

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

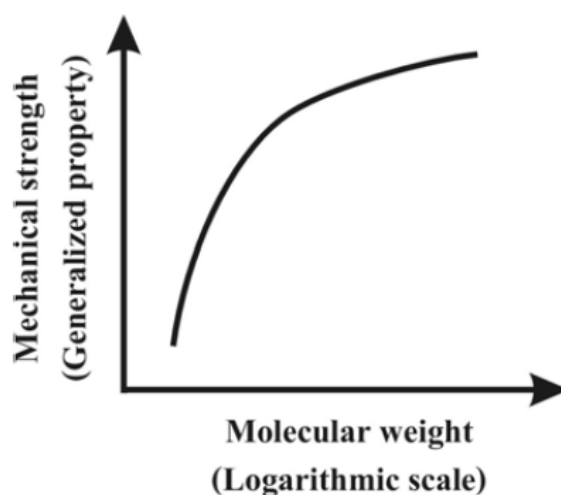
2.1 พีวีซี (poly(vinyl chloride), PVC)

พีวีซีหรือพอลิไวนิลคลอไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสมบัติอยู่ในช่วงกว้างซึ่งขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ประกอบอยู่ในสูตรของสารคอมพาวด์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีสามารถถูกนำไปใช้งานได้ในรูปแบบที่หลากหลาย

สูตรโครงสร้างทางเคมีของพีวีซี คือ
$$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\underset{|}{\text{CH}}} \right]_n$$

สมบัติทางกลของพีวีซี [14]

สมบัติทางกลของพีวีซีนั้นเป็นสมบัติที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายตัวแปรด้วยกัน ณ ที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะตัวแปรหลักๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของพีวีซี เท่านั้น นั่นคือ บทบาทของน้ำหนักโมเลกุล สารพลาสติกไซเซอร์ ดิกรีการหลอมตัว และผลของการบ่ม (annealing) ทั้งกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติทางกลของพีวีซี พบว่า น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มมากขึ้น และจากกราฟพบว่า ณ ช่วงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ น้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีมีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกล แต่เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูง การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำหนักโมเลกุลที่มากขึ้นมีผลทำให้พีวีซีไหลได้ยากขึ้น ความสามารถในการขึ้นรูปลดลง พีวีซีจึงเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนมีมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้พีวีซีมีสมบัติทางกลที่ลดลง ดังนั้นในการเลือกพีวีซีมาผลิตชิ้นงานจึงควรเลือกพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมโดยต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลที่ต้องการและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี



รูปที่ 2 ผลของน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกล [14]

ส่วนการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในพีวีซีมีผลทำให้พีวีซีมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และ

เปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่แข็งและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำกลายเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวมีความสามารถในการยึดตัวสูงขึ้น แต่มีความทนแรงดึงต่ำลง ดังนั้นการนำพลาสติกไฮดรอกซีมาใช้ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จะช่วยปรับปรุงสมบัติในการไหลตัวของพีวีซีให้ดีขึ้น ทำให้สามารถนำพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกลของพีวีซีอย่างมาก คือ ดัชนีการหลอมตัวของพีวีซี Gothan และ Hitch ได้ทำการศึกษาความต้านทานต่อการล้าของพีวีซีที่หลอมตัวเข้ากันดีเปรียบเทียบกับพีวีซีที่หลอมตัวไม่ดี พบว่า พีวีซีที่หลอมตัวดีมีความสามารถในการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร (cycle) ได้ดีขึ้น Menges และ Borndsten ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับความทนแรงกระแทกของพีวีซีที่มีการใช้พอลิเอทิลีน/พอลิไวนิลอะซิเตต (polyethylene/polyvinyl acetate, EVA) เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส มีสมบัติความทนแรงกระแทกมากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิ 180 และ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า อนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) ของพีวีซีสามารถหลอมรวมเข้ากับพอลิเอทิลีน/พอลิไวนิลอะซิเตตได้ดีกว่า ส่วนผลของการบ่มชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพีวีซีทั้งกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เช่นในงานวิจัยของ Shinozaki และคณะ พบว่า การบ่มชิ้นงานพีวีซีที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว) เป็นเวลา 20 นาที มีผลทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น 15 % และความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง 40 % ทั้งนี้เป็นเพราะการบ่มมีผลทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่วนงานวิจัยของ Illers ได้รายงานผลของการนำชิ้นงานพีวีซีไปบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน มีผลทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเกือบ 400 % จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกลของพีวีซี คือ น้ำหนักโมเลกุลของพีวีซี สารเติมแต่งที่มีอยู่ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์ และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป

สารเติมแต่งของพีวีซี [15-17]

