

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง [2]

เซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งคล้ายกับหลักการ ทำงานของแบตเตอรี่ เพียงแต่แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่แน่นอน ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และจ่ายประจุ ในการใช้งานจึงต้องทำการชาร์จกระแสไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งาน และต้องชาร์จกระแสไฟฟ้าใหม่เมื่อหมดแรงดัน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมาจากการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าจะก่อให้เกิดการไหลเวียนของอิเล็กตรอน โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงที่เป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีคือ แก๊สไฮโดรเจน และมีแก๊สออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนต์ ปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด และปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนจึงไหลจากขั้วแอโนดผ่านวงจรไปที่ขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีการรายงานครั้งแรกโดยศาสตราจารย์คริสเตียน เฟรเดอริก เซออบาย (Christian Friedrich Schoenbein) ในปี ค.ศ.1839 ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้กรดซัลฟูริก และลวดแพลทินัม เซอร์วิลเลียม โกรว์ฟ (Sir William Grove) รายงานในอีก 1 เดือนถัดมาถึง แบตเตอรี่ที่ใช้แพลทินัมและสังกะสี เมื่อใช้กรดซัลฟูริกและไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกในโลก หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็วอีกครั้งในกลางศตวรรษที่ 20 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นได้จากประสิทธิภาพทางเคมี โดยอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ไม่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ที่เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพการทำงานในเครื่องกำเนิดพลังงานจากความร้อน เช่น ระบบกังหันแก๊ส และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ประสิทธิภาพการทำงานจึงสูงถึงร้อยละ 85 ในทางทฤษฎี ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่นำมาใช้จะต้องนำมาคิดหาค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงด้วยหากต้องมีการแปรสภาพก่อนการใช้งาน

เซลล์เชื้อเพลิงจำแนกออกได้หลายระบบขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหลว โดยจะต้องใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์และ

แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เท่านั้น การใช้งานจำกัดอยู่ในงานทางด้านอวกาศ เช่น ในยานอวกาศพอลโล ออณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 60-120 องศาเซลเซียส

2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ สามารถทนต่อแก๊สเจือปนได้มากกว่าแบบ AFC แต่ก็ยังใช้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ชนิดเดียวกัน อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ปัญหาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ การกัดกร่อนของกรดที่อุณหภูมิการใช้งาน ในปัจจุบันได้มีการใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว โดยมีขนาดกำลังไฟฟ้า ประมาณ 200 กิโลวัตต์
3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เป็นชนิดที่ใช้เยื่อแผ่นพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับของเหลวอิเล็กโทรไลต์ที่กัดกร่อนเพราะมีของเหลวชนิดเดียวภายในเซลล์คือ น้ำ เซลล์ชนิดนี้ใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเยื่อแผ่นพอลิเมอร์เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จากเชื้อเพลิงเมทานอล โดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนก่อน จึงเรียกเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่นี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมทานอลได้โดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell) เพราะอุณหภูมิการใช้งานค่อนข้างต่ำจึงใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยกว่าประเภทอื่น บริษัทรถยนต์ต่าง ๆ ตระหนักถึงปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จึงได้มีการพัฒนา PEMFC เพื่อใช้ในรถยนต์สำหรับอนาคตซึ่งได้เริ่มทำมาหลายปีแล้ว คาดว่าในอนาคตอันใกล้นี้ จะมีรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ ทั้งในรูปของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและรถโดยสารประจำทาง
4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นพวกเกลือคาร์บอเนตหลอมของโซเดียมและโปแตสเซียมในเซรามิกเมตริกซ์ของลิเทียมออกไซด์ (LiAlO_2) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ที่ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ดังนั้นปัญหาจากการกัดกร่อนจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ นิยมใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเมกะวัตต์จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานเนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน

5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสารที่ใช้มากคือ สารประกอบของเซอร์โคเนีย โดยใช้งานที่อุณหภูมิ 650-1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และออกซิเจนในอากาศนำมาใช้เป็นออกซิแดนซ์ได้ ค่ายรถ BMW ต้องการนำเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง มาใช้เป็นระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยไม่ได้ใช้ในการขับเคลื่อน นอกจากนี้ SOFC ได้มีการพัฒนาให้ใช้เป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าทั้งขนาด 1-2 กิโลวัตต์ เพื่อใช้ภายในบ้านเรือน โดยบริษัท Sulzer Hexis สวิสเซอร์แลนด์ หรือบริษัท Ceramic Fuel Cells Limited ของประเทศออสเตรเลียที่มีขนาดหลายสิบกิโลวัตต์ขึ้นไป เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าในชุมชนเช่นของ บริษัท Siemens Westinghouse ของสหรัฐอเมริกา มีแนวโน้มการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อเป็นโรงไฟฟ้าขนาดย่อม ตั้งแต่ร้อยกิโลวัตต์ขึ้นไป โดยในอนาคตจะพัฒนาให้ทำงานร่วมกับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันแก๊สหรือกังหันไอน้ำด้วยความร้อนที่เหลือจากปฏิกิริยาในเซลล์

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) [4-5]

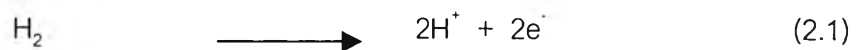
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์แข็ง (Solid Polymer Fuel Cell, SPFC) ถูกผลิตและพัฒนาโดยบริษัท General Electric (GE) เป็นผู้พัฒนาและเรียกชื่อเซลล์ชนิดนี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Membrane Fuel Cell, IEMFC) ภายหลังมีการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้และเรียกเซลล์เชื้อเพลิงนี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องมีการเคลื่อนย้ายเช่น การใช้กับรถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นของพลังงานสูง ภาวะอุณหภูมิการทำงานมีค่าอยู่ในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส องค์การอวกาศของสหรัฐอเมริกาหรือองค์การนาซา (NASA) นำเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ไปใช้เพราะมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง (High power density)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพื่อเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออนไฮโดรเจนหรือโปรตอน โดยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์จะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัม (Pt)

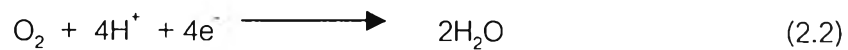
กระจายอย่างสม่ำเสมอ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน แสดงดังรูปที่ 2.1 น้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีถูกดึงออกจากเซลล์พร้อมกับแก๊สที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทางขั้วแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกจากระบบโดยระบบหล่อเย็น (Cooling system)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนต้องอาศัยความชื้นเป็นตัวกลางในการพาไฮโดรเจนไอออนให้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นพอลิเมอร์จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เนื่องจากเยื่อแผ่นพอลิเมอร์มีสมบัติในการนำไอออนได้ดีเมื่อมีความชื้น ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต้องเป็นแก๊สที่มีความชื้น (Humidified gases) โดยปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : ไฮโดรเจนถูกออกซิไดส์เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอน ดังสมการ

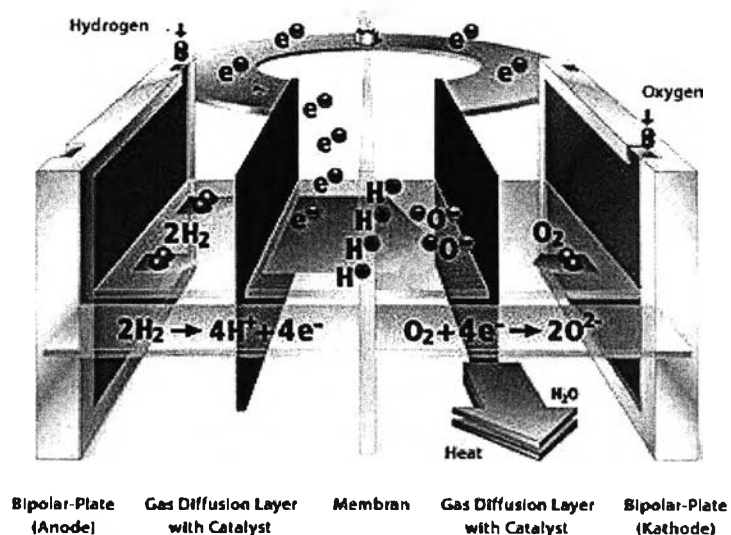


ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด : ไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดเกิดการแพร่ผ่านเยื่อพอลิเมอร์ไปยังขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังสมการ



ปฏิกิริยาสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังสมการ



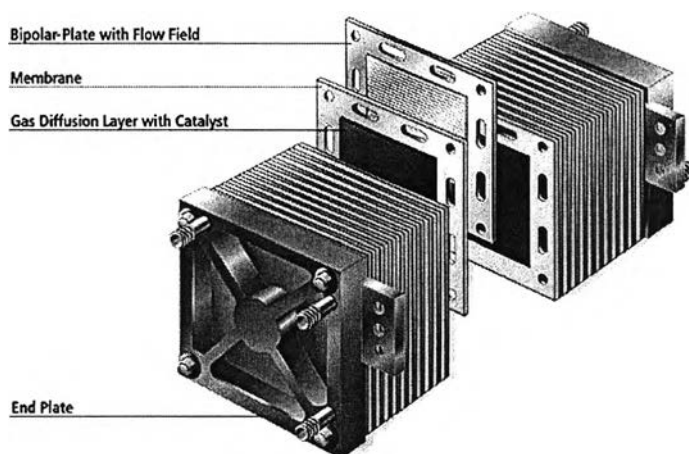


รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [6]

สำหรับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมี ปัจจัยหรือตัวแปรหลายอย่างที่เกี่ยวข้อ ดังนี้

1. ชนิดและความหนาแน่นของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์
2. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ชนิดและสมบัติของชั้นการแพร่ผ่านของแก๊ส (Gas diffusion layer)
5. ความต้านทานไฟฟ้าขององค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิง
6. ความต้านทานหน้าสัมผัส
7. รูปแบบของช่องทางเดินแก๊ส (Gas flow field)
8. เงื่อนไขในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และความชื้นของแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น

เมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว (Single cell) หลายๆ เซลล์เรียงซ้อนกันแบบอนุกรมเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแถว (Fuel cell stacks) โดยมีแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วเชื่อมระหว่างเซลล์เดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแถว [7]

โดยแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วมีหน้าที่หลักคือ [8-11] กระจายเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ภายในเซลล์ จัดการน้ำภายในเซลล์ นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์ กำจัดความร้อนออกจากพื้นที่ทำปฏิกิริยาและป้องกันการรั่วไหลของแก๊สและสารหล่อเย็น ดังนั้นการนำวัสดุมาใช้ผลิตแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วต้องมีสมบัติดังนี้คือ นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้ มีความแข็งแรงต่อการบีบอัด ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่มีสารเป็นพิษต่อเยื่อแผ่นพอลิเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยา ราคาถูกใช้วัสดุที่หาง่ายและสามารถขึ้นรูป (Machine) ได้ง่าย

2.3 การผลิตแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plate manufacturing) [8-11]

การผลิตแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วแบ่งได้ตามวัสดุที่ใช้ดังนี้

1. การขึ้นรูปแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite plate fabrication)

นำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ทำมาจากของผสมแกรไฟต์ที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ที่เป็นผลึก (Crystalline graphite) ที่มีสารเติมแต่ง (Additive) และตัวประสาน (Binder) มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) แล้วนำไปให้ความร้อน (Heat treatment) ในภาวะที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน

สารเติมแต่งที่เหมาะสมในการทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite bipolar plate) ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) เซอร์คอน

ไดออกไซด์ (Zircon dioxide) ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) และ ผงถ่านหิน (Powdered coke)

ตัวประสานที่ใช้ในการทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน ได้แก่ ถ่านหินที่ได้จากอุณหภูมิ 300-800 องศาเซลเซียส คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เช่น ฟรุคโตส (Fructose) กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) และแมนโนส (Mannose) โอลิโกแซคาไรด์ (Oligosaccharide) เช่น ซูโครส (Sucrose) มอลโตส (Maltose) และแลคโตส (Lactose)

การเลือกแกรไฟต์มาใช้เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีและมีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแกรไฟต์คือ การขึ้นรูปยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุทดแทนแกรไฟต์ โดยอาศัยสมบัติของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วดังกล่าวข้างต้น

2. แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของโลหะ (Metallic plate fabrication)

การนำโลหะมาทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วเนื่องจากโลหะนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก สามารถผลิตได้ในปริมาณมากราคาถูกและให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง สำหรับข้อจำกัดของโลหะคือ ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีภาวะเป็นกรดสูง มีผลให้เกิดการป้องกันตัวเองของโลหะโดยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวโลหะเพื่อลดการกัดกร่อนของตัวโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “แพสซิเวชัน (Passivation)” ตัวอย่างของโลหะที่เกิดแพสซิเวชันได้ง่ายเช่น สแตนเลส (Stainless) นิกเกิล (Nickel) ไทเทเนียม (Titanium) อะลูมิเนียม (Aluminium) และโลหะผสม (Alloy) ตัวอย่างของชั้นป้องกันที่อาจเกิดขึ้นได้แก่ ออกไซด์ของโลหะและออกไซด์ของโลหะผสมเป็นต้น ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โลหะที่นำมาทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วต้องผ่านกระบวนการเคลือบโลหะ (Coating) ก่อน โดยวัสดุและกระบวนการที่ใช้เคลือบแสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

โลหะที่ได้รับความสนใจนำมาทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว เช่น ไทเทเนียม สแตนเลส และอะลูมิเนียม สำหรับสแตนเลสมีการศึกษาและลองใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว [4]

ข้อเสียของสแตนเลสบางชนิดหรือบางเกรดคือ มีการปนเปื้อน (Contamination) จากไอออนของโลหะโครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) และนิกเกิล (Ni) หลังจากทดสอบใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีผลให้ความสามารถในการนำไอออนของเมมเบรนลดลง

อะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมที่มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือเกิดฟิล์มบางเคลือบที่ผิวหรือเกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียมซึ่งมี

ผลต่อการนำไฟฟ้า แต่สามารถปรับปรุงผิวหน้าของอะลูมิเนียมด้วยการชุบทองเพื่อลดผลจากความต้านทานของออกไซด์ของอะลูมิเนียม

3. แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของคอมโพสิต (Composite plate fabrication)

แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ทำจากแกรไฟต์มีสมบัติเด่นคือ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมอีกทั้งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยมาก แต่ข้อเสียของแกรไฟต์คือ ชื้นรูปค่อนข้างยากเนื่องจากมีความเปราะอีกทั้งยังมีราคาสูง นอกจากนั้นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ทำจากโลหะที่ผ่านกระบวนการเคลือบแล้ว เมื่อนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถลดการกัดกร่อนได้แต่ไปเพิ่มความต้านทานหน้าสัมผัส ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วเนื่องจากราคาต่ำ ง่ายต่อการขึ้นรูป ทนต่อการเกิดการกัดกร่อนและน้ำหนักเบา โดยแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วของคอมโพสิต แบ่งตามวัสดุที่ใช้ดังนี้

3.1 Metal-base

Metal-base composite bipolar plate ได้รับการพัฒนาโดย Los Alamos National Laboratory ซึ่งใช้ แกรไฟต์ที่มีรูพรุน (Porous graphite) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เนื่องจากแกรไฟต์สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ เหล็กกล้าไร้สนิม แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้และมีความแข็ง พอลิคาร์บอเนตทนต่อสารเคมีและสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย โดยกระบวนการทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว เริ่มจากเตรียมชั้นของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel layer) โดยการตัด (Shearing) หรือการกด (Stamping) จากนั้นนำแกรไฟต์ที่มีรูพรุนและพอลิคาร์บอเนตผสมกันในเครื่องผสมและขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding) หรือการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นำแผ่นคอมโพสิตที่ได้ไปอบในเตาอบจากนั้นนำสารเกาะติดที่นำไฟฟ้า (Conductive adhesive) ให้ติดอยู่บนแผ่นคอมโพสิตด้วยวิธีการพริ้นท์สกรีน (Screen-print method) นำชั้นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เตรียมได้จากวิธีข้างต้นมาเชื่อมติดกับแผ่นคอมโพสิตด้วยกระบวนการอัดด้วยความร้อน (Hot-press)

ข้อเสียของ Metal-base composite bipolar plate คือต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอน ในการทำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว

3.2 Carbon-base

Carbon-base composite bipolar plate ใช้เทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Poly (vinylidene fluoride) หรือเรซินของเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolics resin) อีพ็อกซีเรซิน

(Epoxy resin) และ ไวนิลเอสเทอร์เรซิน (Vinyl ester resin) ผสมกับสารเติมแต่งซึ่งอาจเสริมแรงด้วยเส้นใย วัสดุที่นำมาใช้ทำคาร์บอนคอมโพสิต (Carbon composites) และกระบวนการในการผลิตคาร์บอนคอมโพสิตแสดงดังตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ

ข้อดีของ Carbon-base composite bipolar plate คือ วัสดุที่ใช้มีราคาถูกลงและง่ายต่อการขึ้นรูป แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วมีน้ำหนักเบา

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้เคลือบโลหะสำหรับทำแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้น [11]

