม้อัดแต่อย่างใดและเมื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากค่าแรงดึงผิวกับการยึดติดแสดงให้เห็นว่าแรงดึงผิวไม่สามารถใช้ในการบ่งบอกค่าการยึดติดของพีวีซีและไม้อัดได้เสมอไป

Mtuana, L.M. (1998) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสมบัติความเป็นกรด-เบส ของพื้นผิวพีวีซีที่ผสมกับพลาสติกไซเซออร์และเซลลูโลสว่ามีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมอย่างไร กรณีเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวมีผลทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าต่ำ เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอและแรงยึดติดระหว่างพีวีซี และเส้นใยเซลลูโลสมีค่าต่ำ ทำให้การส่งถ่ายแรงระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยไม่ดีพอ และจากการศึกษาพบว่าค่า I_{sp} (เกี่ยวข้องกับ Acid-base interaction) ใช้ในการบ่งบอกแรงยึดติดระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยได้ โดยพบว่าเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารอะมิโนซิลเลนจะมีค่า I_{sp} สูงที่สุดและมีค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดครากจะมีค่าสูงสุด แต่ค่า Acid-base factor ไม่สัมพันธ์กับค่ามอดุลัสของแรงดึง ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดและค่าความทนแรงกระแทก โดยค่ามอดุลัสแรงดึงจะสูงขึ้นเนื่องจากการเติมเส้นใยลงไป ส่วนค่าความทนแรงกระแทกของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารอะมิโนซิลเลนจะมีค่าต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว เพราะแรงยึดติดระหว่างพีวีซีและเส้นใยที่ผ่านการปรับ

สภาพผิวด้วยสารอะมิโนไซเลนมีค่ามากกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวที่ทำให้วัสดุเปราะมากขึ้น

Mengelloglu, F. และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงแรงกระแทกในวัสดุผสมพีวีซีกับเส้นใยไม้ที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมโดยทำการศึกษาสารปรับปรุงแรงกระแทกทั้งหมด 3 ชนิด คือ คลอรีเนตพอลิเอทิลีน (CPE) ที่มีปริมาณคลอรีน 36% เมทิลเมทาครีเลต-บิวทาไดอีน-สไตรีน (MBS) และสารปรับปรุงแรงกระแทกประเภทอะคริลิก และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารปรับปรุงแรงกระแทก 0, 5, 10, 15 และ 20 phr จากผลการศึกษาพบว่า การเติมสารปรับปรุงแรงกระแทกลงในวัสดุผสมทำให้ค่าความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการยืดตัว ส่วนความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารปรับปรุงแรงกระแทกทั้ง 3 ชนิด แต่สารปรับปรุงแรงกระแทก MBS และสารปรับปรุงแรงกระแทกประเภทอะคริลิกมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงแรงกระแทกใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าสูงกว่า CPE ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิการขึ้นรูปที่สูงหรือการได้รับความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปเป็นเวลานานมีผลทำให้รูปร่างที่เป็นโครงร่างตาข่าย (Network morphology) ของ CPE มีลดลง

Matuana, L.M. และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาสมบัติ การสลายตัวด้วยแสง (Photodegradation) ของพีวีซีชนิดแข็ง และวัสดุผสมที่ทำมาจากพีวีซีชนิดแข็งกับเส้นใยไม้ของต้นเมเปิล และทำการศึกษาผลของการเติม Rutile titanium dioxide (TiO_2) ซึ่งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพต่อการถูกกระตุ้นด้วยแสง (Photoactive stabilizer) โดยใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบพีวีซีและวัสดุผสมพีวีซี/เส้นใยไม้ก่อนและหลังการทดสอบความทนต่อสภาพอากาศ วัสดุผสมพีวีซี/เส้นใยไม้จะมีพีคของ C=O (Carbonyl group) ที่ 1731 cm^{-1} มีความเข้มสูงกว่าของพีวีซี ซึ่งก่อนและหลังการทดสอบ พบว่าความแตกต่างของความเข้มของพีควัสดุผสมมีค่าสูงกว่ากรณีของพีวีซี และผลการตรวจสอบด้วยวิธีการวัดด้วยสีก๊ิบพบว่าวัสดุผสมมีการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าพีวีซี แสดงว่าเส้นใยไม้ซึ่งมีหมู่สารให้สี เช่น การที่มีหมู่คาร์บอนิลจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดความไวต่อแสง (Sensitizer) ที่มีประสิทธิภาพส่งผลให้พีวีซีซึ่งเป็นส่วนของเมทริกซ์เกิดการสลายตัวด้วยรังสียูวีอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาการเติม Rutile titanium dioxide ซึ่งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพต่อการถูกกระตุ้นด้วยแสงจากผลการตรวจสอบด้วยวิธี FTIR และการวัดการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่า Rutile titanium dioxide จะปรับปรุงสมบัติความมีเสถียรภาพต่อแสงของวัสดุผสมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมันจะเข้าไปต่อต้านการเกิดการสลายตัวด้วยแสงโดยการทำให้การเกิด Polyene linkage เกิดได้ช้าลง