สารเติมแต่งมีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซี เนื่องจากผลิตภัณฑ์พีวีซีสามารถผลิตให้มีสมบัติที่หลากหลายได้ สามารถผลิตเป็นวัสดุที่มีความแข็งหรืออ่อนนุ่มได้ ขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่เลือกใช้ นอกจากนี้พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพและสารหล่อลื่น

1. สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant)

สารหล่อลื่นภายในเป็นสารหล่อลื่นที่สามารถผสมเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง (viscosity reduction) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการไหลดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์ลงด้วยซึ่งมีผลทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในระหว่างการได้รับแรงเฉือนมีลดลง (reduction of heat dissipation) แต่สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ (heat distortion temperature) ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นในการเติมสารหล่อลื่นจึงควรเติมในปริมาณน้อยๆ (โดยทั่วไปประมาณ 0.3-3 %) สารหล่อลื่นภายในของพีวีซี เช่น fatty acid esters, glycerol esters ส่วน fatty acid salt โดยเฉพาะ calcium stearate สามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก

2. สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant)

สารหล่อลื่นภายนอกเป็นสารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (friction-reducing effect) ช่วยลดการเกิดความร้อนที่มากเกินไป การเกิดเป็นฟิล์มของสารหล่อลื่นชั้นระหว่างพื้นผิวโลหะและพอลิเมอร์ช่วยลดการเกาะติดระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (release effect) และยังช่วยป้องกันการเกิดการเสีรูปของพอลิเมอร์หลอม (prevention of melt fracture) เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นมีผลทำให้อัตราการเลื่อนผ่านผนังโลหะของพอลิเมอร์ (wall slippage) มีเพิ่มมากขึ้น และด้านการเกาะติดของพอลิเมอร์ที่ผนัง (stick-slip effect) สารหล่อลื่นภายนอกของพีวีซีเช่น paraffin wax, polyethylene wax เป็นต้น

3. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน หรือหน่วงให้เกิดช้าลง โดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน หรือการดูแลเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซีโดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิอินทำให้ความยาวของพอลิอินสั้นลง สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซี ได้แก่สารประกอบตะกั่ว สารประกอบดีบุก แคดเมียม แบเรียม เช่น tribasic lead sulphate, calcium stearate, zinc stearate เป็นต้น

4. สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV stabiliser)

แสงยูวีเป็นองค์ประกอบหนึ่งของแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก แสงยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-400 nm ซึ่งแสงยูวีเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้พีวีซีเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (photodegradation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 310-320 nm ดังนั้นการนำพีวีซีไปใช้งานกลางแจ้งอาจต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงลงไปด้วย สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงที่ใช้กับพีวีซี แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ สารดูดซับแสงยูวีประเภทสารอินทรีย์ (organic UV absorber) สารกรองแสงยูวีประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic UV-screening agent) และสารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ (free-radical scavengers)

5. สารช่วยขึ้นรูป (processing aids)

สารช่วยขึ้นรูปส่วนใหญ่ถูกใช้ในพีวีซีชนิดแข็งเป็นหลัก สารช่วยขึ้นรูปมีหน้าที่ช่วยทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปมีมากขึ้น โดยมีส่วนช่วยทำให้พีวีซีสามารถหลอมตัวได้ง่ายขึ้น มีอัตราการผลิตที่เร็วขึ้น พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยขึ้นรูปของพีวีซี เช่น สารช่วยขึ้นรูปพวกออะคริลิก ABS SAN copolymer

6. สารปรับปรุงแรงกระแทก (impact modifier)

สารปรับปรุงแรงกระแทกมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ทำให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกของพีวีซีถูกปรับให้ดีขึ้นโดยการเติมยางลงไปซึ่งยางที่เติมลงไปนั้นไม่สามารถเข้ากันได้กับพีวีซีเมทริกซ์ จึงพบว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเป็นสองเฟส เมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทกในช่วงแรกเมทริกซ์จะดูดซับแรงเอาไว้ หลังจากนั้นจึงส่งผ่านแรงไปยังเฟสของยางยางทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการกระแทกเอาไว้ทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะ

7. สารเพิ่มเนื้อ (filler)

สารเพิ่มเนื้อเป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความแตกต่างจากเมทริกซ์ทั้งในด้านองค์ประกอบและโครงสร้าง สารเพิ่มเนื้อส่วนใหญ่เป็นพวกละอองอินทรีย์ สารเพิ่มเนื้อถูกเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อและลดต้นทุน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์อีกด้วย สารเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ในพีวีซี คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) เป็นสารเพิ่มเนื้อที่มีความสมดุล