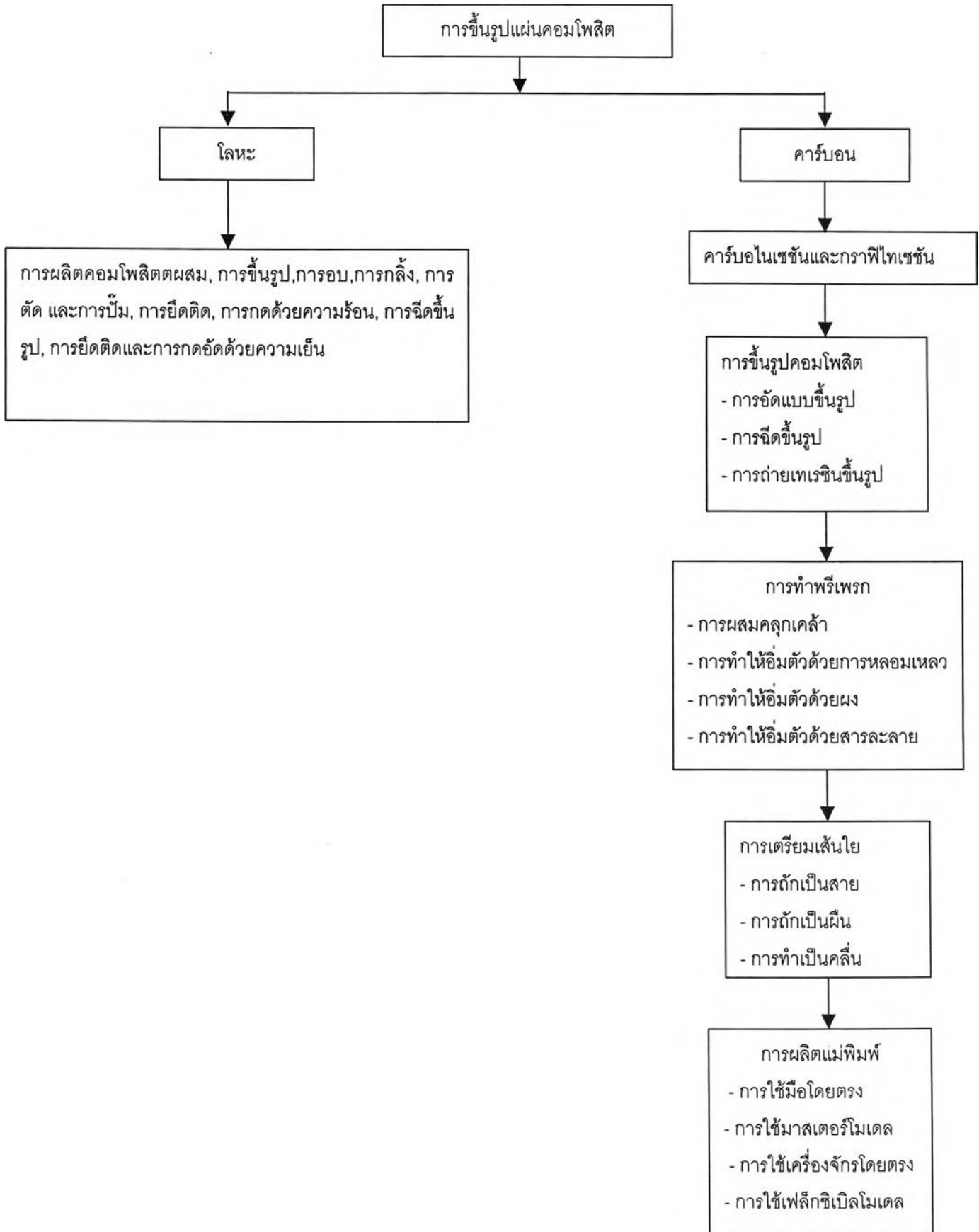
| วิธีการเคลือบ (Coating method) | วัสดุที่ใช้เคลือบ (Coating materials) | การประยุกต์ใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นแผ่นเบส | | | |
|---|---|---|----|----|----|
| | | Al | SS | Ti | Ni |
| การเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า | พอลิเมอร์นำไฟฟ้า | ไม่ระบุ | | | |
| การเคลือบคาร์บอนคล้ายเพชร | คาร์บอนคล้ายเพชร | ไม่ระบุ | | | |
| การเคลือบชั้นบนด้วยทอง | ทองแดงเคลือบด้วยนิกเกิลและทองตามลำดับ | X | | | |
| การเคลือบด้วยฟอยล์แกรไฟต์ | (1) ผิวชั้นล่าง-อนุภาคแกรไฟต์ถูกกระตุ้นด้วยเสียง ในอิมัลชัน สารแขวนลอย หรือสี (เช่น อนุภาคแกรไฟต์ ในอีพ็อกซีเรซินถูกทำให้บางลงด้วยสารละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอิน) (2) การหลุดลอกของชั้นบนแกรไฟต์ในรูปของแผ่นที่ยึดหยุ่น และฟอยล์แกรไฟต์ | X | | X | X |
| การเคลือบชั้นบนด้วยแกรไฟต์ | (1) ผิวชั้นล่าง-ไทเทเนียมเคลือบบนไทเทเนียม- อะลูมิเนียม-ไนไตรด์ (2a) ชั้นบน-ชั่วคราว ของชั้นโลหะของโครเมียม ที่คลุมอยู่ชั่วคราว (ไทเทเนียม นิกเกิล เหล็กและโคบอลต์) ตามด้วยกรดซัลฟูริก/กรดโครมิก หรือ(2b) ชั้นบน-แกรไฟต์ | X | X | X | X |
| การเคลือบอินเดียมที่ถูกได้ป ด้วยทินออกไซด์ | อินเดียมถูกได้ปด้วยทินออกไซด์ (Sn(In)O_2) | | X | | |
| การเคลือบด้วยเลดออกไซด์ การเคลือบด้วยมอนอพอลิเมอร์ อินทรีย์ | (1) ผิวชั้นล่าง- เลด; (2) ผิวด้านบน- เลดออกไซด์ (PbO/PbO_2)สารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่คล้ายมอนอพอลิเมอร์ | | X | | |
| การเคลือบด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ | (1) n-Type ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC); (2) ทอง | | X | | |
| การเคลือบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม | (1) ผิวชั้นล่าง- โครเมียม/นิกเกิล/โมลิบดีนัม-เหล็กกล้า ไร้สนิมมากเกินพอ หรือ นิกเกิล-ฟอสฟอรัส อัลลอยด์ (2) ผิวชั้นบน-ไทเทเนียมไนไตรด์ | X | X | X | |
| การเคลือบไทเทเนียม- อะลูมิเนียม-ไนไตรด์ | ชั้นของไทเทเนียม-อะลูมิเนียม | X | | | |
| การเคลือบไทเทเนียม-ไนไตรด์ | ชั้นของไทเทเนียม-ไนไตรด์ (TiN) | | | X | |

ตารางที่ 2.2 กระบวนการเคลือบโลหะ (Coating process for metallic plates) [11]

| วิธีการเคลือบ (Coating method) | กระบวนการเคลือบ (Coating process) |
|---|--|
| การเคลือบผิวชั้นบนด้วยทอง | รวมกับการเกาะติดด้วยกระแสไฟฟ้า |
| การเคลือบด้วยเหล็กกล้าไร้ สนิม | การสลายทางกายภาพด้วยไอ (Physical vapor deposition ,PVD) ตัวอย่างเช่น การฉาบโลหะด้วยเมกนีตรอน หรือ การสลายทางเคมี ด้วยไอ (chemical vapor deposition, CVD) และการพอกพูนโดยไม่ใช้ กระแสไฟฟ้า(electroless deposition) สำหรับ Ni -Ph alloy |
| การเคลือบผิวชั้นบนด้วยแกรไฟต์ | PVD |
| การเคลือบชั้นบนด้วยแกรไฟต์ | PVD (closed-field, unbalance, magnetron sputter ion plating) และ การเคลือบสารเคมีด้วยเทคนิค anodization/oxidation |
| การเคลือบด้วยแกรไฟต์พอยล์ | การทาหรือการกด |
| การเคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ | RF-ไดโอด สปีทเทอร์ริง |
| การเคลือบด้วยอินเดียมที่ถูกลบด้วย ทินออกไซด์ | การกลายเป็นไอของลำแสงอิเล็กตรอน |
| การเคลือบด้วยเลดออกไซด์ | การสลายตัวด้วยไอและการสปีทเทอร์ริง |
| การเคลือบด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ | การสลายของประจุและการสลายของไอ |
| การเคลือบด้วยไทเทเนียม-อะลูมิเนียม- ไนไตรด์ | RF-พานาร์เมกนีตรอน (สปีทเทอร์ริง) |

ตารางที่ 2.3 วัสดุที่ใช้ทำคาร์บอนคอมโพสิตสำหรับแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว [11]

| เรซิน | สารเติมแต่ง | เส้นใย |
|--|-----------------------|--|
| พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ | อนุภาคคาร์บอน/แกรไฟต์ | - |
| พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ | อนุภาคคาร์บอน/แกรไฟต์ | เส้นใยคาร์บอน/แกรไฟต์ |
| ของผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและสารอะโรมาติกทำให้แข็ง | ผงแกรไฟต์ | - |
| ฟีนิล-แอลดีไฮด์ รัซอล หรือ ฟีนิล-แอลดีไฮด์ โนโวแลก | ผงแกรไฟต์ | เส้นใยแกรไฟต์ หรือ วิสเกอร์ |
| ฟีนิล-แอลดีไฮด์ รัซอล หรือ ฟีนิล-แอลดีไฮด์ โนโวแลก | อนุภาคถ่านหิน-แกรไฟต์ | - |
| Reichhold 24-655 ฟีนอลิกเรซิน | ผงแกรไฟต์ | เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เส้นใยเรยอง และเซลลูโลสอะซิเตท) |
| ฟีนอลิกเรซินฟูแรนเรซิน | ผงแกรไฟต์ | เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เส้นใยเรยอง และเซลลูโลสอะซิเตท) |
| ฟีนอลิกเรซิน | | เส้นใยคาร์บอน (PAN-Based) |
| ไวนิลเอสเทอร์ | ผงแกรไฟต์ | คอตตอนฟลิก (เส้นใยแกรไฟต์/คาร์บอน) เส้นใยแก้ว เส้นใยคอตตอน และพอลิเมอร์ |



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นคอมโพสิต (Composite plate fabrication) [11]

2.4 พอลิเมอร์คอมโพสิต [12-17]

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิด ที่มีสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้ว จะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

วัสดุประกอบหรือคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรง และค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ และเซรามิก คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

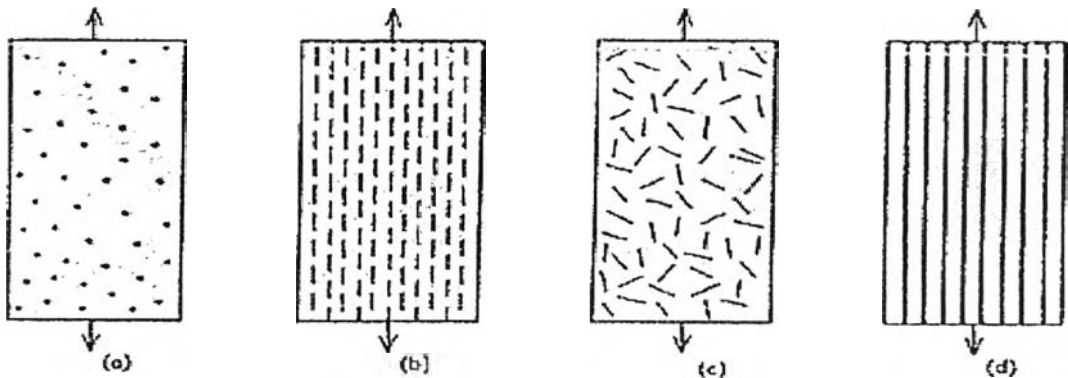
- คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัว และขนาดต่างๆ กัน อาจเป็นผง เม็ดหรือผลึก
- คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์ ในลักษณะคล้ายแซนวิช อัดด้วยความดันสูง ซึ่งจะได้เป็นชั้นๆ
- คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์ (Organic fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

คอมโพสิตจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนดังนี้

1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) ซึ่งส่วนนี้จะใช้องค์ประกอบหลักของคอมโพสิตจัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) และเป็นส่วนที่ช่วยหล่อหุ้ม และยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกันโดยทั่วไปเมตริกซ์มักมีความเหนียวสูง ความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรงหน้าทีของเมตริกซ์ในคอมโพสิต ได้แก่

- รักษาความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
- รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน
- ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสภาพภายใต้อุณหภูมิ หรือแรงกระทำที่ระดับหนึ่งๆ
- สามารถกระจาย หรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
- ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) เป็นวัสดุที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงมาก เป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ก็ได้ ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจจะเป็นเส้นใย ต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้น เส้นใยที่ใช้เสริมแรงคอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างคอมโพสิต ที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาคจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม และ (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน [16]

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรมีลักษณะดังนี้

- เส้นใยควรมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะมีเสถียร และรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บ และขึ้นรูปได้
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต ได้แก่

- เส้นผ่าศูนย์กลาง
- ความยาวของเส้นใย
- ปริมาตรของเส้นใย
- ลักษณะรูปร่างของเส้นใย
- การจัดเรียงตัวของเส้นใยในคอมโพสิต

2.4.1 ส่วนเมตริกซ์

เมตริกซ์มีหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอน (Carbon Metrics) เซรามิกซ์ (Ceramic Metrics) แก้ว (Glass Metrics) โลหะ (Metal Metrics) และพอลิเมอร์ (Polymer Metrics) งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงแต่พอลิเมอร์เมตริกซ์เท่านั้น พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลิดผลที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลิดผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอมไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียม และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมตริกซ์มีความแข็งแรงมาก หรือมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลง ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซตแสดงดังรูปที่ 2.5