Mohd. Ishak, Z.A. และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาผลของการนำวัสดุผสมพอลิพรอพิลีนกับเกลบที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแช่ในน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 30 และ 90 องศาเซลเซียส ว่ามีผลอย่างไรต่อสมบัติความทนแรงดึง พบว่า มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึง และค่ามอดุลัสมีแนวโน้มลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการยืดตัวของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมีผล ทำให้พันธะระหว่างเฟสลดลง และส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเกลบเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถสังเกตพบได้อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิสูง (90 องศาเซลเซียส) และเมื่อนำวัสดุผสมที่ผ่านการแช่น้ำแล้วมาทำการอบแห้ง พบว่าไม่สามารถทำให้สมบัติความทนแรงดึงมีค่ากลับคืนได้ เพราะน้ำมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของเกลบถูกทำลายอย่างถาวรจึงมีผลทำให้เกลบมีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงลดลง

Sombatsompop, N. และ Phromchirasuk, C. (2004) ทำการศึกษถึงการนำฟิวรีซีมาผสมกับซีลี้อยู่ด้วยกระบวนการอัดรีดและทำการผลิตในอัตราส่วนของซีลี้อยูที่เพิ่มขึ้นจาก 0.0-41.2% โดยน้ำหนักและมีการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว พบว่า ค่ามอดุลัสความต้านแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีลี้อยูเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและการโค้งงอมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีลี้อยู และพบว่าซีลี้อยูปริมาณ 33.3% โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการทำการผลิต เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดีและไม่เกิดปัญหาวัสดุไหม้ระหว่างกระบวนการผลิต จากนั้นทำการศึกษาถึงผลของสารช่วยขึ้นรูป (Processing aide) และสารหล่อลื่น (Lubricant) ในวัสดุเชิงประกอบและซีลี้อยู

Sombatsompop, N. และ Chaochanchaikul, K. (2004) ทำการศึกษาลักษณะของปริมาณซีลี้อยู และปริมาณความชื้น (2005) ในผงซีลี้อยู่ก่อนการผสมและการปรับปรุงผิวซีลี้อยู่ด้วยสารอะมิโนไซเลนที่มีต่อสมบัติด้านการผสม สมบัติทางกลและความร้อนของวัสดุเชิงประกอบฟิวรีซีกับซีลี้อยูพบว่า ปริมาณซีลี้อยูมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีอัตราการบวมตัวลดลงและสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง ในช่วงที่มีปริมาณซีลี้อยู 0.0-16.7% โดยน้ำหนัก เนื่องจากพันธะระหว่างเฟสที่ไม่แข็งแรง และการกระจายตัวของซีลี้อยูที่ไม่สม่ำเสมอ ในกรณีที่มีปริมาณซีลี้อยู มากกว่า 16.7% โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติทางกลมีแนวโน้ม ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ปริมาณซีลี้อยูที่เพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่มีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง ส่วนผลของปริมาณความชื้น พบว่า ปริมาณความชื้นตั้งแต่ 1.0% โดยน้ำหนักขึ้นไปมีผลทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง โดยเกิดการ หลุดลอกของผิวและเกิดฟองอากาศขึ้นภายในเนื้อชิ้นงาน ส่วนสมบัติทางความร้อน พบว่า ปริมาณ

ความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้พีวีซีในวัสดุเชิงประกอบมีความเสถียรทางความร้อนลดลง แต่ไม่มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวซีลด้วยสารอะมิโนไซเลน พบว่า การเติมสารอะมิโนไซเลนมีผลต่อค่าแรงบิดเฉลี่ยขณะผสมโดยเฉพาะในสัดส่วนที่มีปริมาณซีล 41.2% โดยน้ำหนัก โดยพบว่าไซเลนมีผลทำให้ค่าแรงบิดเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูง แต่เริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อ ปริมาณไซเลนมากกว่า 1.0% โดยน้ำหนักซีลและในกรณีสมบัติทางกล พบว่า ปริมาณอะมิโนไซเลนที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติความต้านแรงดึงและแรงกระแทกที่ดี คือ ปริมาณ 0.5-1.0% โดยน้ำหนักซีล และ 1.5% โดยน้ำหนักซีล ตามลำดับ และจากผลของสมบัติทางกล พบว่า การเติมสารอะมิโนไซเลนในกรณีปริมาณซีลน้อยพบว่า มีผลกระทบมากกว่าปริมาณซีลเยอะมาก และการปรับปรุงผิวซีลด้วย KBM603 ช่วยทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติความต้านแรงดึงที่ดี

Djadjelli, H. และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมพีวีซี/ผงไม้จากต้นมะกอกซึ่งมีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ (DOP) ลงไป 30 phr ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบทำโดยการนำส่วนผสมทั้งหมดมาปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูงและนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการรีดขึ้นรูป (Calendering) ณ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการยึดติดกันระหว่างเฟสที่ไม่ดี ส่วนความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผงไม้มีความเปราะมากกว่าพีวีซี ดังนั้น ถ้าในวัสดุผสมมีปริมาณผงไม้มากขึ้นจึงส่งผลทำให้วัสดุผสมมีความเหนียวน้อยลง อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพีวีซีไม่เกิดการเปลี่ยนเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มมากขึ้นและจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA และ DSC พบว่า วัสดุผสมมีเสถียรภาพทางความร้อน ณ อุณหภูมิที่ไม่เกิน 210 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถขึ้นรูปวัสดุผสมพีวีซี/ผงไม้ได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปเดียวกับที่ใช้กับพีวีซี โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปไม่เกิน 210 องศาเซลเซียส

Stark, N.M. และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของผงไม้ และเปรียบเทียบผลของการใช้ผงไม้และเส้นใยไม้ที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิพรอพิลีน/ไม้ ทั้งกรณีที่มีการปรับปรุงผิวด้วย MAPP และไม่ได้ปรับปรุง จากผลการศึกษาพบว่า ผงไม้ที่มี L/D ratio ที่สูงกว่ามีผลทำให้วัสดุผสมมีค่าความทนแรงดึง ค่าความต้านทานการโค้งงอ และค่ามอดุลัสของทั้งคู่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าพลังงานความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีรอยบาก (Notched impact energy) มีค่าสูงขึ้น เมื่ออนุภาคของผงไม้มี

ขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าผงไม้ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีผลทำให้วัสดุผสมมีค่าการขยายของรอยแตกวิกฤต (Critical crack propagation) สูงขึ้นแต่ผลของค่าพลังงานความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบาก (Unnotched impact energy) มีค่าลดลง เมื่อขนาดอนุภาคของผงไม้ใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคไม้ที่ใหญ่ขึ้นยิ่งทำให้วัสดุผสมมีบริเวณที่มีความเค้นสูง (Stress concentration) มากขึ้น โดยเกิดขึ้นตลอดแนวรอยต่อระหว่างเฟสของผงไม้และพอลิพรอพิลีน ส่วนการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่ใช้ผงไม้และเส้นใยไม้ที่ผ่านการกลั่นภายใต้แรงดันไอน้ำ ซึ่ง มีขนาด 40 mesh เท่ากัน พบว่า วัสดุผสมที่ใช้เส้นใยไม้มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานการโค้งงอสูงกว่าผงไม้ แต่ค่าความสามารถในการยึดตัวและค่าความทนต่อแรงกระแทกไม่แตกต่างกันมากนัก