ระหว่างราคาถูก และยังคงสมบัติทางกลและทางกายภาพของพีวีซีเอาไว้ แคลเซียมคาร์บอเนตมีแหล่งกำเนิดมาจากซากของสัตว์หรือเปลือกหอยในทะเลที่ทับถมกัน ชอล์ก (chalk) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในพีวีซีมากที่สุด ซึ่งชอล์กประกอบด้วยผลึกของหินปูนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างหลวมๆ แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อสมบัติของพีวีซีหลายประการ เช่น ปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก ทำให้ผิวชิ้นงานมีความมันเงามากขึ้น มีความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดมากขึ้น ความทนแรงดึงสูงขึ้น ค่ามอดุลัสของอีลาสติคสูงขึ้น เป็นต้น

การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี [15, 18-19]

ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยปกติแล้วพีวีซีนั้นไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากพลังงานจำเพาะ (specific energy) ที่ใช้ในการทำให้พีวีซีหลอมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 20 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล และ 25.9 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล ด้วยเหตุนี้ในการขึ้นรูปพีวีซีจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในพีวีซีด้วย

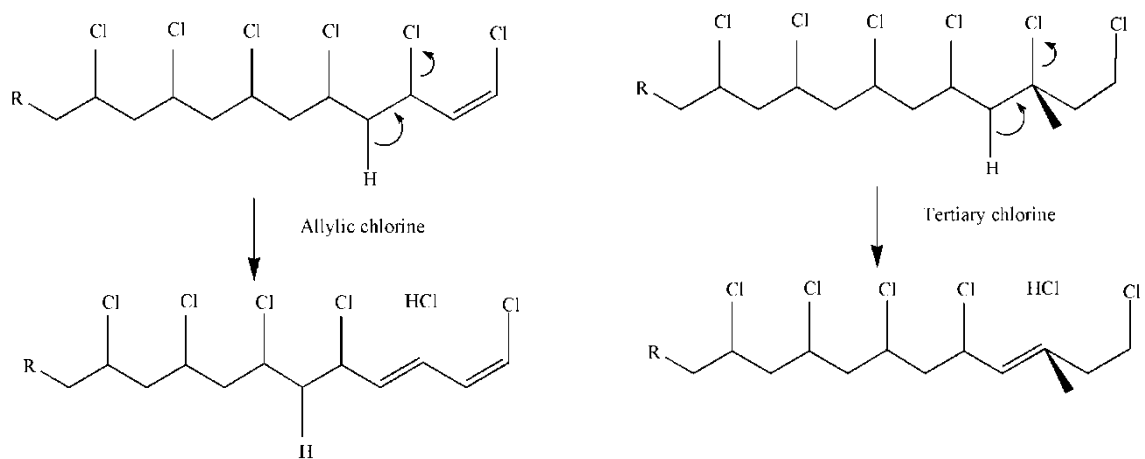
การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน (Dehydrochlorination reaction)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงปานกลาง (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริกขึ้น กรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดเร็วขึ้น คือ มันทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (auto-catalyst) เช่นเดียวกับกรดตัวอื่นๆ พีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่ผิดปกติในพอลิเมอร์ซึ่งพวกมันทำหน้าที่กระตุ้นให้พันธะระหว่างคลอรีนและคาร์บอนสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ (labile structure) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการดีไฮโดรคลอรีเนชัน โครงสร้างที่ผิดปกติ เช่น ส่วนที่หลุดจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปลายสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว พันธะไม่อิ่มตัวภายในสายโซ่ กิ่งก้านของสายโซ่ โครงสร้างที่ต่อกันแบบหัวต่อหัว และโครงสร้างที่เกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดดีไฮโดรคลอรีเนชัน มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 คือ คลอรีนที่ทำพันธะกับคาร์บอนที่เป็นส่วนของกิ่ง (tertiary chlorine) ประมาณ 70-80 % และกรณีคลอรีนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งของพันธะคู่ภายในสายโซ่ (internal allylic chlorine) อีกประมาณ 10-15 % การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันที่เกิดจากโครงสร้างที่ผิดปกติเหล่านี้มีขั้นตอนการเกิดดังรูปที่ 4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเริ่มต้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของโครงสร้างที่มีความผิดปกติ ส่วนกรณีที่โมโนเมอร์ต่อกันด้วยรูปแบบปกติการเกิดดีไฮโดรคลอรีเนชันเริ่มต้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยเกิดขึ้นในแบบสุ่ม (random) พันธะคู่แบบ conjugated หรือ polyene sequence ถูกสร้างขึ้นภายในสายโซ่ของพีวีซีขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนและคลอรีนหลุดออกจากสายโซ่ หรือเรียกว่า unzipped ผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปถูกแสดงในรูปที่ 5

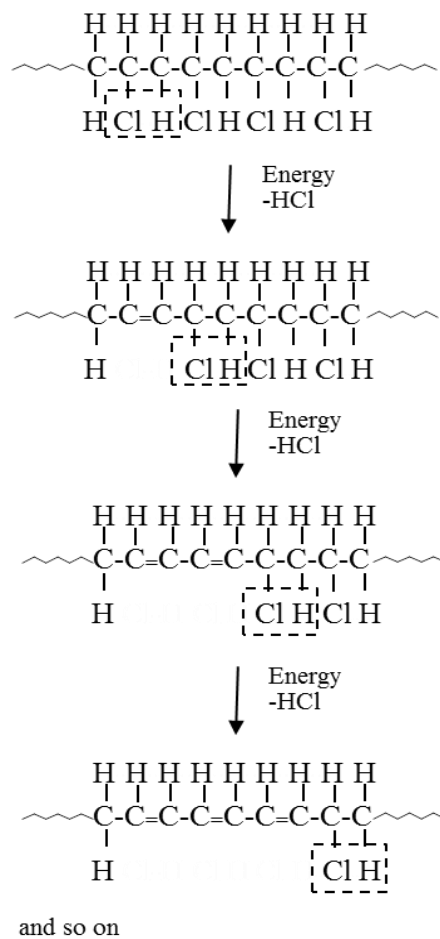


รูปที่ 3 จุดบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ในสายโซ่พีวีซี [19]

- (a) Internal allylic chloride
- (b) tertiary chloride



รูปที่ 4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอรีนชันที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ผิดปกติของพีวีซี [18]



รูปที่ 5 การเสื่อมสภาพของพีวีซีที่เกิดขึ้นแบบสลุ่่มที่พบในสายโซ่พีวีซีแบบปกติ [18]

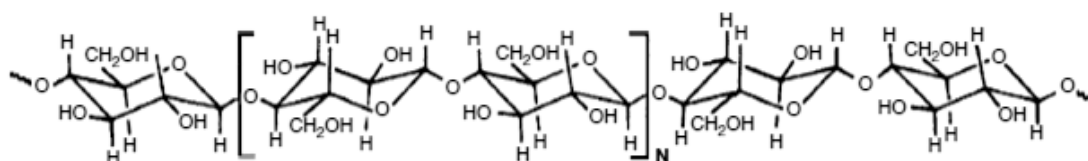
2.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณมาก คือ ไม้ ไม้ถูกจัดว่าเป็นพวกวัสดุผสม (composite) ประเภทพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารสกัดและเถ้า โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินนั้นถือเป็นส่วนของเปลือกด้านนอกทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง

องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [20-23]

1. เซลลูโลส (Cellulose)

องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ไม้ คือ เซลลูโลส โดยมีอยู่ประมาณ 40-50 % ในไม้แห้ง เซลลูโลสเป็นพอลิโอสแซคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของ β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- β -glucosidic bonds ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี

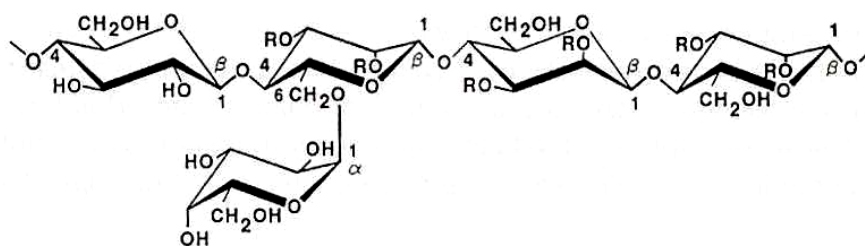


รูปที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [23]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรโอสแซคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่ง เฮมิเซลลูโลสมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 20-30 % เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose D-galactose D-xylose L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4- β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ อัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของเซลลูโลสโดยธรรมชาติแล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีอัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันประมาณ 200 เท่า นั้น ในไม้สามารถมีเฮมิเซลลูโลสที่มีส่วนประกอบในโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ เช่น ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส ชนิด galactoglucomannans อยู่ประมาณ 20 % และมี

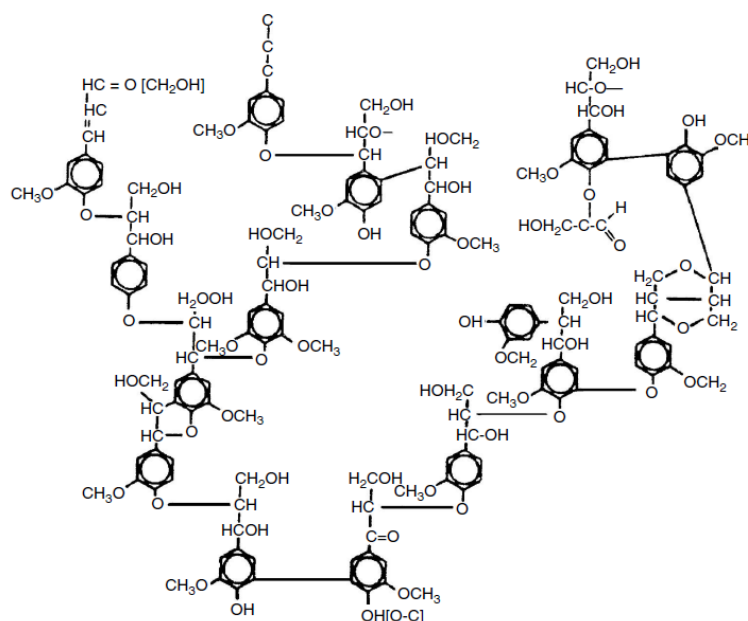
Arabinoglucuronoxylan ประมาณ 5-10 % เป็นต้น **รูปที่ 7** เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 7 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [20]