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมตริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่

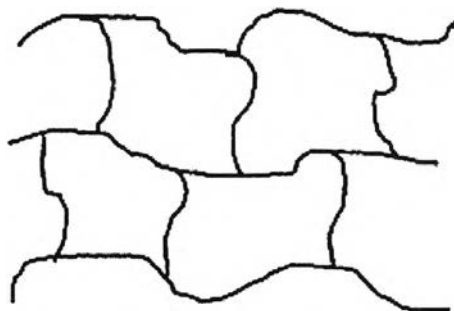
- พอลิเอสเทอร์เรซิน (Polyester resin)

พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นเทอร์โมเซตซึ่งเกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ข้อดีของการใช้พอลิเอสเทอร์เรซินคือ ราคาถูก แต่ข้อเสียของการใช้พอลิเอสเทอร์เรซินคือ ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิไม่ดี (Poor temperature capabilities) มีระยะเวลาในการเก็บรักษาจำกัด ไม่ทนต่อสภาพบรรยากาศและสมบัติเชิงกลไม่ดี

- อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resins)

อีพ็อกซีเป็นเทอร์โมเซตซึ่งสายโซ่ของพอลิเมอร์เป็นโครงร่างเชื่อมโยงที่แข็งแรง มีการยึดเกาะ (Adhesion) และสมบัติเชิงกลดี ทนต่อสารเคมีและสภาพบรรยากาศได้ดี

ทนต่อความล้าได้ดี ป้องกันการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ที่อุณหภูมิสูงประสิทธิภาพของอีพ็อกซีเรซินจะลดลงจะเป็นพิษเมื่อเรซินไม่ผ่านการบ่มให้สุกและมีราคาแพง



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต [17]

- พอลิอิมิดเรซิน (Polyimide resins) และพอลิเบนซิมิดาโซล (Polybenzimidazole resins) เป็นเทอร์โมเซตที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนดีเยี่ยม สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนต่อสารละลายได้หลากหลายขึ้นอยู่กับความจำเพาะของสารประกอบ (Specific compound) กระบวนการสังเคราะห์และวิธีการผลิตยุ่งยาก การสัมผัสเรซินควรระมัดระวังเนื่องจากเรซินมีพิษ นอกจากนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีราคาแพง ทำให้เรซินมีราคาแพงด้วย

- ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

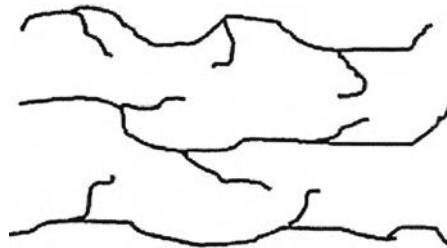
ฟีนอลิกเรซินเป็นเทอร์โมเซตที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีและง่ายต่อการขึ้นรูป แต่เป็นสารดูดความชื้นได้ง่าย เปราะและมีราคาแพง

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอม และแข็งตัวหลายๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic) เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมี การจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้น

กับองค์ความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับภาวะในการผลิต การจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติกแสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิคาร์บอนเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ อะคริลิก พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน เป็นต้น

ข้อดีของการใช้เทอร์โมพลาสติกคือ มีวิธีการผลิตหลายวิธี เวลาในการผลิตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมเซต ความแข็งแรงในการกดอัดดีหลังจากได้รับแรงกระแทก ไม่ดูดความชื้น

ข้อเสียของการใช้เทอร์โมพลาสติกคือ สมบัติเชิงกล ทางเคมี ทางความร้อนและทางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับการเลือกจำเพาะเจาะจง



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก [17]

2.4.2 ส่วนเสริมแรง

เส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในคอมโพสิต สามารถแบ่งเป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ผสมลงในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น

ใยแก้วที่นำมาใช้เสริมแรงจะมีลักษณะเฉพาะที่ดีคือ มีความแข็งแรงสูง มีรูปทรงที่เสถียร เป็นฉนวนความร้อน-เย็นได้ดี ไม่ดูดความชื้น ทนทานต่อการผุกร่อนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาค่อนข้างถูก แก้วที่ใช้สำหรับทำใยแก้ว ที่นับว่าสำคัญที่สุดมีอยู่ 2 ประเภท คือ E (Electrical) glass และ S (High – strength) glass

2. เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัตถุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติม และสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำ

มาใช้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ เช่น

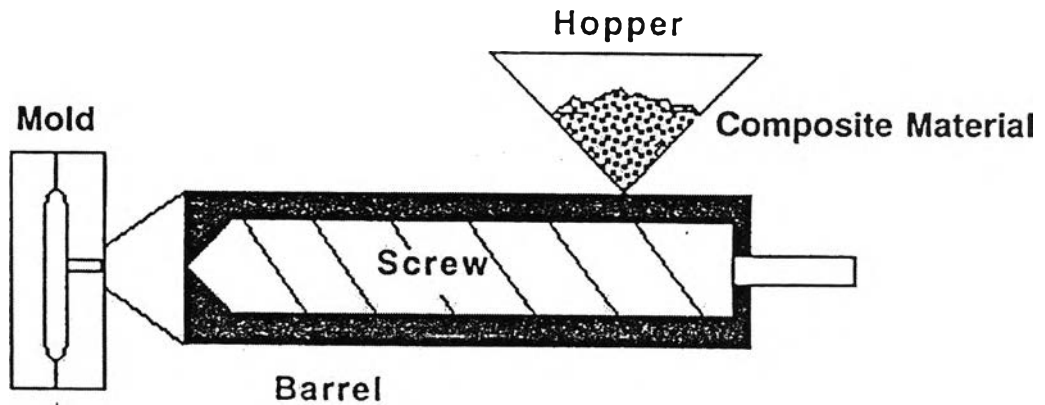
- ความแข็งแรง
- ความเหนียว
- ความเสถียรภาพของรูปร่าง
- การคืบ
- ความทนทานต่อการใช้งาน

2.5 การขึ้นรูปคอมโพสิต (Composite fabrication) [18-19]

เมตริกซ์หรือส่วนเสริมแรงสามารถประกอบกันหรือขึ้นรูป (Fabrication) เป็นคอมโพสิตรูปร่างต่างๆ ได้หลากหลายวิธี เช่นการขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยการใช้มือ (Hand lay up) การสเปรย์ (Spray up) การดึงรีด (Pultrusion) การม้วนพัน (Filament winding) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การถ่ายเทเรซินขึ้นรูป (Resin transfer molding) การฉีดขึ้นรูปแบบใช้ปฏิกิริยาเสริมแรง (Reinforced reaction injection molding, RRIM) และอื่นๆ กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมโพสิตมีดังนี้

2.5.1 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป

เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์คอมโพสิตจากเส้นใยสั้นที่มีรูปร่างซับซ้อน นิยมใช้กับเมตริกซ์ชนิดเทอร์โมพลาสติกมากกว่าเทอร์โมเซต เทคนิคนี้นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในการผลิตคอมโพสิตชนิดเทอร์โมพลาสติก วัสดุผสมของเส้นใยสั้นและพอลิเมอร์ในรูปเม็ดหรือผงจะถูกส่งเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ที่ฮอปเปอร์หรือกรวยใส่ (Hopper) และไหลผ่านไปยังกระบอกลูกสูบ (Barrel) ที่ร้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์อ่อนตัวและกลายเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลได้ พอลิเมอร์และเส้นใยสั้นจะถูกส่งต่อไปสะสมที่ส่วนหน้าของเครื่องโดยการหมุนของสกรูหรือเกลียวหนอน (Screw) ในจังหวะฉีดสกรูจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดความดันสูงผลักดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวผสมเส้นใยสั้นไหลเข้าช่องแคบเล็กๆ เข้าไปยังแม่แบบ (Mold) จนเต็ม จากนั้นจะรอให้พอลิเมอร์คอมโพสิตเย็นตัวจนกลายเป็นของแข็งแล้วระบบปลดชิ้นงาน (Eject) จะทำคอมโพสิตหลุดจากแม่แบบ จากนั้นแม่แบบก็จะปิดแล้วระบบการฉีดจะทำงานซ้ำใหม่ เครื่องฉีดขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องฉีดขึ้นรูป [18]

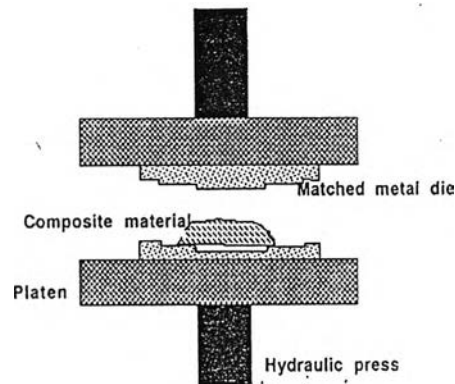
2.5.2 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูป

การอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding) เป็นเทคนิคขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่เก่าแก่ที่สุด เทคนิคหนึ่ง สามารถใช้ผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ได้ง่าย เครื่องมือราคาไม่แพง ไม่มีเศษเหลือจากกระบวนการผลิตมากเหมือนการฉีดขึ้นรูป เช่น ทางฉีด (Sprues) ทางวิ่ง (Runners) หรือทางเข้า (Gates) สามารถใช้เส้นใยขนาดยาวกว่าและมีปริมาณมากกว่าเทียบกับการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นชิ้นส่วนคอมโพสิตที่ได้จากการอัดแบบขึ้นรูปจะมีสมบัติเชิงกลดีกว่าคอมโพสิตจากการฉีดขึ้นรูป เนื่องจากแรงกดอัด (Molding pressure) ของเครื่องอัดแบบขึ้นรูปต่ำกว่าเครื่องฉีดขึ้นรูป ดังนั้นเทคนิคอัดแบบขึ้นรูปจึงนิยมใช้ผลิตคอมโพสิตขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ผิวกว้างมากกว่าเทคนิคการฉีดขึ้นรูป เครื่องอัดแบบขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.8 ส่วนขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูปมี 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. การเตรียมวัสดุและการใส่ (Charge preparation and placement) ขั้นแรกเป็นขั้นการเตรียมชั้น (Plies) ของสารประกอบอัดแผ่นแบบซีท (Sheet molding compound, SMC) หรือพรีเพรก (Prepregs) ที่เรียกว่า "Charge" โดยการตัดให้มีขนาด รูปร่าง และทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใยตามต้องการและเหมาะสมกับแม่แบบ ทำการลอกแผ่นฟิล์มรองของแผ่น SMC ออกแล้ววางซ้อนในแม่แบบในทิศทางที่กำหนด

