

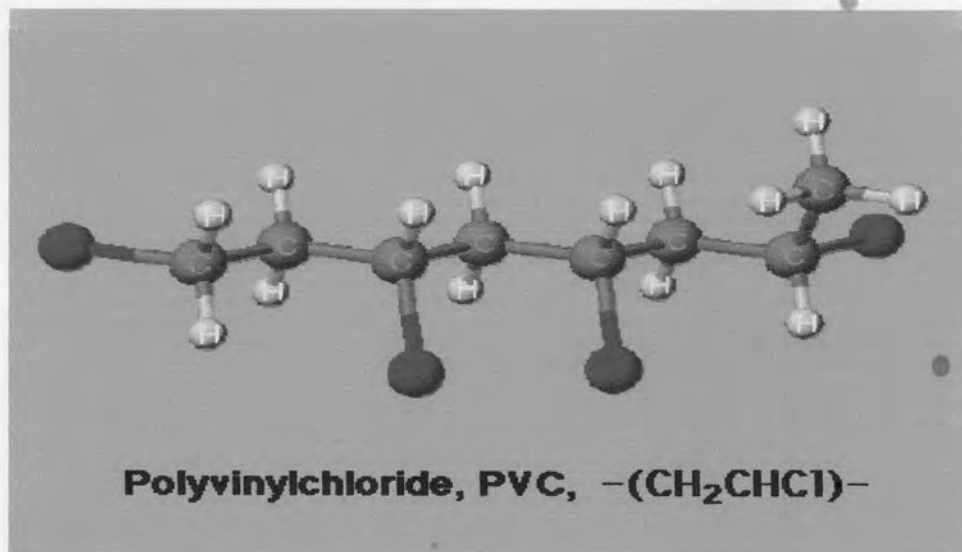
บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

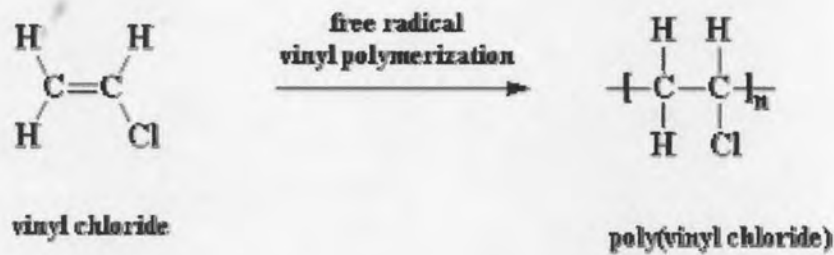
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ [Poly(vinyl chloride), PVC] [1-10]

พีวีซีเป็นพลาสติกที่มีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในด้านงานก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า ของใช้ในบ้าน งานบรรจุภัณฑ์ งานทำหนังเทียม และงานด้านเกษตรกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มพีวีซียังมีบทบาทสำคัญต่อสภาพสังคมและการดำรงชีวิตในปัจจุบัน เพราะสามารถอำนวยความสะดวกทั้งด้านการเกษตร การถนอมอาหาร การห่อสินค้า และทำเป็นสิ่งของเครื่องใช้อื่นๆ อีกมากมาย

พีวีซีในทางการค้าเป็นเทอร์โมพลาสติกอสัณฐานที่มีความเป็นผลึก 5-10% โดยทั่วไปมอนอเมอร์จับตัวกันแบบ head-to-tail ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และมีโครงสร้างเป็นแบบอะแทกติก (atactic) แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำๆ ความเป็นผลึกจะเพิ่มมากขึ้น โดยมีโครงสร้างเป็นแบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic) มากขึ้น แต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic) ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพีวีซี [11]



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พียูซี [11]

พียูซีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ท่อ ขวด ฉนวนหุ้มสายไฟ และหนังเทียม ไม่ได้ผลิตจากผงพียูซีเพียงอย่างเดียว แต่จะผสมสารเติมแต่งอีกหลายชนิดเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามต้องการ เช่น พลาสติกไฮเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ เป็นต้น ซึ่งต้องผสมสารเหล่านี้ให้เป็นเนื้อเดียวกับพียูซีก่อนทำการผลิตขั้นต่อไป

พียูซีที่ยังไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ มีสมบัติ ดังนี้ :

- แข็ง เปราะ แตกง่าย เป็นพลาสติกอสัณฐาน
- ไม่มีสีใส
- มีความหนาแน่นประมาณ 1.4 g/cm^3
- มี $T_g = 87^\circ\text{C}$ และ $T_m = 212^\circ\text{C}$
- เมื่อติดไฟจะสามารถดับได้ด้วยตัวเอง
- สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและแสงแดด จึงจำเป็นต้องใส่สารเพิ่มเสถียรภาพ

2.1.1 กระบวนการผลิตพียูซี

กระบวนการผลิตพียูซีเรซินโดยทั่วไป มี 4 แบบ ดังนี้

1. การผลิตแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) พียูซีที่ถูกนำไปใช้งานส่วนใหญ่ถูกผลิตด้วยกระบวนการนี้ และจะมีขนาดอนุภาคเหมาะกับการใช้งานทั่วไป ซึ่งในระบบของกระบวนการผลิตประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (vinyl chloride monomer, VCM)
- สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายในมอนอเมอร์

- สารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) พร้อมการกวนเพื่อทำให้มอนอเมอร์กระจายตัวเป็นหยดเล็กๆ และป้องกันการรวมตัวของมอนอเมอร์ โดยทั่วไปสารช่วยกระจายตัวจะเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะเกิดภายในหยดมอนอเมอร์จนกลายเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ โดยแต่ละหยดจะเป็นอิสระต่อกันตลอดปฏิกิริยา แต่อาจมีการจับกันเป็นก้อนของอนุภาคพอลิเมอร์และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้เป็น slurry ที่มีอนุภาคของพอลิเมอร์แขวนลอยอยู่ในน้ำ และจะตกตะกอนอย่างรวดเร็วถ้าไม่มีการกวน ส่วนของน้ำจะถูกกำจัดโดยการกรองและสารช่วยกระจายตัวถูกล้างออกโดยใช้น้ำล้างที่ผิวหน้า พีวีซีที่ได้มีอนุภาคขนาดใหญ่ (40-50 μm) ถ้าจับคู่จะเป็นเม็ดที่ไม่ละเอียดมากนัก ใช้ขึ้นรูปโดยวิธีรีดด้วยลูกกลิ้ง (calendering)

2. การผลิตแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ในระบบของกระบวนการผลิตประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM)
- สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำ (water-soluble initiator)
- อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ซึ่งโครงสร้างมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ลาเท็กซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคของพีวีซีกระจายในน้ำ เรียกว่า primary particle ซึ่งอนุภาคมีขนาดเล็กมาก (0.2-1.5 μm) ถ้านำไปอบแห้งจะได้ผงที่มีเนื้อละเอียดคล้ายแป้ง เมื่อผสมกับพลาสติกไซเซอร์จะได้ paste ลักษณะคล้ายแป้งเปียก ข้อเสีย คือ มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ และค่าใช้จ่ายสูง

3. การผลิตแบบ Microsuspension polymerization เป็นเทคนิคกึ่ง emulsion และ suspension ในระบบของกระบวนการผลิตประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM)
- อิมัลซิฟายเออร์
- สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายในมอนอเมอร์

วัตถุดิบถูกผสมในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ซึ่งใช้แรงกลอัดเพื่อให้ได้หยดมอนอเมอร์ที่มีขนาดเล็กมากในน้ำ (0.05-1.5 μm) ภายในหยดมอนอเมอร์มีสารเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่ และ

ขนาดของ primary particle จะถูกกำหนดก่อนเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (ซึ่งต่างจากวิธีแบบอิมัลชัน) สารที่ได้จะถูกถ่ายไปยังหม้อหนึ่งอัตโนมัติหนึ่งเพื่อทำการพอลิเมอไรซ์ที่อุณหภูมิคงที่ และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดจะได้ลาเท็กซ์ซึ่งมีการกระจายขนาดของ primary particle ที่สม่ำเสมอ (0.05-1.5 μm) สำหรับการทำให้แห้ง และการบดจะเหมือนการผลิตแบบอิมัลชัน

4. การผลิตแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ตอนเริ่มต้นมีเพียงมอนอเมอร์และสารเริ่มปฏิกิริยาเท่านั้น ผลผลิตที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง และไม่มีสารเจือปน แต่มีข้อเสีย คือ ควบคุมอุณหภูมิของ ปฏิกิริยาได้ยาก และเมื่อเกิดพอลิเมอร์มากขึ้นทำให้มีความหนืดสูง ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง นอกจากนี้ ยังควบคุมขนาดของพีวีซีได้ยาก และการกำจัดมอนอเมอร์ที่เหลือทำได้ยาก

2.1.2 สารประกอบพีวีซี (PVC compounds)

พีวีซีเรซินยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน จำเป็นต้องปรับปรุงให้ มีความทนความร้อน เพราะเมื่อได้รับความร้อนระดับ 150-200°C ในระหว่างการขึ้นรูปจะแตกสลายได้ง่าย และเปลี่ยนจากสีขาว เป็น เหลือง ส้ม น้ำตาล และดำ การใช้สารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน (heat stabilizers) จะทำให้พีวีซี คงสภาพเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานๆ ในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ยังมีการใช้ สารเติมแต่งอื่นๆ เช่น พลาสติไซเซอร์ (plasticizers) สารหล่อลื่น (lubricants) สารตัวเติม (fillers) และผงสี (pigments) เป็นต้น

พีวีซีเรซิน (PVC resin)

ลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว การแบ่งเกรดอาศัยความหนืดเมื่อนำไปละลายใน cyclohexanone โดยมีมาตรฐานกำหนดค่าแทนความหนืด เรียกว่า K-value ซึ่งเป็นตัวเลขไม่มีหน่วย แต่มีตารางเปรียบเทียบ K-value กับค่าความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) โดย K-value แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุล และมีความ สัมพันธ์กับความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$(\text{Log } \eta_{\text{rel}})/C = 75K^2/(1+1.5 KC) + K$$

โดย η_{rel} = ความหนืดสัมพัทธ์, C = ความเข้มข้นของสารละลาย

พีวีซีเรซินที่มี K-value สูง แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูง ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่ง K-value ยังอาจแสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ด้วย กล่าวคือ ถ้ามี K-

value สูง ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และ K-value ยังบอกถึงความอ่อนนุ่ม ความแข็ง และความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ถ้ามี K-value สูง ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงและมีความแข็งมาก ถ้ามี K-value ต่ำจะมีความแข็งแรงน้อย และมีความนิ่มมาก ซึ่งการแบ่งพีวีซีเรซินตามค่า K เป็นดังนี้

พีวีซีเรซินที่มี K-value ต่ำ	คือ ต่ำกว่า 60
พีวีซีเรซินที่มี K-value ปานกลาง	คือ 60-70
พีวีซีเรซินที่มี K-value สูง	คือ ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป

ในการขึ้นรูปพีวีซีเรซินนั้น K-value มีความสำคัญ เพราะถ้าผลิตภัณฑ์เป็นพีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC) จะเลือกใช้พีวีซีที่มี K-value 59-60 เพราะต้องการ K-value สูงพอที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง แต่ถ้า K-value สูงมากกว่านี้จะขึ้นรูปไม่ได้ เพราะพีวีซีชนิดแข็งไม่ได้ใส่พลาสติกไซเซอร์หรือใส่น้อยมาก ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง และทำให้มีแรงเค้นเกิดขึ้นมาก จะทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัว (decompose) เสียก่อน ส่วนพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (flexible PVC) ใช้พีวีซีเรซินที่มี K-value แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นกับว่าต้องการนำไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทไหน ถ้าต้องการทำชั้นฟองน้ำ จะใช้พีวีซีเรซินที่มี K-value ต่ำ ประมาณ 60 เพราะชั้นฟองน้ำไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก แต่ต้องการความนิ่มมาก และต้องการให้พีวีซีเรซินหลอมตัวพอดี ซึ่งพีวีซีเรซินที่มี K-value 55-70 จะนิยมใช้งานกันมาก เนื่องจากมีความแข็งแรงพอเหมาะและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers) [5]

เป็นสารเติมแต่งซึ่งผสมกับพีวีซีเรซินเพื่อปรับปรุงให้สามารถทนความร้อน (heat stabilizer) และแสง (light stabilizer) โดยเฉพาะความร้อนในระหว่างการผลิต และรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ซึ่งมีพลังงาน (71-95 kJ/mol) เพียงพอที่ทำให้พันธะ C-C, C-Cl และ C-H แตกออก ซึ่งพีวีซีจะสลายตัวโดยสูญเสียอะตอมของคลอรีนไปเป็น HCl และถ้าสูญเสียมากๆ จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง → น้ำตาล → ดำ การป้องกันทำโดยเติมสารเพิ่มเสถียรภาพพวกเกลือของโลหะหนัก (heavy metal) หรือสบู่ของโลหะหนัก (heavy metal soap) เป็นตัวจับ HCl ที่หลุดออกจากโมเลกุล ทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิดตามราคา และความปลอดภัยในการใช้งาน ได้แก่ สารประกอบตะกั่ว ดีบุก และกลุ่มแคดเมียมแบบเรียบ แคดเซียม เช่น Ca-stearate, Zn-stearate, tribasic lead sulphate ปริมาณการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพจะประมาณ 1-5 %

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) [5, 6]

เป็นสารช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพีวีซี และทำให้ T_g ลดต่ำ กว่าอุณหภูมิห้อง โดยเข้าไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพีวีซี ทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น พลาสติกไซเซอร์ต้องมีจุดเดือดสูงเพื่อไม่ให้ระเหยได้ง่าย และต้องเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ พลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (primary plasticizer) และ พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer)

พลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิที่นิยมใช้กันมากเป็นประเภทฟทาเลตเอสเทอร์ (phthalate ester) (มากกว่า 50%) ซึ่งได้แก่

- ได-2-เอทิลเฮกซิลฟทาเลต [di(2-ethylhexyl) phthalate, DEHT หรือ dioctyl phthalate, DOP] นิยมใช้มากที่สุดกับพีวีซี มีอัตราการระเหยปานกลาง มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทนน้ำได้ดี และช่วยให้ผลิตภัณฑ์อ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำได้ดี แต่มีผลอ่อนๆ ต่อการทำให้เกิดโรคมะเร็ง

- ไดไอโซนิลฟทาเลต (di-isononyl phthalate, DINP) เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้รวมตัวกับพีวีซีได้ต่ำกว่า และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า มีการระเหยน้อยกว่าและความหนาแน่นต่ำกว่า จึงทำให้ DINP ที่ผลิตส่วนใหญ่สามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

- บิวทิลเบนซิลฟทาเลต (butyl benzyl phthalate, BBP) เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้มีการรวมตัวกับพีวีซีได้ดีมาก มีอัตราการระเหยต่ำกว่า DBP และมีประสิทธิภาพต่ำกว่า DOP

- ไดบิวทิลฟทาเลต (dibutyl phthalate, DBP) สามารถ ระเหยได้ค่อนข้างง่าย จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้

พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ หรือเอ็กซ์เทนเดอร์ (extenders) เป็นสารที่ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้แก่

- อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon)
- คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons)
- อีพอกซีพลาสติกไซเซอร์ (epoxy plasticizer)

สารหล่อลื่น (Lubricants) [4, 7]

เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในพีวีซีเรซินเพื่อป้องกันไม่ให้พีวีซีติดกับผนังของเครื่องจักร ในขณะที่ผ่านกระบวนการผลิต ช่วยลดความเสียดทาน (friction) ช่วยให้ไหลง่ายขึ้น มีความสำคัญมากกับงานอัดรีด (extrusion) นอกจากนี้ ยังหล่อลื่นระหว่างเนื้อพีวีซีกับพีวีซีด้วยตัวเองเพื่อควบคุมอัตราการหลอมตัว และควบคุมการไหลของพีวีซีในเครื่องจักร สารเพิ่มเสถียรภาพบางชนิดทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นใน PVC compound ได้ด้วย

สารหล่อลื่นแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล
- สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลและเครื่องจักรที่พีวีซีไหลผ่าน

สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Fillers) [6, 8]

เป็นของแข็งที่ใส่ในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ฟิลเลอร์ที่ใช้เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิต เรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extender) หรือ inert filler ส่วนฟิลเลอร์ซึ่งใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อน เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือ active fillers และ ฟิลเลอร์เสริมแรง เรียกว่า (reinforcing fillers) ฟิลเลอร์ที่ใช้ในพีวีซี ได้แก่

- แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) มีความหนาแน่นประมาณ 2.7 g/cm^3 ซึ่งอาจมีชนิดที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก (stearic acid) ไว้บนผิว ซึ่งเรียกว่า activated whiting การเติม calcium carbonate มากเกินไปเพื่อลดต้นทุนการผลิต จะทำให้คุณภาพของท่อพีวีซีต่ำลง โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพจะเสียไป

- ดินขาวเคลดิน (Kaolin) เป็น aluminium silicate มีความหนาแน่นประมาณ 2.2 g/cm^3 ส่วนใหญ่ใช้กับพีวีซีที่ทำฉนวนหุ้มสายไฟ

- ซิลิกา (silica) มีความหนาแน่น $2.2\text{-}2.3 \text{ g/cm}^3$ มีสมบัติช่วยเสริมแรง ทำให้มีความคงรูปที่อุณหภูมิสูง ลดการหดตัว และเพิ่มสมบัติทางความร้อน

- ทัลค์ (talc) เป็น magnesium silicate มีความหนาแน่น $2.5\text{-}2.8 \text{ g/cm}^3$ มีสมบัติช่วยเสริมแรง มีสมบัติผลก้นน้ำ (repellency) และลื่น (good slip property) เพิ่มความเฉื่อยต่อเคมีภัณฑ์ ความร้อนและความชื้น