3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมากและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 18-30 % โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่ไม่มีลิกนินอยู่ที่ชั้นผิวของผนังเซลล์ เนื่องจากไม้มีปริมาณของลิกนินอยู่มากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ ที่มาจากพืชจึงทำให้ไม่มีความแข็งแรงสูง ลิกนินสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ลิกเนส (lignase) หรือลิกนินเนส (ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในเรา โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงใน**รูปที่ 8**



รูปที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [23]

4. สารสกัดและเถ้า (Extractives and Ash)

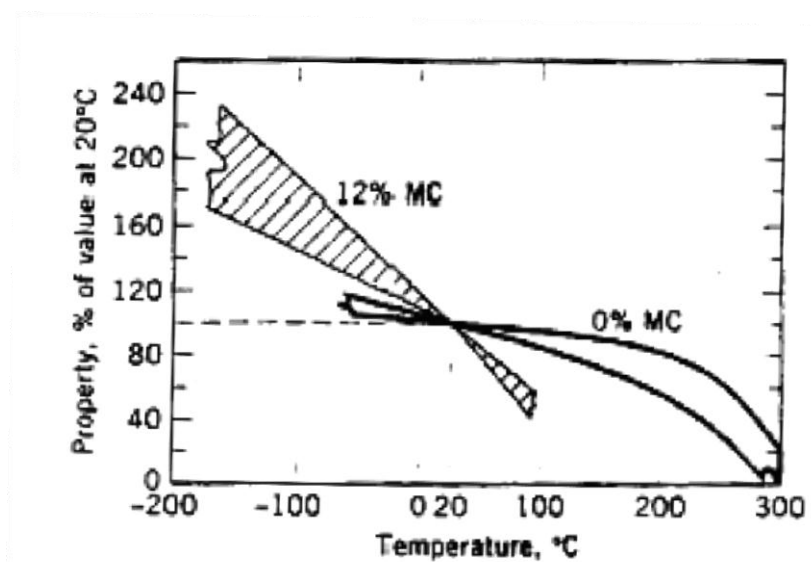
ปริมาณสารสกัดมีอยู่ในไม้ประมาณ 5-20 % โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลากหลายชนิดสารสกัดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไม้ เช่น สี กลิ่น ความต้านทานต่อการเน่าเปื่อย เป็นต้น ส่วนเถ้ามีอยู่

ประมาณ 0.2-2 % โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของเถ้าในไม้ คือ แคลเซียม โพแทสเซียม และปริมาณเล็กน้อยของธาตุแมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก

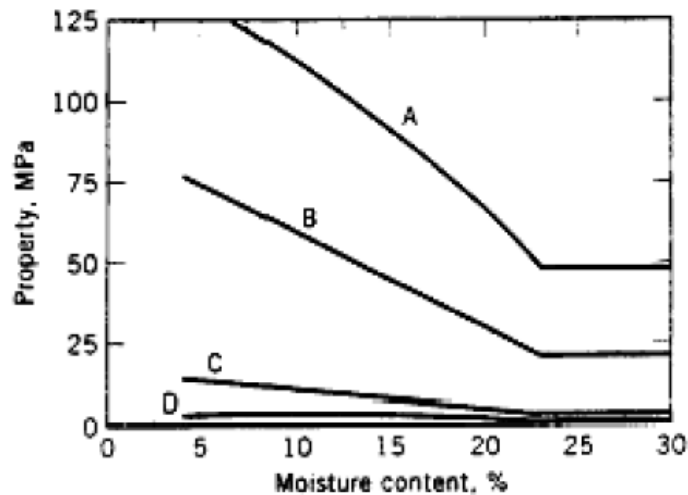
สมบัติทางกลของไม้ [20-22]

สมบัติทางกลของไม้ ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบหลายประการ ดังนี้

1. ชนิดของไม้: ไม้ต่างชนิดกันอาจมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณของเนื้อไม้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ไม่เท่ากัน เช่น ต้นโอ๊กซึ่งเป็นไม้ที่มีน้ำหนักมาก มีความแข็งแรงและความคงรูปร่างมากกว่าต้นสนซึ่งจัดเป็นไม้ที่มีน้ำหนักเบา
2. สัดส่วนขององค์ประกอบที่มีอยู่ในไม้: องค์ประกอบที่มีอยู่ในไม้นั้นว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางกลของไม้ ไม้ที่มีสัดส่วนของเซลลูโลสมาก มีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงมากกว่าไม้ที่มีสัดส่วนของเซลลูโลสน้อย เนื่องจากเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง
3. สภาวะแวดล้อมของการนำไปใช้งาน: อุณหภูมิและปริมาณความชื้นล้วนแล้วแต่มีผลต่อสมบัติทางกลของไม้ โดยสมบัติทางกลของไม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมันถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 9 และไม้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อไม้มีปริมาณความชื้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ามอดุลัสของไม้ (แถบความกว้างของเส้นกราฟแสดงถึงช่วงเปราะบางของผล และ MC คือ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในไม้) [22]



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความแข็งแรงในด้านต่างๆ ของไม้และปริมาณความชื้นภายในไม้ โดย A คือ โมดูลัสของการแตกหัก B คือ โมดูลัสของการกดอัดในทิศทางที่ขนานกับเกรน C คือ โมดูลัสของการกดอัดที่ตั้งฉากกับเกรน และ D คือ โมดูลัสของแรงดึงที่ตั้งฉากกับเกรน [22]

2.3 วัสดุผสม [24]

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากของผสมที่ประกอบด้วยส่วนผสมหรือเฟสตั้งแต่ 2 เฟสหรือมากกว่านั้น มีลักษณะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้การพิจารณาว่าวัสดุเป็นวัสดุผสมหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากหลัก 3 ประการ ดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องมีอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากกว่า 5 %
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุผสมจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีของพลาสติก ถึงแม้จะมีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นและเหตุผลในทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุผสม
- ส่วนผสมต้องไม่ผสมกลืนกันเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งแยกเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบของวัสดุผสม สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีสัดส่วนที่มาก และอยู่ในลักษณะต่อเนื่องโดยปกติแล้วสมบัติของเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยส่วนผสมตัวอื่นที่นำ เข้ามาผสมรวมด้วย
2. สารเสริมแรง (reinforcement, reinforcing phase) คือ ส่วนผสมที่ทำหน้าที่ส่งเสริมสมบัติทางกลของเมทริกซ์ให้ดีขึ้น รูปร่างของสารเสริมแรงมีผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรง โดยปกติสารเสริมแรงมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรืออนุภาค

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม

- สัดส่วนของส่วนผสม (volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสม เป็นดังแสดงในสมการที่ 1

$$\chi_c = \chi_m \nu_m + \chi_f \nu_f \quad (1)$$

โดยที่ χ_c	คือ สมบัติของวัสดุผสมที่ต้องการทราบ
χ_m	คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์
χ_f	คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง
V_m	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์
V_f	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (interface) ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย
- รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์
- สมบัติของส่วนผสมเอง

ความแข็งแรงระหว่างเฟส

ความแข็งแรงระหว่างเฟส มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุผสม เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเฟสที่แข็งแรงสามารถทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ มีการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังสารเสริมแรงได้โดยผ่านทางพื้นผิวระหว่างเฟส

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงระหว่างเฟส คือ

1. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุผสมในสถานะหนึ่งที่เมทริกซ์สามารถไหลได้ และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว ความสามารถในการเปียก ณ ที่นี้อธิบายเกี่ยวกับความสามารถที่ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถแพร่ขยายไปบนพื้นผิวของของแข็ง (สารเสริมแรง) ความสามารถในการเปียกที่ดี หมายความว่าของเหลว (เมทริกซ์) สามารถไหลไปบนพื้นผิวของสารเสริมแรงปกคลุมไปทั่วทุกตำแหน่งที่ไหลไปกระทบ ณ ตำแหน่งพื้นผิวที่ไม่เรียบของสารเสริมแรง ของเหลวสามารถไหลเข้าไปแทนที่อากาศทั้งหมดได้ การเปียกเกิดขึ้นได้ถ้าความหนืดของเมทริกซ์ไม่สูงมากเกินไปและถ้าการเปียกนั้นส่งผลทำให้ค่าพลังงานอิสระ (free energy) ของระบบลดลง การกระจายตัวของของเหลวที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ต้องมีสมการเป็นดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \gamma_{SL} dA + \gamma_{LG} dA < \gamma_{SG} dA \quad (2)$$

$$\text{หรือ} \quad \gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG} \quad (3)$$