2. การปิดแม่แบบ (Mold closing) เมื่อใส่วัสดุในแม่แบบแล้ว จะทำการปิดแม่แบบแรงกดจะทำให้อากาศภายในแม่แบบเคลื่อนที่ออกทางด้านข้างรอยต่อของแม่แบบพร้อมวัสดุ SMC ส่วนเกิน อุณหภูมิของแม่แบบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของวัสดุน้อยลงและไหลเต็มแม่แบบ อย่างไรก็ตามการไหลของวัสดุจะน้อยกว่าการไหลที่ได้จากเทคนิคการฉีดขึ้นรูปมาก

3. การเชื่อมโยง (Curing) หลังจากช่องว่างภายในแม่แบบถูกเติมเต็ม แม่แบบจะปิดตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นของแข็ง เวลาที่ใช้เชื่อมโยงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยง อุณหภูมิเชื่อมโยง ความหนาของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะทำการเปิดแม่แบบและนำชิ้นงานคอมโพสิตออกจากนั้นจะทิ้งให้ชิ้นงานคอมโพสิตเย็นภายนอกแม่แบบ ก่อนทำการตัดแต่งชิ้นงาน ขณะเย็นคอมโพสิตอาจเกิดการเชื่อมโยงต่อและมีการหดตัว การออกแบบรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ดีจะช่วยทำให้การกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอ ช่วยให้ชิ้นงานไม่เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stresses) ทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว



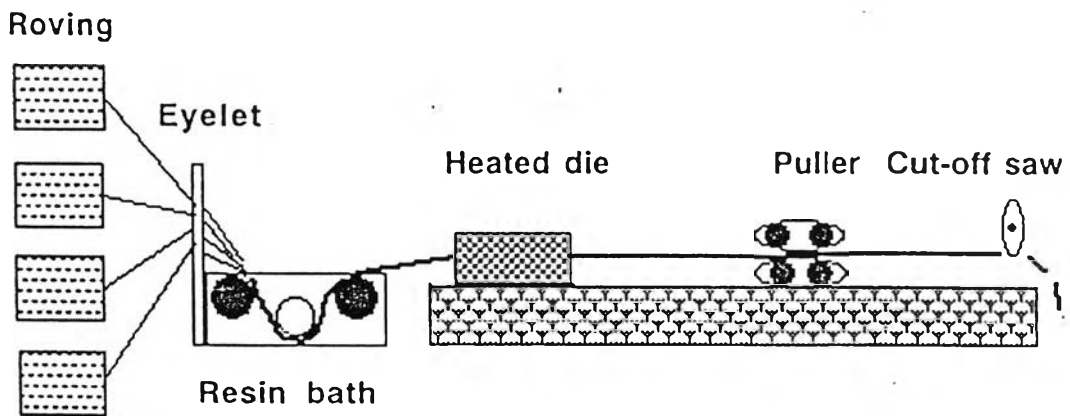
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดแบบขึ้นรูป [18]

2.5.3 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการดึงรีด

เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบดึงรีด (Pultrusion) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ผลิตคอมโพสิตที่มีความยาวต่อเนื่องและมีพื้นที่หน้าตัดเหมือนกัน เช่น ท่อกลวง (Tube) ท่อตัน (Rod) หรือรูปหน้าตัดอื่นๆ เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ดังนั้นจึงมีอัตราเร็วการผลิตสูง ได้ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตจำนวนมากอย่างรวดเร็ว จึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ แต่เทคนิคนี้ต้องลงทุนสูงเนื่องจากเครื่องมือขึ้นรูปมีราคาแพง

เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบดึงรีดคล้ายกับเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกแบบอัดรีด (Extrusion) ต่างกันที่เทคนิคนี้การขึ้นรูปคอมโพสิตต้องใช้แรงดึงเส้นใยยาวต่อเนื่องหลายๆ เส้นผ่านถาดหรือภาชนะบรรจุเรซินผสมสารเชื่อมโยง เส้นใยที่เปียกติดเรซินจะถูกนำมาผ่านแม่แบบหรือตาย (Die) ที่ร้อนให้มีรูปร่างตามต้องการ จากนั้นจะถูกดึง (Haul off) ผ่านตู้อบความร้อนเพื่อทำการเชื่อมโยงคอมโพสิตให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แล้วจึงผ่านเครื่องตัดเช่น ใบเลื่อย

(Saw cutter) ให้มีความยาวตามต้องการ ขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบดึงรีดแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

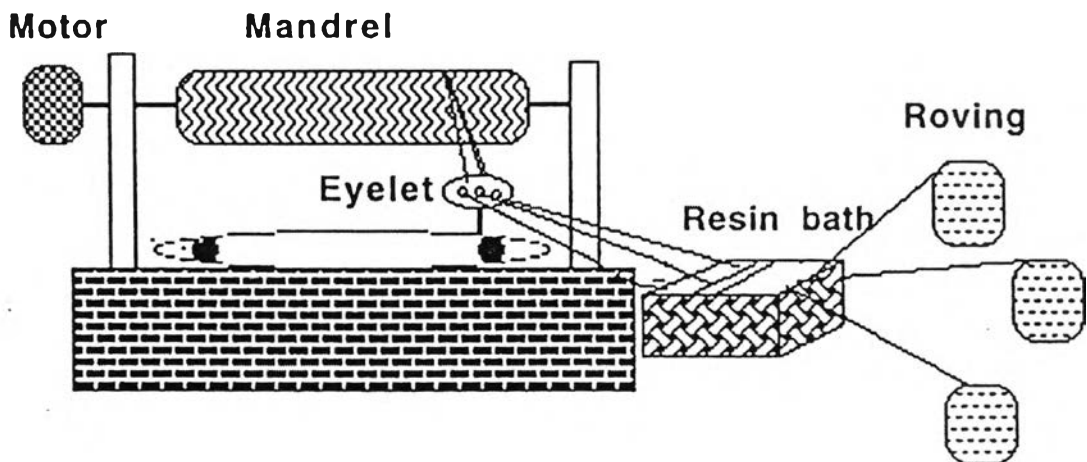


รูปที่ 2.9 เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบดึงรีด [18]

2.5.4 การขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเทคนิคการม้วนพัน

เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบม้วนพัน (Filament winding) เป็นเทคนิคที่สำคัญที่สุดเทคนิคหนึ่งในการใช้ผลิตคอมโพสิตเส้นใยยาวต่อเนื่อง กลวง ลักษณะผลิตภัณฑ์คอมโพสิตเป็นชั้นลามิเนตรูปทรงกระบอก ผิวด้านในเรียบด้านเดียว เช่น ท่อ (Pipes) ถึงความดันสูง (Pressure vessels) และอื่นๆ

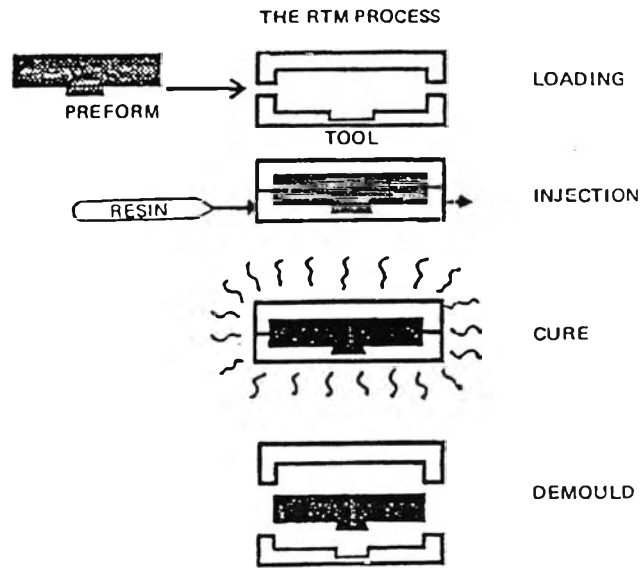
เทคนิคการขึ้นรูปแบบการม้วนพันประกอบด้วยม้วนของเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fiber roving) นิยมใช้เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือแถบเส้นใยแก้ว (Glass tape หรือ ribbon) ที่ถูกส่งให้ผ่านถาดหรือภาชนะบรรจุเรซินที่ผสมสารเชื่อมโยง เส้นใยที่เปียกชุ่มด้วยเรซินและสารเชื่อมโยงจะผ่านส่วนนำเส้นใย (Filament guides) ต่ไปยังม้วนพันแม่แบบหรือแมนเดรล (Mandrel) ที่หมุนรอบ ความหนาของผลิตภัณฑ์สามารถควบคุมได้จากจำนวนรอบที่ม้วนพัน ส่วนทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยควบคุมได้จากมุมของแมนเดรลที่พัน โดยมีการควบคุมความตึง (Tension) และมุมการพัน (Winding angle) ของเส้นใยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งแรงและมีคุณภาพ แมนเดรลจะมีรูปทรงกระบอกคล้ายท่อลักษณะเหมือนผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่จะผลิต อาจสามารถถอดแยกเป็นส่วนๆ เพื่อง่ายในการถอดแมนเดรล เมื่อพันเส้นใยเสร็จแล้วจะนำคอมโพสิตไปให้ความร้อนเชื่อมโยง หลังจากการถอดแมนเดรลออกแล้วสามารถนำแมนเดรลไปใช้ใหม่ได้ การขึ้นรูปแบบม้วนพันแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เทคนิคการขึ้นรูปแบบม้วนพัน [18]