- ใยหิน (asbestos) เป็น Ca/Mg silicate มีความหนาแน่น 2.2-2.3 g/cm³ มีสมบัติช่วยเสริมแรง ทำให้มีความคงรูปที่อุณหภูมิสูง
- วอลลาสโทไนต์ (wollastonite, CaSiO₃) มีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.9 g/cm³ มีสมบัติช่วยเสริมแรง ทำให้มีความคงรูปที่อุณหภูมิสูง และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
- คาร์บอนแบล็ก (carbon black) มีความหนาแน่น 2.04-2.25 g/cm³ มีสมบัติช่วยเสริมแรง ช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า และสามารถดูดกลืนแสงยูวีได้
- อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide) มีความหนาแน่น 2.4 g/cm³ ช่วยเพิ่มสมบัติทนไฟ
- ผงไม้ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความตึงผิว

ผงสีหรือสีสำเร็จรูป (pigments or dyes) [4]

การผลิตสีในพีวีซีเนื่องจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ท่อพีวีซีแข็งของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้กำหนดสีตามประเภทของการใช้งาน เช่น สีฟ้า สีเหลือง และสีเทา เป็นต้น ซึ่งจะแบ่งเป็นผงสีอินทรีย์ (organic pigment) และผงสีอนินทรีย์ (inorganic pigment) เช่น TiO₂ ให้สีขาวและช่วยให้ทึบแสง ช่วยให้ใช้งานกลางแจ้งได้

การผลิตผง PVC กับสารเติมแต่งต่างๆ มี 3 แบบ ดังนี้

1. Compound มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกหรือลูกบาศก์เล็กๆ ที่ได้จากการผสมผงพีวีซีและสารเติมแต่งต่างๆ แล้วป้อนเข้าเครื่องอัดรีด และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ
2. Premix เป็นของผสมที่มีลักษณะเป็นผงขึ้น เกิดจากการผสมเรซินและสารเติมแต่งโดยใช้ mixer กวนด้วยความเร็วสูง
3. Paste หรือ plastisol มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ผงพีวีซีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็น emulsion PVC ผสมกับพลาสติกไฮเซออร์ และสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน

พีวีซีถูกนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย โดยสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ตามวิธีการขึ้นรูปได้ดังนี้ [8]

1. ผลิตภัณฑ์จากการอัดรีด (Extrusion) : การอัดรีดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ยาวต่อเนื่องกัน โดยมีเกลียวทำการอัดหลอม และดันผ่านหัวตาย (die) รูปทรงต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) ได้แก่ ท่อน้ำ ท่อประปา หลอด กรอบประตูและหน้าต่าง กรอบ

สำหรับตกแต่ง (edging profile) ฉนวนและเปลือกนอกหุ้มสายไฟฟ้า ฉนวนหุ้มสายโทรศัพท์
ฟิล์มยืด (stretch film) สำหรับห่ออาหาร เป็นต้น

2. **ผลิตภัณฑ์จากการฉีดแบบ (Injection molding) :** พิวซีซีจะถูกหลอมและดัน
ผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่แบบ และถอดแบบออกเมื่อชิ้นงานแข็งตัว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยวิธีนี้ ได้แก่
ข้อต่อท่อ (fitting) ชิ้นส่วนปั๊ม เครื่องใช้ในบ้านและสำนักงาน รองเท้า เป็นต้น

3. **ผลิตภัณฑ์จากการเป่าแบบ (Blow molding) :** พิวซีซีจะถูกอัดรีดเป็นสายท่อ
(parison) เข้าไปภายในแม่แบบกลวงสองฝาประกบกัน ซึ่งสายท่อจะพองเต็มช่องว่างของแม่แบบ
ผลิตภัณฑ์จากการเป่าแบบ ได้แก่ ขวดพิวซีซีสำหรับใส่น้ำมันพืช แชมพู น้ำดื่ม และของเหลวอื่นๆ
 เป็นต้น

4. **ผลิตภัณฑ์จากการรีดแผ่นด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) :** การอัดรีดแผ่นด้วย
ลูกกลิ้งร้อน 2 ตัว หรือมากกว่า เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ผลิตภัณฑ์จากการ
อัดรีดแผ่นด้วยลูกกลิ้ง ได้แก่

- soft film/sheet ได้แก่ แผ่นพลาสติกทั้งแบบใส ชุ่น และแบบสี ใช้ในการ
บรรจุบ่อน้ำเพื่อการชลประทาน ผ้าปูโต๊ะ ห่อปกหนังสือ หรือนำไปตัดเย็บเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เสื้อ
กันฝน ตู้อัดผ้า ม่านห้องน้ำ ฯลฯ หรือนำไปอัดเป็นชั้น (laminating) เช่น เลื่อน้ำมัน เป็นต้น

- rigid film/sheet คือ แผ่นพลาสติกแบบแข็ง ส่วนใหญ่จะใสใช้หุ้มแผ่น
สินค้าให้สวยงาม หรือทำบรรจุภัณฑ์โดยใช้ความร้อนและแรงอัด หรือสุญญากาศ

- artificial leather คือ การเคลือบผิวหน้าผ้าด้วยพิวซีซี

5. **ผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปด้วยแรงเหวี่ยง (Rotational molding) :** ใช้เตรียม
ผลิตภัณฑ์ที่กลวง โดยจะหมุนแม่แบบใน 2 ทิศทาง อย่างสม่ำเสมอ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่กลวง เช่น
ตุ๊กตา ลูกบอล ภาชนะต่างๆ ถังน้ำมัน และถังใส่น้ำแข็ง เป็นต้น

6. **ผลิตภัณฑ์จากการเคลือบผิว (Coating) :** เป็นการเคลือบพลาสติกให้ติดกับ
substrate ด้วยการทา โดย substrate จะเคลื่อนที่อยู่ภายใต้เหล็กปาดซึ่งจะเกลี่ยทา paste PVC
ให้เคลือบติดกับ substrate อย่างสม่ำเสมอ ซึ่ง substrate อาจเป็นผ้า โยสังเคราะห์ หรือกระดาษ
เช่น ผนังเทียม ผ้าใบ วอลล์เปเปอร์ (wall paper) หรืออาจเคลือบผิวโลหะก็ได้ การเคลือบผิวอีกวิธี
หนึ่งทำได้โดยการจุ่ม (dip coating) โดย substrate จะจุ่มลงไปในอ่างพิวซีซีเหลว ผลิตภัณฑ์

ลักษณะนี้ เช่น ถูมือ และโลหะเคลือบ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปพ่นเคลือบผิวโลหะ (spraying) ได้ดังที่ใช้ในการพ่นใต้ท้องรถกันสนิม

พีวีซีโดยทั่วไปมี 2 เกรด คือ พีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC) และพีวีซีชนิดอ่อน (flexible PVC) โดยพีวีซีชนิดแข็ง จะถูกใช้ทำเป็นแผ่น ท่อ กรอบหน้าต่าง และชิ้นส่วนต่างๆ ส่วนพีวีซีชนิดอ่อนได้จากการใส่พลาสติกไซเซอร์เข้าไปในพีวีซี เรียกว่า พลาสติกไซด์พีวีซี (plasticized PVC) ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟ หนังสือพิมพ์หุ้มเบาะเก้าอี้ ทำกระเป๋า กระเป๋าเบื่อง่ายปูพื้น ฟิล์มกระดาษปิดผนัง และสายยาง เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะเด่นของพีวีซีชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น

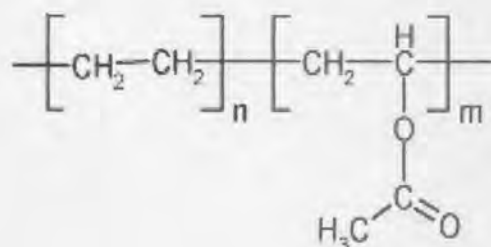
ตารางที่ 2.1 ลักษณะเด่นของพีวีซีชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น [10]

พีวีซีชนิดแข็ง	พีวีซีชนิดยืดหยุ่น
<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้านทานการกัดกร่อน สารเคมี น้ำมัน และอากาศ 2. ผลิตง่าย 3. น้ำหนักเบา 4. ชะลอการติดไฟและไม่ติดไฟด้วยตัวเอง 5. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก 6. ทาสีง่ายและพิมพ์สีต่างๆ ได้มากมาย 7. สามารถเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความใส กึ่งใส หรือทึบแสงได้ตามแต่การนำไปใช้งาน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ทนทานต่อสภาวะดินฟ้า อากาศ 2. ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน 3. นิ่มและหักงอได้ 4. ทนทานต่อการฉีกขาด 5. มีความยืดหยุ่นดีเยี่ยม 6. มีความใสและเป็นมันวาว

2.2 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) [12-14]

อีวีเอสังเคราะห์ได้จากกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ continuous bulk หรือแบบ solution ระหว่างเอทิลีนกับไวนิล อะซีเตต (vinyl acetate) ซึ่งไวนิลอะซีเตตจะจัดเรียงตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยปกติอีวีเอที่นำมาใช้จะมีปริมาณไวนิลอะซีเตตอยู่ในช่วง 2-50% และมีค่า melt flow index (MFI) อยู่ที่ 5-25 กรัม/10นาที ซึ่งมีการจัดกลุ่มของอีวีเอตามปริมาณของไวนิลอะซีเตตที่มีอยู่ในโมเลกุลของ พอลิเมอร์ ดังนี้ ถ้ามีปริมาณไวนิลอะซีเตตอยู่ในช่วง 9-18% จะจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสติก (plastics) ถ้ามีไวนิลอะซีเตตอยู่ในช่วง 28-33% จะ

จัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers) และถ้ามีไวนิลอะซีเตตถึง 45% จะจัดอยู่ในกลุ่มของยาง (rubbers) โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของอีวีเอ [13]

สมบัติของอีวีเอขึ้นกับปริมาณไวนิลอะซีเตตในโคพอลิเมอร์ ถ้าปริมาณไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง ซึ่งมีผลให้ความเป็นผลึกลดลง และถ้ามีปริมาณไวนิลอะซีเตตต่ำ (7-8 mole%) อีวีเอจะมีลักษณะคล้าย LDPE ที่ถูกดัดแปร (modified LDPE) และถ้ามีปริมาณไวนิลอะซีเตต 10-15 mole% จะมีความยืดหยุ่นคล้ายพลาสติกไฮดรอกซีไพลีสติก (plasticised PVC) คือ มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นโดยไม่จำเป็นต้องใส่พลาสติกไซเซอร์ ซึ่งอาจเป็นข้อดีในการใช้งานบางอย่าง เพราะความยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับพลาสติกไซเซอร์ที่อาจสูญเสียไประหว่างการใช้งาน สำหรับอีวีเอที่มีไวนิลอะซีเตตประมาณ 11 mole% อาจถูกใช้เป็นสารเติมแต่งใน hot melt coating และ adhesives

ยางอีวีเอมีปริมาณไวนิลอะซีเตต 40-70 mole% เนื่องจากสายโซ่ของยางอีวีเอมีความอิมพัลส์สูง ทำให้ยางชนิดนี้ทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี (สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิสูงถึง 125 องศาเซลเซียส) ส่วนหมู่อะซีเตตซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จะทำให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี แต่ยางอีวีเอมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และเนื่องจากยางมีความเป็นขั้วสูง จึงมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่ดี ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลเฉพาะกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน สภาพอากาศ ความร้อน และน้ำมันเท่านั้น และเนื่องจากสายโซ่หลักของยางอีวีเอเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน แต่สามารถคงรูปด้วยสารเปอร์ออกไซด์ และการเลือกใช้สารตัวเติมสารทำให้ยางนิ่ม และสารช่วยในกระบวนการผลิตควรทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรด หรือสารประกอบที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลสามารถรบกวนการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากยางอีวีเอมีความทนทานต่อสภาพอากาศสูงจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ แต่ในกรณีที่ต้องการนำยางคงรูปไปใช้ที่อุณหภูมิสูงมากๆ ก็อาจเติมสารป้องกันการ

เสื่อมสภาพลงไปได้ ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กับยางชนิดนี้ ได้แก่ น้ำมันพาราฟินิกที่ระเหยได้น้อย หรือน้ำมันในกลุ่มเอสเทอร์ นอกจากการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์แล้ว ยังอาจทำให้คงรูปได้ด้วยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง

นอกจากนี้ สมบัติของอีวีเอยังขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย โดยอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีความเหนียวต่ำ จึงง่ายต่อการผลิตหรือขึ้นรูป ส่วนอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะเหมาะกับงานยึดติดที่ต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ การขึ้นรูปอีวีเอสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดแบบ (compression molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดรีด (extrusion) ให้เป็นแผ่น (sheets) แล้วใช้บล็อกมีดตัดให้มีรูปร่างตามต้องการ

อีวีเอเป็นพลาสติกที่นำมาประยุกต์ผลิตเป็นสินค้าได้หลากหลายอุตสาหกรรม ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอีวีเอ เช่น ฟิล์มรีดของชนิดหัดได้ พื้นรองเท้าวิ่งชั้นกลาง (midsole) อุปกรณ์ทางการแพทย์ชนิดใช้ครั้งเดียว กาวห่อหุ้มด้วยความร้อน (hot melt adhesives) ของเด็กเล่น ฉนวนหุ้มลวดไฟฟ้า เป็นต้น

สาเหตุที่นำอีวีเอมาใช้งานหลากหลายมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติที่ดี ดังนี้

- ขึ้นงานมีลักษณะใส หรือมีสีขาว ง่ายต่อการให้สี
- มีความยืดหยุ่นและทนต่อการโค้งงอได้ดี
- การละลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไวโนลอะซีเตตเพิ่มขึ้น
- สามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ และเกลือได้ดี ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงถ้าปริมาณไวโนลอะซีเตตเพิ่มขึ้น
- มีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี
- มีความต้านแรงกระแทก (impact strength) สูง
- มีราคาถูก
- สามารถต้านทานการเกิดรอยแตกหักได้ดี
- สามารถต้านทานแสง UV และโอโซนได้ดี
- ไม่มีกลิ่น ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เพราะสามารถปิดผนึกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถสัมผัสกับอาหารได้ตามกฎของ FDA
- สามารถทำการเชื่อมโยงข้าม (crosslinking) ได้ ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี
- อีวีเอมีความเป็นขั้วสูงจากหมู่อะซีเตต ทำให้ทนน้ำมัน (oil resistance) และสามารถยึดเกาะกับวัสดุอื่น และมีความแข็งแรงยึดเกาะที่ดี

2.3 แร่ดิน (clay minerals) [15]

แร่ดินเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrated aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำและเมื่อนำไปอบแห้งจะเปราะ โดย plasticity ของแร่ดินจะขึ้นกับธรรมชาติ และความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากแร่ดินจะมี plasticity สูง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicates ประกอบด้วยชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์ออคตาฮีดรอน (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระออคตาฮีดรอน (Si-tetrahedral) และระหว่างชั้นรอยต่อ (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม หรือโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน กลุ่มแร่ดินที่สำคัญ ได้แก่ illite, kaolinite, smectite และ vermiculite ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (attapulgite) หรือ ปาลีโกรซไกต์ (palygorskite) ซึ่งมีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นเหมือนลูกโซ่ (chain silicate)

แร่ดินสามารถแบ่งตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มเคโอลิไนต์ (Kaolinite group) มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $2Al_2Si_2O_5(OH)_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยแผ่น Si-tetrahedral 1 ชั้น จับยึดกับแผ่น Al-octahedral 1 ชั้น และวางซ้อนกันตามแนวแกน c แต่ละแผ่นของ Al-octahedral และ Si-tetrahedral จับยึดต่อเนื่องไปตามแนวแกนที่เรียกว่าแกน a และ b เคโอลิไนต์มีรูปผลึกแบบไตรคลีนิก (triclinic) แร่กลุ่มนี้ ได้แก่ เคโอลิไนต์ (kaolinite) ดิกไกต์ (dickite) แนโคริต (nacrite) แฮลลอยไซต์ (halloysite) และแอลโลเฟน (allophane) โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ไม่มีการแทนที่ของธาตุภายในโครงสร้างหรือมีน้อยมาก ซึ่งเป็นผลทำให้มีประจุถาวรต่ำ (low permanent charge)

2. แต่ละหน่วยผลึก (crystal unit) ยึดกันค่อนข้างเหนียวแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นในช่อง (interlayer) มีผลทำให้แร่ดินเหนียวซิลิเกตพวกนี้มีการขยายตัวและหดตัว (swelling and shrinking) น้อยมาก

3. จำนวนหน่วยที่ซ้อนกันมีค่อนข้างมาก จึงทำให้ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ ขนาดของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้อยู่ระหว่าง 0.1-5.0 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-2.0 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) น้อย และพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) มีน้อยมากหรือไม่มีเลย

4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity, CEC) ได้ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยและมีประจุลบในผลึคน้อยมาก CEC จะมี 3-15 meq/100กรัม

2. **กลุ่มแร่อิลไลต์ (Illite group)** มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากในหินตะกอน และในสภาพที่มีการตกตะกอนต่างๆ มีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับแร่มัสโคไวต์ แร่นี้บางที่เรียกกันว่าไมกา (mica) และจะคงสภาพอยู่ได้ดี ถ้ามีความเข้มข้นของซิลิกอนและอะลูมิเนียมปานกลางถึงสูงในสภาพแวดล้อมที่เกิด แต่ถ้ามีพวกไฮโดรเนียมไอออนปานกลางถึงสูง ทำให้เสียเสถียรภาพ และจะเปลี่ยนเป็นเวอร์มิคิวไลต์ โดยลักษณะสำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ประมาณ 15-25% ของ Si^{+4} ในชั้นเตตระฮีดรอนจะถูกแทนที่ด้วย Al^{+3} จึงทำให้เกิดประจุลบที่ถาวร (permanent negative charge) มากในชั้นเตตระฮีดรอน
2. ประจุลบที่เกิดขึ้นจะถูกทำให้สมดุล (balance) ด้วย K^+ ในช่อง ซึ่งขนาดของ K^+ พอเหมาะกับช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นของเตตระฮีดรอนของแผ่นบนและแผ่นล่างที่ซ้อนกัน
3. ระยะทางระหว่างประจุลบที่เกิดขึ้นมากในชั้นเตตระฮีดรอนและ K^+ ใกล้กันมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดสูงมากตามกฎของ Coulomb
4. K^+ เปรียบเสมือนสลักทำหน้าที่ยึดหน่วยของผลึกแต่ละหน่วยเข้าไว้ด้วยกันค่อนข้างแน่น มีผลทำให้ไม่สามารถยัดเข้าหรือออกได้ จึงเรียกว่าเป็นพวกที่ไม่ขยายตัว
5. K^+ เป็นพวกที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (unexchangeable) หรือเป็นพวกที่ถูกตรึง (K-fixation)
6. มีการขยายตัวและหดตัว พื้นที่ผิวภายในและภายนอก และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกค่อนข้างต่ำ แต่มีสมบัติเหล่านี้มากกว่าแร่ดินเหนียวเคโอลิไนท์ (CEC อยู่ระหว่าง 15-40 meq/100 กรัม)