โดยที่ γ_{LG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ

γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

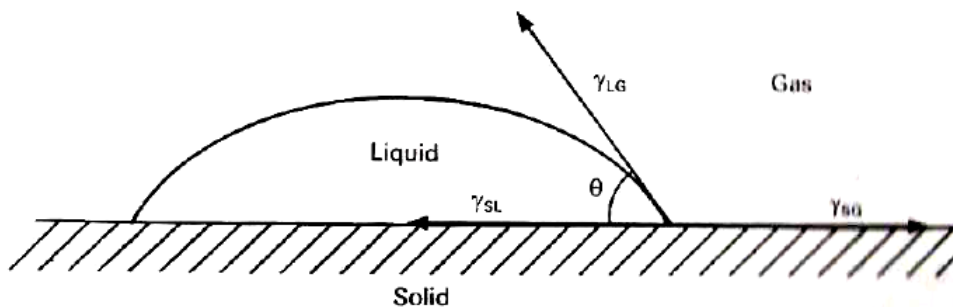
γ_{SG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและก๊าซ

dA คือ พื้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับของเหลว

สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (spreading coefficient, SC) เป็นดังสมการที่ 4

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (4)$$

เมทริกซ์สามารถเปียกสารเสริมแรงได้ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 11 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น [24]

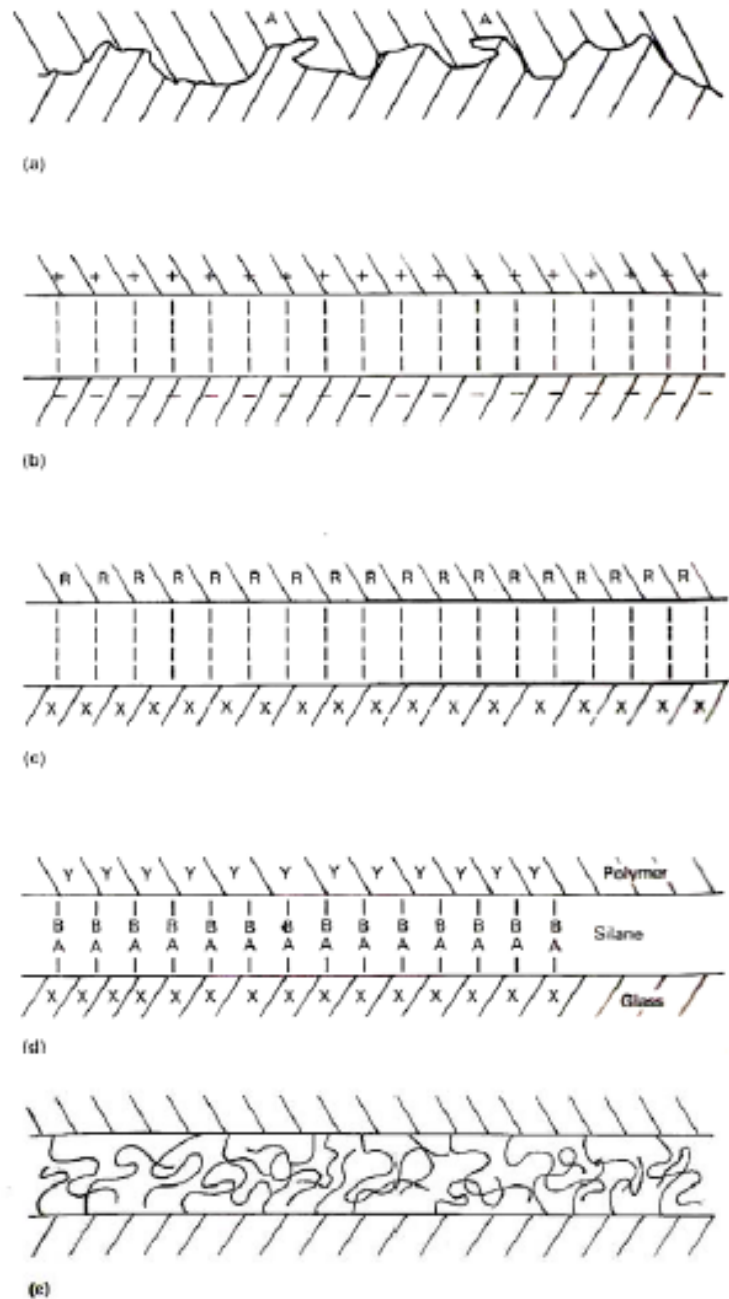
จากรูปที่ 11 ค่ามุมสัมผัส (contact angle) มีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \theta < 180^\circ$ และองศาของการเปียกมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อมุม θ ลดลง และถ้ามุม $\theta > 90^\circ$ มักถือว่าของเหลวไม่สามารถเปียกของแข็งได้

2. การยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial bonding)