2.5.5 การขึ้นรูปคอมโพสิตแบบถ่ายเทเรซินขึ้นรูปหรืออาร์ทีเอ็ม

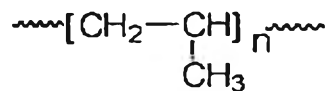
เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบถ่ายเทเรซินขึ้นรูป หรือ RTM (Resin Transfer Molding, RTM) ใช้ในการขึ้นรูปคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นแผ่น ผืน หรือถักทอเป็นรูปร่างตามแม่แบบแล้วที่เรียกว่า "พรีฟอร์ม" (Preform) ทำการขึ้นรูปได้โดยการเตรียมพรีฟอร์มหรือแผ่นเสริมแรง (Mat) แล้วจัดวางภายในแม่แบบดังรูปที่ 2.11 จากนั้นจึงทำการปั๊มหรือถ่ายเท (Transfer) เรซินผสมสารเชื่อมโยงเข้าไปในแม่แบบจนเต็ม แล้วจึงให้ความร้อนทำการเชื่อมโยงจนสมบูรณ์ ก่อนนำออกจากแม่แบบและตัดขอบตบแต่งชิ้นงานคอมโพสิต การถ่ายเทเรซินเข้าแม่แบบเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตซึ่งจะสัมพันธ์กับความดันหรืออัตราการไหล (Flow rate) อุณหภูมิของแม่แบบ ปริมาณของสารเชื่อมโยงและอื่นๆ ปัญหาที่พบในเทคนิคนี้ได้แก่ ความสามารถในการเปียก (Wettability) ของเส้นใยเสริมแรง หรือพรีฟอร์ม และการป้องกันหรือกำจัดอากาศภายในแม่แบบ (Entrapped air) ปัจจุบันได้มีระบบสุญญากาศช่วยฉีด (Vacuum assisted resin injection, VARI หรือ Vacuum resin transfer molding, VRTM) ช่วยในการแก้ปัญหาและทำให้ใช้เวลาน้อยลงในการผลิต



รูปที่ 2.11 เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิตแบบถ่ายเทเรซินขึ้นรูปหรืออาร์ทีเอ็ม [19]

2.6 พอลิพรอพิลีน [20]

โครงสร้างของพอลิพรอพิลีนแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน [20]

2.6.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน

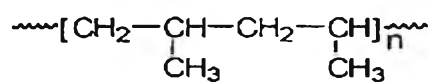
พอลิพรอพิลีนเป็นของแข็งไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและไม่โปร่งใสแต่ไม่ทึบแสง มีผิวเป็นมันเงา ทนกรด แอลคาไลน์ สารเคมีอินทรีย์และสารเคมีอินทรีย์ได้ดี ยกเว้นสารไฮโดรคาร์บอนและสารคลอรีเนเตด สมบัติของพอลิพรอพิลีนแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของพอลิพรอพิลีน [20]

| สมบัติ | ค่า | หน่วย |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| สภาพความต้านทานของพื้นผิว | 10^{13} | โอห์ม/ตารางเซนติเมตร |
| สภาพความต้านทานของปริมาตร | 10^{16} - 10^{18} | โอห์ม/ตารางเซนติเมตร |
| มอดุลัสยืดหยุ่นของแรงดึง | 0.9-1.5 | จิกะพาสคัล |
| การทนต่อแรงดึง | 25-40 | เมกะพาสคัล |
| ความหนาแน่น | 0.9 | กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน | 100-120 | ($\times 10^{-6}$) /เคลวิน |
| การนำความร้อน | 0.1-0.2 | วัตต์/เมตร.เคลวิน |
| อุณหภูมิหลอมเหลว | 130-170 | องศาเซลเซียส |

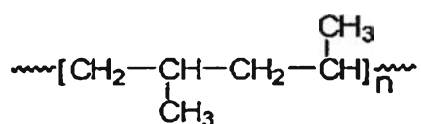
พอลิพรอพิลีนเริ่มผลิตครั้งแรกในทางการค้าเมื่อ ค.ศ. 1950 หลังจากค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-เนททา (Ziegler-Natta catalysts) พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ได้แก่

1. แบบไอโซแทกติก (Isotactic) หมู่เมทิลจะต่ออยู่กับโซ่หลักบนระนาบเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูง ส่งผลให้เกิดการตกผลึกที่ดีที่สุด จะสังเคราะห์ได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันของไทเทเนียมคลอไรด์ (Titanium(III) chloride) กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบออร์แกโนอะลูมิเนียม (Organoaluminium) เช่น ไดเอทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Diethylaluminium chloride) โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนแสดงดังรูปที่ 2.13



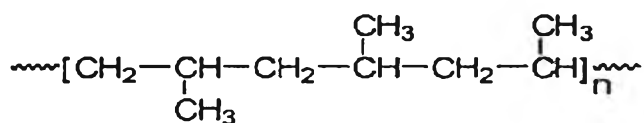
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน [20]

2. แบบซินดิโอแทกติก (Syndiotactic) หมู่เมทิลจะต่ออยู่กับโซ่หลักสลับกันอย่างเป็นระเบียบบนระนาบเดียวกัน ให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง มีผลทำให้การตกผลึกลดลง ด้วย โครงสร้างของซินดิโอแทกติกพอลิพรอพิลีนแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของซินดิโอแทกติกพอลิพรอพิลีน [20]

3. แบบอะแทกติก (Atactic) หมู่เมทิลจะต่ออยู่กับโซ่หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเคราะห์จากกรดลิวอิสและสารประกอบออร์แกนอเมทัลลิก (Organometallic) เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีนแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน [20]

ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนมีความเป็นผลึกสูง และมีโครงสร้างโมเลกุลที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกและทำเป็นเส้นใย ในขณะที่อะแทกติกพอลิพรอพิลีนไม่มีสมบัติดังกล่าวทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นในการผลิตพอลิพรอพิลีนจึงต้องควบคุมให้มีอะแทกติกพอลิพรอพิลีนเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยทั่วไปมักควบคุมให้ไม่เกินร้อยละ 5 อะแทกติกพอลิพรอพิลีนจะถูกแยกออกจากไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนได้โดยให้ละลายในสารไฮโดรคาร์บอน ในระหว่างการผลิตพอลิพรอพิลีนมักเติมมอนอเมอร์ชนิดอื่นเช่น เอทิลีน เพื่อปรับสมบัติพอลิพรอพิลีนให้ดีขึ้น

2.6.2 การใช้ประโยชน์พอลิพรอพิลีน

พอลิพรอพิลีน ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมี 4 เกรด คือ

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เป็นเกรดมาตรฐานทั่วไปมีองค์ประกอบง่าย ๆ คือ มอนอเมอร์ของพอลิพรอพิลีนมาต่อกันโดยหมู่เมทิลที่อยู่บนโครงสร้างหลักอยู่ข้างเดียวกันของ ระนาบ มีสมบัติต่างๆ โฮโมพอลิพรอพิลีน มักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้ทำฝาขวด เข็มฉีดยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ ของเล่นเด็ก บรรจุภัณฑ์ภายในบ้าน รถยนต์ขนาดเล็ก ฟิล์ม เส้นใย และตาข่าย ผลติภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีนเสื่อมสภาพได้เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์เป็นเวลานานจึงต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ พอลิพรอพิลีนมีลักษณะขุ่น แต่สามารถปรับปรุงให้มีลักษณะใส และมีสมบัติดีขึ้นโดยเติมตัวเหนียวน้ำให้เกิดผลึกทำให้ ปริมาณการตกผลึกดีขึ้นแต่ขนาดของสเฟียรูไลต์ลดลง

2. พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random copolymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีเอทิลีนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเติมลงในสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มสามารถ ทำได้ง่ายคล้ายแบบโฮโมพอลิเมอร์ โดยนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร และห่ออาหารได้ตาม มาตรฐาน เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวเชื่อมความร้อน และสามารถรับและดูดซับแรงได้ดี จึงใช้ เป็นผลิตภัณฑ์กันชนรถยนต์

3. พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High impact copolymer) จะเติมมอนอเมอร์อื่น ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งมักจะเป็นเอทิลีนหรือยาง ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบในการสังเคราะห์ ต้องดูแลควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมาะสม และคงที่เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนัก โมเลกุล และองค์ประกอบตามต้องการ พบว่าพอลิเมอร์ร่วมที่ได้จะมีความทนทานต่อแรงกระแทก ดีแม้จะทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นกระเป๋าเดินทาง ที่นั่งในรถ อุปกรณ์หล่อเย็น และเครื่องใช้ภายในบ้าน

4. อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความ สามารถในการยืดเกาะ ไม่นำไฟฟ้า นิยมใช้นำมาเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล

2.7 เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) [12, 14, 21-22]

เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยแกรไฟต์นิยมใช้ในการเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมรรถนะของคอมโพสิต เส้นใยคาร์บอนแบ่งเป็น 3 ประเภท

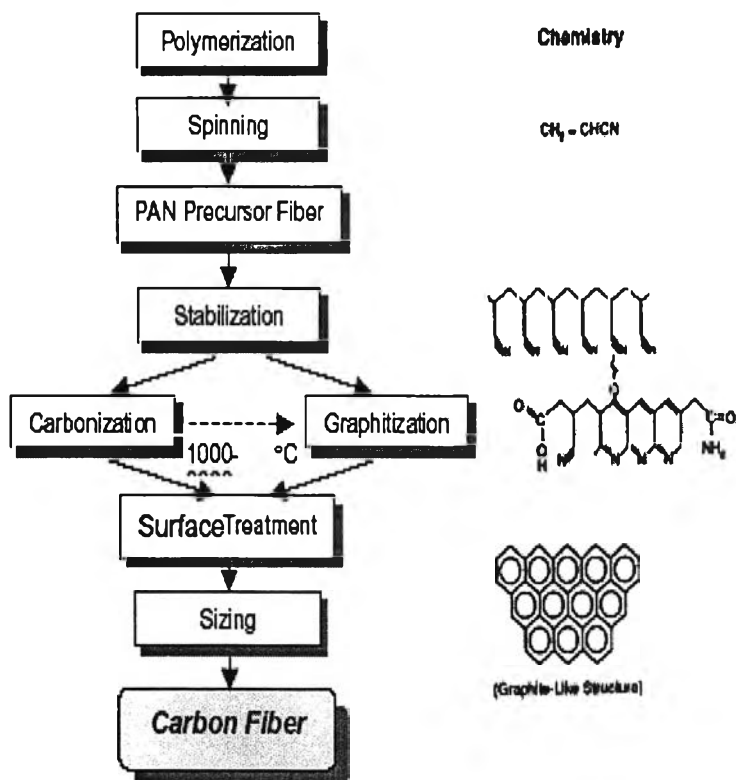
1. Polyacrylonitrile (PAN)-Base Fibers
2. Pitch-Based Fibers
3. Rayon-Based Fibers