3. **กลุ่มแร่สเมคไทต์ (Smectite group)** มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $M_x(Al_xMg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดยที่ M คือ cation มีส่วนประกอบที่สำคัญของหินชั้น (sedimentary rock) และทราย (soils) เป็นกลุ่มของแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (expandability) เมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน แร่กลุ่มนี้ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite), beidellite และ nontronite แร่พวกนี้จะมีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 2:1 สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ (brick) เซรามิก (ceramic) ใช้ทำโคลนเจาะ (drilling mud) และผสมทรายทำกากกัมมันตรังสีได้อีกด้วย มีลักษณะแปรผันไปได้มาก เพราะองค์ประกอบแปรผันได้ โดยเฉพาะน้ำแม้แต่ค่าครรชนนี้หักเหของแสงก็ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในพิสัย 1.50-1.64

แร่กลุ่มนี้มีการแทนที่ของอะตอมมาก องค์ประกอบของแร่จะแปรผันออกไปจากสูตรเคมี มีการแทนที่อะลูมิเนียมโดยแมกนีเซียม และแทนที่ซิลิกอนโดยอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดประจุลบบน

ชั้นโครงสร้าง ทำให้สามารถดูดซับ (adsorb) ไอออนบวก เช่น Ca^{2+} , Na^+ และ H_3O^+ ($\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$) ไว้ ระหว่างชั้นในโครงสร้างได้ ทำให้แร่ชนิดนี้สามารถพองตัวเมื่อถูกน้ำ และแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ ปกติมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ที่มีอะลูมิเนียมสูง และจะมีแร่ที่อยู่ในกลุ่มนี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่องค์ประกอบแตกต่างกันออกไปบ้าง คือ นอนโทรไนต์ ซึ่งมีสีเหลืองแกมเขียว มีเหล็กมาก เพราะมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยเหล็ก, ซาโฟไนต์ ซึ่งมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม, ซอโคไนต์ ซึ่งมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยสังกะสี และบีเดลไลต์ ซึ่งมีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม แร่ชนิดนี้ถ้าถูกน้ำแล้วจับจะลื่นมือเหมือนสบู่และจะทำให้เกิดลักษณะเหมือนวุ้นเมื่อแช่น้ำ มอนต์มอริลโลไนต์พบในหินตะกอนและจากการพองตัวของแก้วภูเขาไฟ (volcanic ash) ดินเบนโตไนท์ (bentonite) เป็นดินชนิดหนึ่งที่แร่องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ มอนต์มอริลโลไนต์

การทำให้ประจุสมดุล (charge balance) เกิดจากการแทนที่ของไอออนในชั้นออกตะฮีดรอน (Al^{3+} หรือ Mg^{2+}) ชั้นเตตระฮีดรอน โดยส่วนมากจะใช้ Ca^{2+} หรือ Na^+ เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ ผลรวมระหว่างความหนาของชั้นดินและพื้นที่บริเวณระหว่างชั้นของดินแต่ละชุดจะมีความกว้างของช่องว่างเท่าๆ กัน ซึ่งคำนวณจากระนาบ 001 โดยดูจาก X-ray Diffraction ค่า d-spacing ของ Silica-Alumina-Silica 1 ชุดของดิน Na^+ -มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าตั้งแต่ 9.6-20 อังสตรอม สำหรับดินที่กระจายตัวในน้ำ ตำแหน่งที่มีประจุบวกหรือโมเลกุลของน้ำอยู่จะเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ประจุลบที่เกิดขึ้นน้อยมากในชั้นเตตระฮีดรอน แต่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของออกตะฮีดรอน (บางส่วนของ Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+})
2. ประจุลบที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีปริมาณน้อยกว่าในเวอร์มิคิลไลต์และอิลไลต์
3. ประจุลบที่เกิดขึ้นถูกทำให้สมดุลด้วย Mg^{+2} และ Ca^{+2} ซึ่งมีน้ำล้อมรอบในช่องคล้ายกับเวอร์มิคิลไลต์
4. แรงดูดคู่ระหว่างหน่วยผลึกกับ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องไม่แข็งแรง จึงทำให้มีการยืดและหดตัวของดินเหนียวชนิดนี้เป็นไปได้เต็มที่แล้วแต่ปริมาณความชื้น
5. Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องเป็นพวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
6. เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก คือ ประมาณ 0.01-1.0 ไมครอน มีการสลายตัวหรือแตกหักเป็นอนุภาคนาโนได้ง่าย จึงทำให้มีพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอกสูง และมี CEC ค่อนข้างสูงประมาณ 80-100 meq/100 กรัม

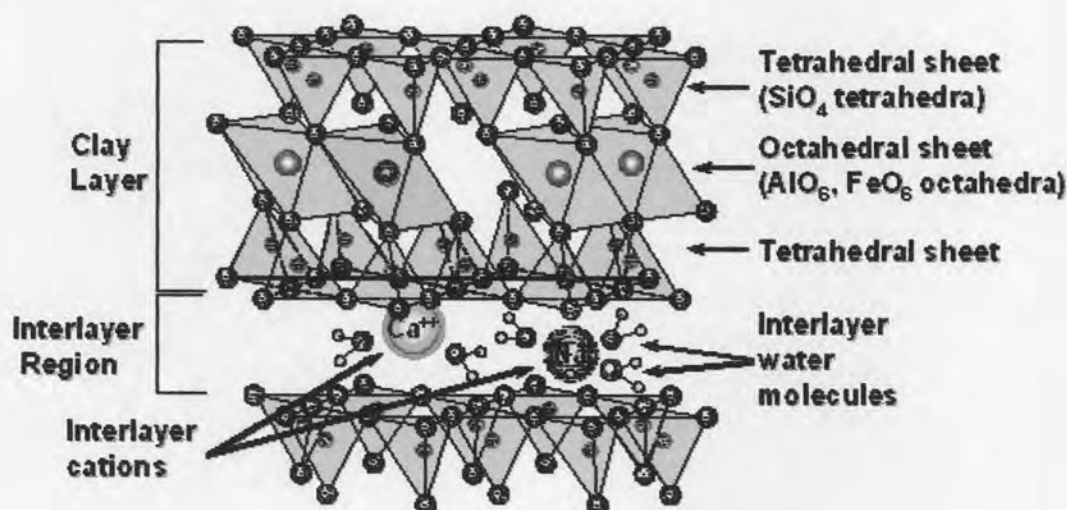
4. กลุ่มแร่เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot XH_2O$ เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มไมกา ซึ่งเกิดขึ้นคลุมรูปร่างของแร่ฟลโกไพต์และไบโอไทต์ และมักมีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ประจุที่ขาดไปทำให้เกิดการแทนที่แมกนีเซียมด้วยเหล็ก (Fe^{3+}) และไอออนที่ถูกดูดซับได้ เวอร์มิคิวไลต์แสดงลักษณะหลายอย่างคล้ายมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนบวก และช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งแปรผันไปตามปริมาณของน้ำที่เป็นองค์ประกอบ และชนิดของไอออนบวกที่ถูกดูดซับไว้ ลักษณะพิเศษเฉพาะตัวของเวอร์มิคิวไลต์คือสามารถขยายขนาดตามแกน c ได้เพิ่มขึ้นถึง 30 เท่าของปริมาณเดิม เมื่อทำให้น้ำร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงอุณหภูมิ 250-300 °C ผลที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวนี้นำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ เวอร์มิคิวไลต์พบมากในการสลายตัวของฟลโกไพต์ และไบโอไทต์และจะพบในดินบางชนิดโดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้คือ

1. ประจุลบที่เกิดขึ้นในชั้นเตตระไฮดรอนเช่นเดียวกับในพวกมัสโคไวท์ แต่ประจุที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนถูกทำให้สมดุลด้วยประจุบวกซึ่งเกิดขึ้นในชั้นออกตะไฮดรอน อันเนื่องมาจากมี Al^{+3} และ Fe^{+3} มากเกินไป
2. ประจุลบสุทธิ (net negative charges) ถูกสมดุลด้วย Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่อง Mg^{+2} และ Ca^{+2} นี้มีน้ำล้อมรอบอยู่ด้วยจึงมีขนาดใหญ่กว่า K^+ ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่พอเหมาะกับช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเตตระไฮดรอนที่ซ้อนกันอยู่
3. Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องนี้เป็นประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
4. เนื่องจากประจุลบสุทธิมีค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้แรงดึงดูดยึดระหว่างหน่วยของผลึกกับ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องมีพอประมาณ จึงทำให้มีการขยายและหดตัวได้ไม่เต็มที่แล้วแต่ปริมาณของความชื้น
5. มีพื้นที่ผิวภายนอกและภายในตลอดจน CEC ค่อนข้างสูง (100-150 meq/100 กรัม)