เมื่อเมทริกซ์สามารถสัมผัสกับสารเสริมแรงหรือเปียกสารเสริมแรงนั้นทำให้มีพันธะระหว่างเฟสเกิดขึ้น พันธะชนิดต่างๆ อาจถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่น พันธะทางเชิงกลและทางไฟฟ้า และกลไกของพันธะสามารถเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่หลากหลาย เช่น ในกรณีที่มีการนำสารคู่ควบ (coupling agent) มาใช้ในการปรับปรุงผิว

1. พันธะทางเชิงกล (mechanical bonding)

การเชื่อมต่อกันในทางเชิงกล (mechanical interlocking หรือ keying) ของสองพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 12(a) ลักษณะของพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสยังมีความขรุขระมากขึ้น ยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยการหดรัดตัวของเมทริกซ์บนสารเสริมแรงยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลเกิดได้ง่ายขึ้น พันธะทางเชิงกลจะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อระหว่างเฟส ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นความแข็งแรงของการได้รับแรงเฉือน แต่ถ้าได้รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างเฟส หรือการที่รอยต่อได้รับแรงดึง ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เว้นเสียแต่ว่า ณ บริเวณรอยต่อนั้นมีลักษณะของพื้นผิวรอยต่อคล้ายกับบริเวณ A ในรูปที่ 12(a) จำนวนมากๆ ซึ่งมีมุมแบบวกกลับเข้าไปข้างใน (re-entrant angle)



รูปที่ 12 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส [24]

- (a) mechanical bonding
- (b) electrostatic bonding
- (c) chemical bonding
- (d) chemical bonding as applied to a silane coupling agent
- (e) interdiffusion bonding

2. พันธะที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic bonding)

ไฟฟ้าสถิตย์เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่มีพื้นผิวที่มีประจุแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 12(b) จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น แรงกระทำ ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในระยะทางการจัดเรียงของอะตอมในช่วงสั้นๆ เท่านั้น การปนเปื้อน ณ บริเวณผิวและการที่มีก๊าซถูกดักไว้ที่ผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกลไกดังกล่าวลดลง

3. พันธะทางเคมี (chemical bonding)

พันธะทางเคมีเกิดขึ้นจากหมู่ทางเคมีของเมทริกซ์และสารเสริมแรงสามารถเข้ากันได้ ดังแสดงในรูปที่ 12(c) ความแข็งแรงของพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับ ปริมาณหรือจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ และชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้เมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่มีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารคู่ควบ เช่น สารไซเลน (silane) ซึ่งมีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้าได้กับเมทริกซ์และสารเสริมแรงอยู่ภายในโครงสร้างโมเลกุล มันจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 12(d)

4. พันธะที่เกิดจากการแพร่เข้าหากัน (interdiffusion bonding)

พันธะนี้เกิดขึ้นจากการที่สายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าหากันและทำให้เกิดการพันกันขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงในรูปที่ 12(e) ความแข็งแรงของพันธะนี้ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของการพันกัน ชนิดและจำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการพันได้

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Arbelaiz, A. และคณะ (2005) [11] ได้ทำการศึกษาลงของการนำชิ้นงานวัสดุผสมพอลิพรอพิลีนและเส้นใยแฟลกซ์แช่น้ำที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง พบว่า สมบัติทางกลของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติและการยึดเกาะระหว่างเฟส

Stark, N.M. และ Matuana, L.M. (2007) [2] ได้ทำการศึกษาลงของกระบวนการขึ้นรูปที่มีการเชื่อมสภาพของชิ้นงานวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ พบว่า ชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (extrusion process) มีการสูญเสียเนื้อไม้ออกจากผิวชิ้นงานมากกว่ากรณีชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection process)

Ndiaye, D. และคณะ (2008) [12] ได้อธิบายว่าการมีอยู่ของผงไม้ในวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเกิดโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ของ HDPE แต่ผงไม้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสงในช่วง UV-VIS ซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของการเชื่อมสภาพของ HDPE

Du, H. และคณะ (2010) [13] ได้ทำการศึกษาลงของการเติมผงสีที่มีต่อการเชื่อมสภาพทางแสงของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ พบว่า การเติมผงสีมีส่วนช่วยในการปกป้องการเชื่อมสภาพของ HDPE เนื่องจากแสงยูวี

Chaochanchaikul, K. และ Sombatsompop, N. (2011) [1] ได้ทำการศึกษาลงของการปรับปรุงการเชื่อมสภาพเนื่องจากแสงของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้โดยการใช้ Tinuvin P และ Tinuvin XT833 และไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสงทั้ง 3 ชนิดมีส่วนช่วยในการปรับปรุงการเชื่อมสภาพเนื่องจากแสงให้กับวัสดุผสม โดยสารเพิ่มเสถียรภาพที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ Tinuvin P