ข้อดีของเส้นใยคาร์บอน คือมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อนแต่มีราคาแพง และมีความเปราะ

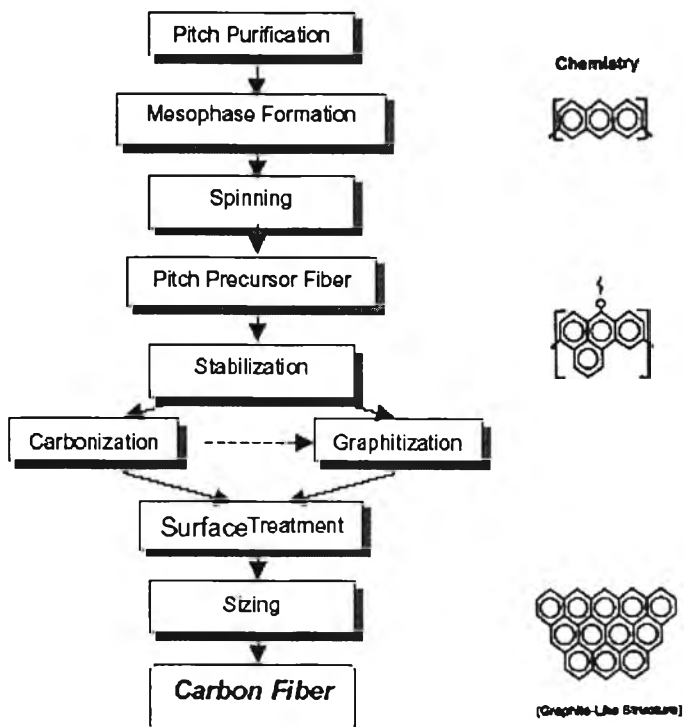
2.7.1 กระบวนการเตรียมเส้นใยคาร์บอน

1. PAN-Based Fibers ใช้พอลิอะคริโลไนไตรท์ (Polyacrylonitrile, PAN) เป็นพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ซึ่งจะถูกดึงเป็นเส้นเล็กๆ (Thin filament) จากนั้นค่อยๆ ให้ความร้อนอย่างช้าๆ จนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 250 องศาเซลเซียส ในภาวะบรรยากาศ เพื่อให้เส้นใยเสถียร แล้วให้ความร้อนเส้นใยช้าๆ ในภาวะของแก๊สไนโตรเจนจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 1000-1500 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่คาร์บอนของพรีเคอร์เซอร์ ขั้นตอนนี้เรียกว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการที่ทำให้เส้นใยของสายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนเป็นมัดเส้นใยแกรไฟต์ซึ่งการจัดเรียงตัวตลอดเส้นใยเป็นแบบสุ่ม ความยาวของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นและการจัดเรียงตัวตามแนวแกนจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 3000 องศาเซลเซียส เรียกขั้นตอนนี้ว่ากราฟิไทเซชัน (Graphitization) เป็นกระบวนการที่สายของแกรไฟต์เชื่อมติดกันในแนวตั้งจากด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals forces) ทำให้สายแกรไฟต์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น กระบวนการผลิต PAN-based fiber แสดงดังรูปที่ 2.16

2. Pitch-Based Fibers นิยมใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) น้ำมันดำจากถ่านหิน (Coal tar) หรือแอสฟัลท์ (Petroleum asphalt) เป็นพรีเคอร์เซอร์ การผลิตเส้นใยคาร์บอนด้วยกระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการผลิต PAN-Based Fibers แต่แตกต่างกันตรงที่กระบวนการนี้จะค่อยๆ ให้ความร้อนแก่พรีเคอร์เซอร์ ก่อนจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 400-450 องศาเซลเซียส เพื่อให้พรีเคอร์เซอร์อยู่ในสถานะ liquid-crystalline (Mesophase) แล้วนำไปปั่นให้เป็นเส้นเล็กๆ ขั้นตอนหลังจากนี้ทำเช่นเดียวกับการเตรียมเส้นใยจาก PAN-Based Fibers กระบวนการผลิต Pitch-based fiber แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 กระบวนการผลิต PAN-based fiber [22]



รูปที่ 2.17 กระบวนการผลิต Pitch-based fiber [22]

2.8 คาร์บอนแบล็ค [23-25]

คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) หรือเขม่าดำได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง แก๊สธรรมชาติและอื่นๆ เป็นต้น

การผลิตคาร์บอนแบล็คมี 2 วิธีคือ

1. การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของแก๊สธรรมชาติ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้ คาร์บอนแบล็ค ที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงทำให้มีราคาแพง เพราะขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะให้เขม่าที่เข้ม ทำให้สามารถลดการใช้คาร์บอนแบล็คลงได้

2. การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนเหลว วิธีนี้จะได้คาร์บอนแบล็คที่มีอนุภาคใหญ่กว่าชนิดแรก จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในวงการพลาสติกเพราะมีราคาที่ไม่แพง การนำคาร์บอนแบล็คไปใช้งานโดยผสมกับเม็ดพลาสติกนั้นจะไม่สะดวก เนื่องจากฟุ้งกระจายและอาจเป็นส่วนทำให้เกิดสิ่งเจือปนในชิ้นงานอื่น ๆ ได้จึงมีการแปลงรูปของคาร์บอนแบล็คให้สะดวกต่อการใช้งานคืออยู่ในรูปเม็ดสีเข้มหรือเม็ดสีสำเร็จรูปซึ่งจะทำให้ผู้ใช้เม็ดพลาสติกสามารถปฏิบัติงานได้สะดวกขึ้นและสามารถควบคุมคุณภาพของสี สมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีได้ดีกว่าการใช้งานในรูปแบบผง

สมบัติของคาร์บอนแบล็ค

1. สามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Protection) ซึ่งข้อดีข้อนี้มักจะนำไปใช้กับชิ้นงานที่ต้องถูกแสงแดด รวมทั้งสภาพอากาศภายนอก อย่างเช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ประเภทกันชน (Bumper) บังโคลน กระจกสองข้าง เป็นต้น โดยที่คาร์บอนแบล็คจะทำหน้าที่สะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมทั้งแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (Visible) และ อินฟราเรด (Infrared) แล้วเปลี่ยนพลังงานแสง (Light Energy) ไปเป็นความร้อน (Heat)

2. ป้องกันการสลายตัว (Decomposition Protection) ของพลาสติกหรือพอลิเมอร์บางชนิด การที่พลาสติกหรือพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวเนื่องมาจากถูกกระตุ้นโดยแสงแดดและความร้อนจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free Radical) ซึ่งตามปกติพวกอนุมูลอิสระจะว่องไวต่อ

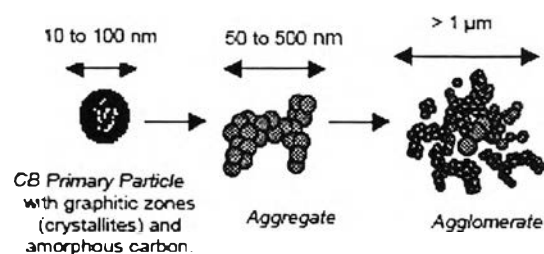
ปฏิกิริยา ทำให้สมบัติของพลาสติกหรือพอลิเมอร์เปลี่ยนไปด้วย เมื่อใส่คาร์บอนแบล็คลงไป คาร์บอนแบล็คจะทำหน้าที่ไปจับอนุมูลอิสระ (Free Radical Trap) เพื่อลดความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

3. เป็นสารให้สี (Pigmentation) เนื่องจากในการเทียบสีทั่ว ๆ ไปจะต้องมีการใส่คาร์บอนแบล็คลงไปเพื่อปรับเฉดสี (Shade) ให้ได้ตามต้องการ ซึ่งคาร์บอนแบล็คแต่ละชนิดจะให้เฉดสีแตกต่างกันไป ต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

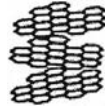
4. ใช้เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กับพอลิเอทิลีนชนิดร่างแห (Crosslinked Polyethylene) เพื่อใช้ในการผลิตสายไฟชนิด พอลิเอทิลีน (PE Cable) พอลิเมอร์ร่วมเอทิลวินิลอะซิเตท (EVA – Copolymers) พอลิยูรีเทน (Polyurethanes) และพอลิซัลไฟด์ (Ploysulfides) เป็นต้น

นอกจากนั้นการเติมคาร์บอนแบล็คในพลาสติกจะทำให้พลาสติคนำไฟฟ้าได้ ขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนแบล็คและอันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนแบล็คและพลาสติก

รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คแสดงดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ จะเห็นว่าคาร์บอนแบล็คมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายพวงองุ่น (Grape-like structure) กลุ่มก้อนของอนุภาคที่อยู่ติดกันนี้เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregates) เกิดจากการหลอมติด (Fuse) ของอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่า “โนดูล” (Nudules) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์บอนแบล็ค แต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวหลายๆ ชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic layer planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็คจะไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ (Graphite) เช่นมีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5 \AA)



รูปที่ 2.18 รูปร่างของคาร์บอนแบล็ค [25]

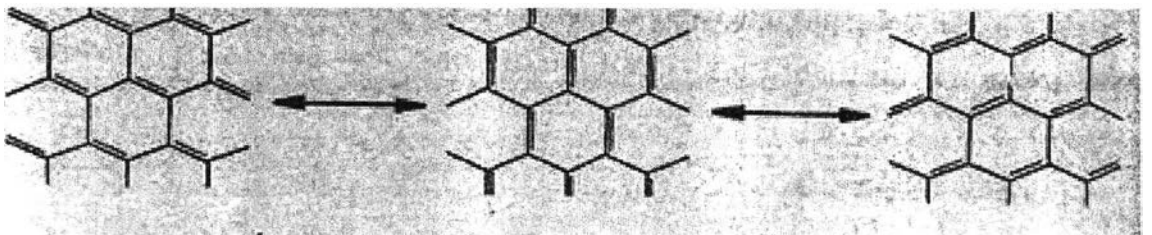


Carbon Black:
non-parallel layer planes

รูปที่ 2.19 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค [25]

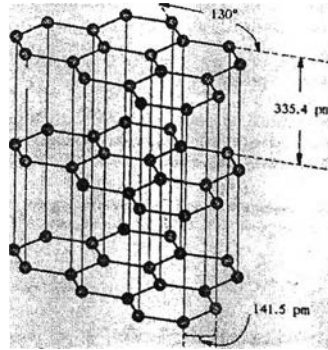
2.9 แกรไฟต์ [26]