2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [16]

มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ จัดเป็นแร่กลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้เตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นหรือเป็นแผ่นซ้อนกันแบบ 2 : 1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตะไฮดรอลแทรกอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิกาเตตระไฮดรอล ความหนาของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 nm ในขณะที่ความยาวด้านข้างอยู่ในระดับไมครอน โดยผิวหน้าผลึกมีประจุเป็นลบจึงมักมีประจุบวก

ของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นผลึกที่เรียกว่า gallery เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ และช่วยยึดชั้นผลึกที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

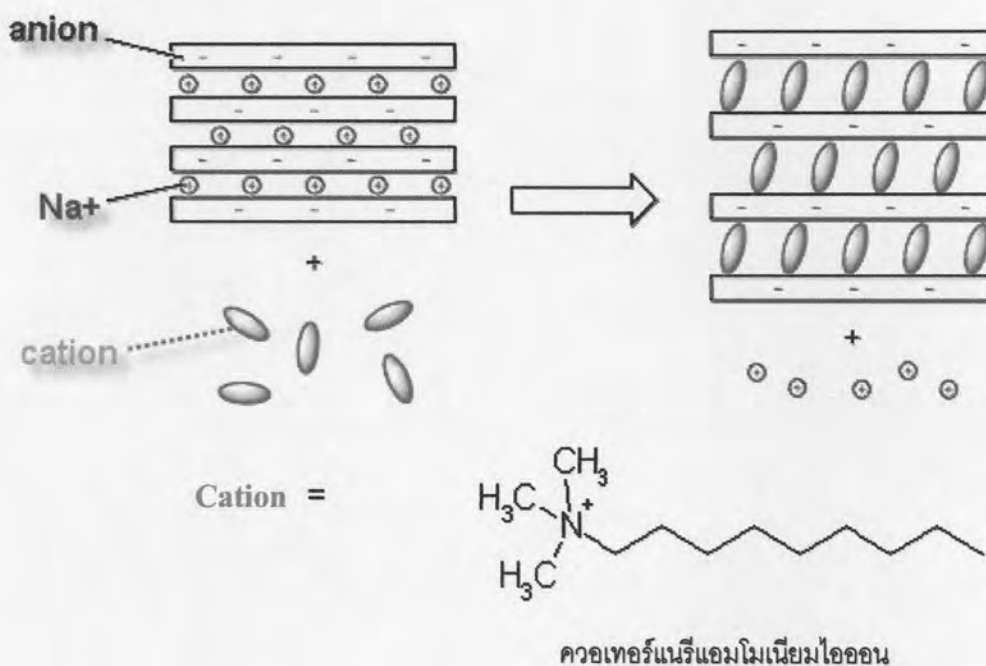


รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ [16]

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกขยายจนถึง 1.2 nm เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก จึงเป็นที่รู้จักดีและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น (ในสภาพปฏิกลของสัตว์เลี้ยง เช่น แมว) รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินเหนียวขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ ทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดประจุได้ เช่น ประจุบวก

2.5 ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) [16]

การที่มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงเป็นการยากที่จะเข้าร่วมตัวกับพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือชอบสารอินทรีย์โดยการแทนที่แคตไอออนของโลหะด้วยแคตไอออนของสารอินทรีย์ เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) หรือฟอสโฟเนียม (phosphonium) ด้วยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cationic exchange) ดังรูปที่ 2.5 ทำให้ gallery เกิดการขยายตัว และมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นผลึก ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร เรียกว่า ออร์แกโนเคลย์ (organoclay)

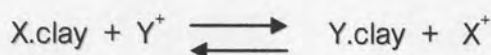


รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นดินกับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน [16]

2.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุของดิน (Cation Exchange Process) [17]

ดินเหนียวที่อยู่ในดินตามธรรมชาติจะดูดยึดไอออนที่มีประจุบวกไว้เต็มไปหมด ส่วนชนิดของแคตไอออนที่ดูดยึดอยู่นั้นสำหรับดินในแถบร้อนและชุ่มชื้น จะมีมากน้อยลดหลั่นกันลงไป ดังนี้ : $H^+ (Al^{3+}) > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ แคตไอออนต่างๆ เหล่านี้จะไม่ดูดยึดติดแน่นอยู่กับพื้นผิวของดินเหนียวแต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับผิวภายใต้อำนาจการดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น การชะล้างด้วยน้ำจึงไม่อาจที่จะชะเอาแคตไอออนพวกนี้ออกไปได้ และเรียกแคตไอออนนี้ว่า แคตไอออนดูดซับ (adsorbed cation) อย่างไรก็ตาม แคตไอออนเหล่านี้สามารถถูกไล่ออกไปได้ง่ายด้วยแคตไอออนอื่นๆ บางครั้งเรียกแคตไอออนดูดซับนี้อีกอย่างหนึ่งว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยน (exchangeable cation)

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนประจุ คือ

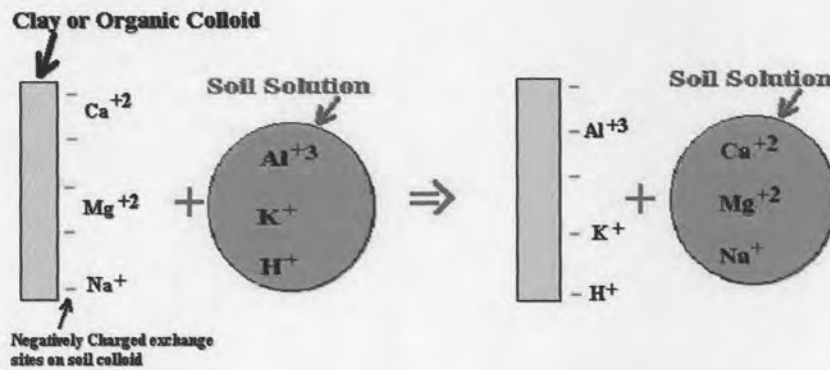


X^+ : ประจุของดิน

Y^+ : ประจุที่ทำการเติมลงในสารละลาย

ปฏิกิริยาจะเกิดจากซ้ายไปขวา ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของประจุ X^+ และ Y^+ ปฏิกิริยาจะเคลื่อนที่ไปด้านขวาโดยการเติมประจุ Y^+ ดังรูปที่ 2.6

Cation Exchange Illustrated



รูปที่ 2.6 การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแคตไอออนในดิน
กับแคตไอออนชนิดอื่น

การแลกเปลี่ยนประจุนี้ จะถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ของประจุเข้าไปแทนที่ในส่วนของประจุที่มีอยู่เดิม สามารถพิจารณากระบวนการได้ใน 2 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ของสารละลายเข้าไปในแต่ละบริเวณช่องว่างระหว่างชั้นของดิน
2. การแพร่เข้าไปภายในตัวอนุภาค

2.6.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน

การแลกเปลี่ยนระหว่างแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและแคตไอออนที่อยู่ในภายนอกนั้น เกิดได้ง่ายและยากแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ชนิดของแคตไอออนดูดซับและแคตไอออนเข้าแทนที่

แคตไอออนต่างชนิดกันจะดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและถูกไล่ที่ออกจากดินเหนียวโดยแคตไอออนอื่นๆ ได้ยากและง่ายแตกต่างกันออกไป บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้เพียงหลวมๆ และถูกแทนที่ได้ง่าย บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวค่อนข้างเหนียวแน่นและถูกแทนที่ได้ยาก ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอำนาจในการไล่ที่และความเหนียวแน่นในการดูดซับของแคตไอออนที่ผิวดินเหนียวนั้น ปรากฏว่าแคตไอออนต่างๆ มีอำนาจการเข้าแทนที่ (replacing power) แตกต่างลดหลั่นกันลงไปดังนี้ คือ $Li^+ < Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < NH_4^+ < Al^{3+}(H^+)$ นั่นคือ

Na^+ สามารถไล่ที่ Li^+ ได้ง่ายกว่าที่ Li^+ จะไล่ที่ Na^+ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง คือ Na^+ จะดูดยึดอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้แน่นกว่า Li^+ แต่จะเหนียวแน่นน้อยกว่า K^+ , Ca^{2+} ฯลฯ ตามลำดับ

2. ความเข้มข้นของแคตไอออนเข้าแทนที่

โดยปกติถ้าปริมาณของ replacing cation มีมากก็ทำให้การไล่ที่แคตไอออนที่ผิวดินเหนียวง่ายขึ้น ถึงแม้ว่า Na^+ จะมีอำนาจการไล่ที่ Ca^{2+} น้อยกว่าที่ Ca^{2+} จะไล่ที่ Na^+ แต่ถ้ามี Na^+ จำนวนมาก ๆ ก็สามารถไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปให้หมดจากผิวของดินได้

3. ปริมาณการอิมตัว

ปริมาณของการอิมตัวของแคตไอออนบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่แคตไอออนนั้นจะถูกไล่ที่ออกมาเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) ที่ผิวของดินเหนียวยิ่งเหลือน้อยเท่าใดความยากที่จะไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปจากผิวดินเหนียวให้หมดก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางตรงกันข้ามโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium) ยิ่งเหลือน้อยอยู่บนผิวดินเหนียวเท่าใดก็ยิ่งง่ายต่อการที่จะถูกไล่ที่ออกไปมากขึ้นเท่านั้น ส่วนแคตไอออนบางชนิด เช่น K^+ และ Mg^{2+} นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับการ degree of saturation เป็นต้น

4. แคตไอออนอื่นที่อยู่ร่วมด้วยบนผิวของดินเหนียว

แคตไอออนอื่นๆ ที่ดูดยึดอยู่บนผิวดินเหนียวร่วมกับแคตไอออนที่ต้องการจะไล่ที่นั้นก็มีบทบาทสำคัญเหมือนกัน เช่น โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K^+) ถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายขึ้น เมื่ออยู่ร่วมกับอะลูมิเนียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al^{3+}) หรือ H^+ แต่จะถูกไล่ที่ได้ยากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้

2.6.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange Capacity : CEC)

CEC คือ ปริมาณที่มากที่สุดของประจุที่สามารถเข้าไปแทนที่ได้ มีหน่วยเป็น milliequivalent per gram หรือ 100 gram (meq/g หรือ mq/100 g) CEC ของดินขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ชนิดของคอลลอยด์ดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของคอลลอยด์ดินที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกันเป็นอย่างมาก เช่น ฮิวมัส, มอนต์มอริลโลไนต์, อิลไลต์, เคโอลิไนต์ และไฮดรอกซอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเฉลี่ยจะมีค่าแตกต่างกันตามลำดับดังนี้ 200, 100, 30, 8 และ 4 meq/100 g ดังนั้น ดินที่มีฮิวมัสมากหรือมีพวกมอนต์มอริลโลไนต์เป็น

องค์ประกอบอยู่มากก็จะทำให้ CEC ของดินนั้นสูงขึ้นกว่าดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเคลอิไลต์ และไฮดรอกไซด์ของ Fe และ Al

2. ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงย่อมจะมี CEC สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวน้อยกว่า ดังนั้น จึงสามารถใช้ความสังเกตจากเนื้อดินเป็นหลักเกณฑ์บอกได้อย่างคร่าวๆ ว่าดินไหนมี CEC มากน้อยกว่ากัน ถ้าดินมีเนื้อละเอียดโอกาสที่จะมี CEC สูงกว่าดินที่มีเนื้อหยาบกว่าก็จะมีมาก ดังนั้น จึงสามารถประเมิน CEC ของดินโดยคร่าวๆ ได้จากปริมาณดินเหนียว นั่นคือ ทุกหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ CEC แก่ดินประมาณ 0.5 meq/100 g เช่น ถ้าดินมีดินเหนียว 30% CEC ของดินนั้นจะประมาณ 15 meq/100 g

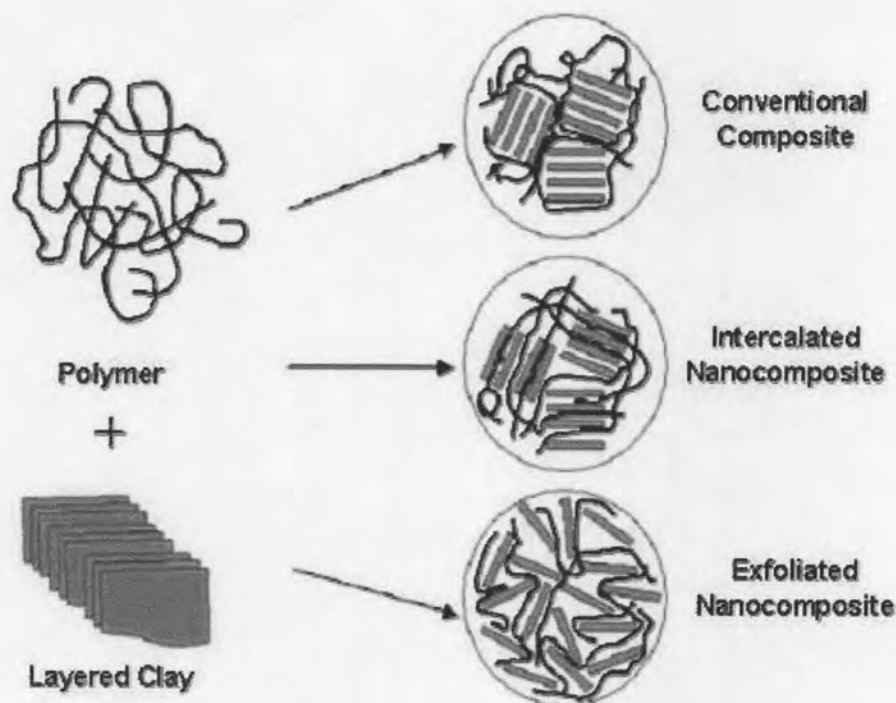
3. ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน เนื่องจากฮิวมัสมี CEC สูงมาก ดังนั้น ดินที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงจะมี CEC สูงด้วย

2.7 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) [18]

นาโนคอมพอสิต เป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่จะช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตแบบทั่วไป ทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความสนใจและพัฒนากันอย่างหลากหลายในปัจจุบัน คือ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยการเติมสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เพราะจะเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite) เนื่องจากเมื่อได้ผสมพอลิเมอร์กับ organoclay แล้ว ทำให้ชั้นซิลิเกตขยายห่างออกจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์จะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์ [19]

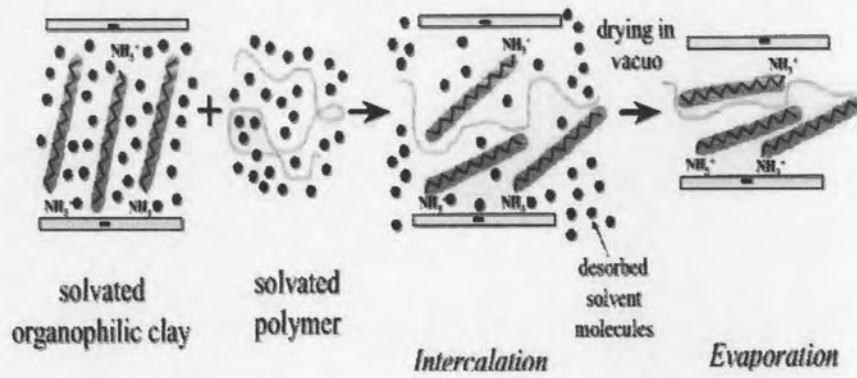
จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์-เคลย์สามารถเกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ 3 แบบ ดังนี้

1. คอมพอสิตแบบทั่วไป (conventional composites) : อนุภาคของเคลย์จะมีการเกาะกันเป็นกลุ่ม พอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. Intercalated nanocomposites : เคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม ระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวโดยสายโซ่พอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์
3. Exfoliated nanocomposites หรือ delaminated nanocomposites : ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน C ทำให้ได้วัสดุนาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง และยังทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี

2.7.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

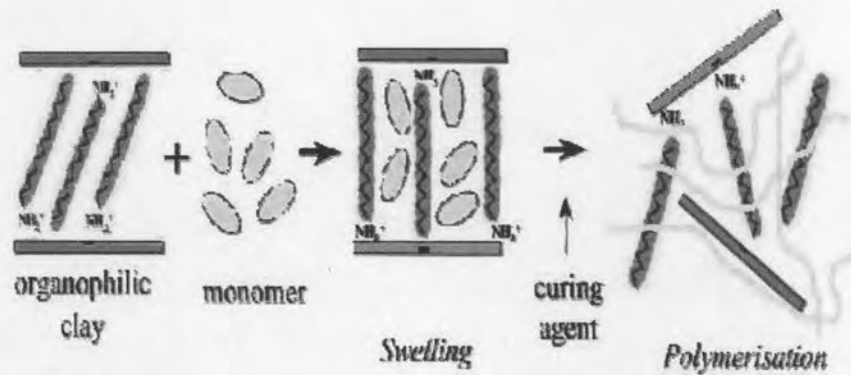
การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิตในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ

1. Solution intercalation โดยสารละลายพอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



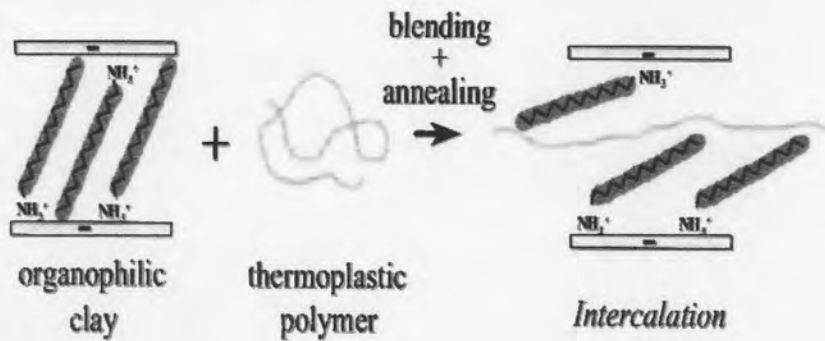
รูปที่ 2.8 การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี Solution intercalation [20]

2. *in situ* polymerization โดยการแทรกมอนอเมอร์เข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ แล้วจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี *in situ* polymerization [20]

3. Melt intercalation โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแทรกเข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี Melt intercalation [20]

2.7.2 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [18]

1. มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊ส เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มีพื้นผิวและมี aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว
5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

2.7.3 ผลกระทบที่สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น timing-beltting cover โครงบุใต้หลังคา คอนโซล ตัวถัง ล้อรถยนต์ และถังน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
2. สีพ่นรถยนต์ ให้ความคงทนมากขึ้น
3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยา/อาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสื่อมสภาพ ยืดอายุสินค้าให้ยาวนานขึ้น
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ลูกเทนนิส ลูกบอล ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอล ลูกเทนนิส

2.7.4 แนวโน้มการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ต่างประเทศ : เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาและถ่ายทอดสู่อุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น จีน เกาหลี และอีกหลายประเทศในยุโรป ได้แก่ เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี เป็นต้น โดยเน้นการนำไปใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ในปี 2004 บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของโลกต่างประกาศว่าจะนำชิ้นส่วนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ นาโนคอมพอสิตมาใช้ในรถยนต์ เชื่อว่าในอนาคตสามารถผลิตรถยนต์ทั้งคันที่ทำจากนาโนคอมพอสิตได้ ซึ่งมีความปลอดภัยสูง โดยเฉพาะจากไฟไหม้ ระเบิด ความสูญเสีย โดยทนความร้อนสูงขึ้น และลดการลามไฟ

2. ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ได้แก่ ชิ้นส่วนที่ต้องทอน้ำ ด้านการซึมผ่านของแก๊ส เช่น catheter และชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม

3. ผลิตภัณฑ์สำหรับอาหารและยา ได้แก่ พิล์มป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และแก๊สต่างๆ และขวดน้ำอัดลม

ประเทศไทย : มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

1. อุตสาหกรรมยานยนต์ : ชิ้นส่วนรถยนต์
2. ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ : สารคอมพอลิเมอร์ยืดหยุ่น สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในคอมพอลิเมอร์ : ปะเก็นล้อรถ ให้ความทนทาน แก้ปัญหายางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา : ลูกบอล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร : พิล์มการเกษตร พิล์มห่อผัก ผลไม้ พิล์มเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้าและแฟชั่น : เส้นใยนาโนคอมพอลิเมอร์ทนไฟ ให้ความอบอุ่น ย้อมสีติดได้ดี
7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม : ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน; lithium ion battery
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร : พิล์มต้านแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหารเสื่อมสภาพ เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากพีวีซี ได้แก่

Pepniecek และคณะ [21] ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของพีวีซี/เคลย์นาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD, TGA และ DMA โดยการผสมพีวีซีพลาสติกซอล (PVC plastisol) กับเคลย์ทั้งชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปร ซึ่งอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (suspension) ก่อนนำไปผสมกับส่วนประกอบอื่นๆ แล้วจึงผ่านกระบวนการขึ้นรูป 2 แบบ คือ การขึ้นรูปแบบใช้แรงเฉือนอย่างเดียว และการขึ้นรูปแบบใช้แรงเฉือนร่วมกับความร้อน โดยพบว่าภาวะของการขึ้นรูปมีผลต่อสัณฐานวิทยาของชิ้นงานเป็นอย่างมาก และส่งผลไปยังสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปช่วยให้การกระจายของเคลย์ในพีวีซีเกิดได้ง่ายกว่า และทำให้พีวีซีพลาสติกซอลแพร่เข้าไประหว่างแผ่นซิลิเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ชั้นผลึกของเคลย์แตกออกและกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และพบว่าชิ้นงานที่ได้จากเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรมีคุณสมบัติการแตกสลายด้วยความร้อนสูงกว่าที่ได้จากเคลย์ที่ไม่ผ่านการตัดแปร

Wan และคณะ [22] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตของพีวีซีและมอนต์มอริลโลไนต์ 3 ชนิด คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการตัดแปร (Na^+ -MMT) และออร์แกโนเคลย์ 2 ชนิด ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) แล้วตรวจสอบลักษณะโครงสร้างระดับนาโนด้วยเทคนิค WAXD (wide angle X-ray diffraction) และ TEM (transmission electron microscopy) และวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลและความร้อนด้วยเทคนิค DMTA (dynamic mechanical thermal analysis) พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพีวีซี และ Na^+ -MMT มีโครงสร้างแบบ intercalate บางส่วนและยังมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบอยู่ภายใน ขณะที่นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพีวีซี และมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรทั้ง 2 ชนิด มีโครงสร้างทั้งแบบ intercalate และ exfoliate อยู่ร่วมกัน โดยความแข็งตึง และความต้านแรงกระทำของนาโนคอมพอสิตทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5-3% โดยน้ำหนัก ซึ่งชิ้นงานยังมีความใสเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์น้อยกว่า 5% นอกจากนี้ การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรไม่ควรมากกว่า 5% เพื่อให้ชิ้นงานยังคงมีสมบัติเชิงกลและเสถียรในการขึ้นรูปที่ดี

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากอีวีเอ ได้แก่

Zanetti และคณะ [23] ได้เตรียมพอลิเมอร์/ซิลิเกตนาโนคอมพอสิตจากอีวีเอ ที่มีปริมาณไวโนลอะซีเตต 12 และ 19 mole% โดยเทคนิค melt intercalation ด้วยเครื่องอัดรีด ซึ่งซิลิเกตที่ใช้ คือ fluorohectorite และ organophilic clay จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ exfoliate และผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีความต้านทานต่อการสลายตัวด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น และมีอัตราการสลายตัวลดลง

Pramanik และคณะ [24] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค solution intercalation จากอีวีเอที่มีปริมาณไวโนลอะซีเตต 28 mole% กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย dodecyl ammonium ions จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นของระนาบ 001 (d_{001}) ในมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มจาก 11.94 เป็น 15.78 Å และพบว่าถ้าใช้มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 2-6% มีผลทำให้นาโนคอมพอสิตมีโครงสร้างแบบ exfoliate แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเป็น 8% จะเกิดการจับตัวของซิลิเกตในเมทริกซ์ของอีวีเอ นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และการทดสอบความต้านแรงดึง พบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตมีสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลสูงขึ้น โดยความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น 36, 96 และ 99% การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น 16, 37 และ 42% เมื่อผสมมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไป 2, 4 และ 6% ตามลำดับ

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซีและอีวีเอ ได้แก่

An และคณะ [25] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซีและอีวีเอ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ปริมาณไวโนลอะซีเตต 38% โดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีผสมแบบสารละลาย (solution blending) และศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วยการวัดความหนืด และด้วยเทคนิค FTIR พบว่า พีวีซีสามารถเข้ากันได้ดีกับอีวีเอ เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของอีวีเอ (W_{EVA}) มีค่าน้อยกว่า 0.25 หรือมากกว่า 0.45 โดยเมมเบรนของพอลิเมอร์ผสมที่มี $W_{EVA} \leq 0.15$ มีความต้านทานต่อของผสมระหว่างเบนซีน/ไซโคลเฮกเซน ถึงแม้มีปริมาณเบนซีน 50% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 °C ดังนั้น จึงสามารถใช้เมมเบรนของพอลิเมอร์ผสมพีวีซี/อีวีเอที่มี $W_{EVA} \leq 0.15$ ในการแยกเบนซีนออกจากของผสมระหว่างเบนซีน/ไซโคลเฮกเซน ที่มีปริมาณเบนซีนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ระดับการบวมตัว (degree of swelling) และการซึมผ่านเมมเบรนของพอลิเมอร์ผสมพีวีซี/อีวีเอ ที่มี $W_{EVA} \leq 0.2$ เพิ่มขึ้นเมื่อ W_{EVA} มีค่าเพิ่มขึ้น

Mishra และคณะ [26] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ผสมระหว่างพีวีซี/อีวีเอ ที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก โดยงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซี/อีวีเอ ก่อน พบว่า มอดูลัสของชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณอีวีเอเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อีวีเอทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่ (macromolecular plasticizer) ให้กับพีวีซี ซึ่งการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณอีวีเอเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความต้านแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอีวีเอเพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงานมีความต้านแรงกระแทกสูงสุดที่อัตราส่วนของพีวีซี/อีวีเอ เท่ากับ 92.5:7.5 จึงได้นำอัตราส่วนนี้ไปผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 3, 6, 9, 12 และ 15% โดยน้ำหนัก แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นทดสอบหนา 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมนี้เพิ่มขึ้น และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นไปถึง 9% แล้วจึงเริ่มลดลง ส่วนการยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น