แกรไฟต์ (Graphite) เป็นรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ภายในชั้นเดียวกัน คาร์บอนแต่ละอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมคาร์บอนข้างเคียงอีก 3 อะตอม ความยาวพันธะแต่ละพันธะภายในชั้นเดียวกันของแกรไฟต์ยาวมีค่าประมาณ 141.5 pm และจากข้อมูลทราบว่าพันธะเดี่ยวระหว่างอะตอมคาร์บอนมีความยาว 154 pm ส่วนพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนมีความยาว 134 pm ด้วยเหตุนี้พันธะโคเวเลนต์ของอะตอมคาร์บอนในชั้นเดียวกันของแกรไฟต์สามารถเกิดเรโซแนนซ์ได้เช่นเดียวกับ SO_2 การเกิดเรโซแนนซ์ของแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การเกิดเรโซแนนซ์ของแกรไฟต์ในชั้นเดียวกัน [26]

การที่คาร์บอนแต่ละอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่นอีก 3 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันภายในชั้นเดียวกัน ส่งผลให้คาร์บอนแต่ละอะตอมมีเวเลนต้อิเล็กตรอนเหลืออยู่โดยอิเล็กตรอนไม่อยู่กับที่ เคลื่อนที่ได้อิสระทั่วไปภายในชั้นเดียวกัน แกรไฟต์จึงนำไฟฟ้าได้ดีเฉพาะในทิศทางที่ขนานกับชั้นเท่านั้น แบบจำลองแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แบบจำลองแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์ [26]

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kuan และคณะ [3] เตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วคอมโพสิตจากไวนิลเอสเทอร์เรซิน (Vinyl ester resin) ใน kneader เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดด้วยความร้อน (Hot-pressing) ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที พบว่าเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 80 สภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วคอมโพสิต ลดลงจาก 2000 มิลลิโอม เป็น 5.8 มิลลิโอม ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ลดลงจาก 38.47 เมกะพาสคัล เป็น 27.3 เมกะพาสคัล และความยืดหยุ่นโค้งงอ (Flexural modulus) ลดลงจาก 9016 เมกะพาสคัล เป็น 6621 เมกะพาสคัล สาเหตุที่ความแข็งแรงโค้งงอและความยืดหยุ่นโค้งงอ ลดลงเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเรซินและแกรไฟต์ลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion current) ของร้อยละที่แตกต่างกันของแกรไฟต์มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทดสอบการใช้งานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วคอมโพสิต ในเซลล์เชื้อเพลิงพบว่า สมรรถนะของกระแสไฟฟ้า-ต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า-กำลังไฟฟ้า (I-V performance, I-P performance) ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวและเซลล์เชื้อเพลิงแถวที่ประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว 6 เซลล์ (6-cell stack) มีค่าใกล้เคียงกับแผ่นนำไฟฟ้าที่ทำมาจากแกรไฟต์

Heinzel และคณะ [27] เตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากเทอร์โมพลาสติกและของผสมคาร์บอน (Carbon compound) ที่เติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า โดยผสมกันด้วยเครื่องหลอมอัดรีดชนิด สกรูคู่ (Twin screw extruder) อุณหภูมิ 200 –250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที จากนั้นขึ้นรูปแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) พบว่ามีความหนาแน่น 1.6 กรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific bulk conductivities) 5-150 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อนำไปทดสอบในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าให้กำลังไฟฟ้าสูงถึง 200 วัตต์

Cho และคณะ [28] ศึกษาลักษณะแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polymer) กับผงแกรไฟต์ โดยเติมสารละลายและสารเติมแต่งเข้าไปในของผสมเพียงเล็กน้อย แผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นในงานวิจัยนี้มีกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน โดยคอมโพสิตเอ (Composite A) ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดด้วยความร้อน (Hot-pressing) แล้วนำไปทำช่องทางการไหลของแก๊ส คอมโพสิตบี (Composite B) ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding) ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้มีช่องทางการไหลของแก๊ส พบว่าคอมโพสิตเอและคอมโพสิตบี ให้ค่าความหนาแน่นความต้านทานไฟฟ้า (Bulk resistivity) การไม่รั่วของแก๊ส และการดูดซับน้ำใกล้เคียงกับแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นที่ทำจากแกรไฟต์แต่ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อนำคอมโพสิตทั้งสองไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าสามารถใช้งานได้จนถึง 500 ชั่วโมง โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพและไม่เกิดการแตกหัก

Koncar [29] เตรียมแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Collector plate) จากฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) แกรไฟต์ และซิลิกา ภาวที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding) คืออุณหภูมิ 400 องศาฟาเรนไฮต์ ความดัน 1000 ปิเอสไอ (psi) ใช้ปริมาณของฟีนอลิกเรซินร้อยละ 12.5 ปริมาณของซิลิการ้อยละ 0-10 และปริมาณของแกรไฟต์ร้อยละ 77.5-87.5 พบว่าเมื่อปริมาณของแกรไฟต์ลดลงในขณะที่ปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการนำไฟฟ้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากปริมาณของแกรไฟต์ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าลดลง อีกทั้ง ซิลิกาซึ่งมีสมบัติไม่นำไฟฟ้าและเป็นสารทำให้เปียก (Wetting agent) เป็นผลให้ความต้านทานหน้าสัมผัสและความต้านทานภายใน (Internal resistance) ของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง นอกจากนั้นการดูดซับน้ำยังมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อแทนแกรไฟต์ด้วยเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 ที่ปริมาณฟีนอลิกเรซินร้อยละ 12.5 และปริมาณซิลิการ้อยละ 2.5 พบว่าค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าการเติมแกรไฟต์อย่างเดียว

Wu และคณะ [30-31] เตรียมคาร์บอนนาโนทิว (Carbon nanotube, CNT) ร้อยละ 12 โดยปริมาตรในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethyleneterephthalate, PET) ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดชนิดสกรูคู่ จากนั้นนำมาผสมกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) อัตราส่วน 1/1 โดยปริมาตร ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากการศึกษาการนำไฟฟ้าตามทิศทางที่ขนานกับการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานพบว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 12 โดยปริมาตร) มีค่าการนำไฟฟ้า 0.25 ซีเมนส์/เซนติเมตร และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) มีค่าการนำไฟฟ้า 0.059 ซีเมนส์/เซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่ได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์มีสมบัติเป็นฉนวน อีกทั้งปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวแตกต่างกัน

ทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่า เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักของคาร์บอนนาโนทิวเท่ากันคือร้อยละ 6 โดยปริมาตร พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) มีค่าการนำไฟฟ้า 0.059 ซีเมนส์/เซนติเมตร สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า 0.0023 ซีเมนส์/เซนติเมตร เนื่องจากพอลิเมอร์ในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์เกิดไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit) เนื่องจากปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นผลให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นผลให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร) สามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และมีความสามารถในการยืดสูงสุด (Elongation) สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นผลให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-คาร์บอนนาโนทิว (คาร์บอนนาโนทิวร้อยละ 6 โดยปริมาตร, CNT-filled PET (6 vol %CNT)) ร้อยละ 36 และ ร้อยละ 320 ตามลำดับ

Thongruang และคณะ [32] ศึกษาความสัมพันธ์ของการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผสมแกรไฟต์ (G) และเส้นใยคาร์บอน (CF) พบว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนในคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง/แกรไฟต์ เป็นการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลจะไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ (High-temperature mechanical integrity) โดยการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแกรไฟต์ และประมาณ 5 ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของเส้นใยคาร์บอน เป็น 18 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อนำแกรไฟต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักผสมกับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[HDPE/(G+CF) : 40/(50+10)]

Taipalus และคณะ [33] เตรียมพอลิเมอร์ผสมของเส้นใยคาร์บอน/พอลิพรอพิลีน/พอลิอะนิลีนเชิงซ้อน ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูคู่และขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกและเครื่องอัดหล่อดังนี้ ระบบที่ 1 พอลิอะนิลีนเชิงซ้อน/พอลิพรอพิลีน ระบบที่ 2 เส้นใยคาร์บอนชนิดสั้น/พอลิพรอพิลีน ระบบที่ 3 เส้นใยคาร์บอนชนิดยาว/พอลิพรอพิลีน ระบบที่ 4 เส้นใยคาร์บอนชนิดยาว/พอลิพรอพิลีน (ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดหล่อ) จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิพรอพิลีนคือ 10^{-14} ซีเมนส์/เซนติเมตร และปริมาณของพอลิอะนิลีนเชิงซ้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมระบบที่ 1

เพิ่มขึ้นคือร้อยละ 6.3 โดยปริมาตร ค่าการนำไฟฟ้าของระบบที่ 1 เพิ่มขึ้นเป็น 10^{-7} ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อร้อยละของพอลิอะนิลีนเชิงซ้อนในพอลิพโรพิลีนเพิ่มเป็น 8.4 โดยปริมาตร ระบบที่ 2 ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนชนิดสั้นที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 4.3 โดยปริมาตรและค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มเป็น 10^{-4} ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนชนิดสั้นร้อยละ 6.6 โดยปริมาตร ระบบที่ 3 ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนชนิดที่ยาวน้อยที่สุดที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 2.7 โดยปริมาตรและค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มเป็น 5×10^{-5} ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนชนิดยาวร้อยละ 3.2 โดยปริมาตร และระบบที่ 4 ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนชนิดที่ยาวน้อยที่สุดที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 1.8 โดยปริมาตร เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมระบบที่ 3 มาผสมกับพอลิอะนิลีนเชิงซ้อนในอัตราส่วนร้อยละ 4.2, 6.3 และ 8.4 โดยปริมาตร พบว่าปริมาณสารเติมแต่งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคือประมาณร้อยละ 1.8 โดยปริมาตร และเมื่อนำระบบที่ 4 มาผสมกับพอลิอะนิลีนเชิงซ้อนร้อยละ 8.4 โดยปริมาตร พบว่าปริมาณสารเติมแต่งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 0.7 โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังนำโมเดลซึ่งใช้อธิบายการสัมผัสกันของเส้นใย (Fiber-contact model) ของ Weber และ Kamal มาหาค่าการนำไฟฟ้าพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง