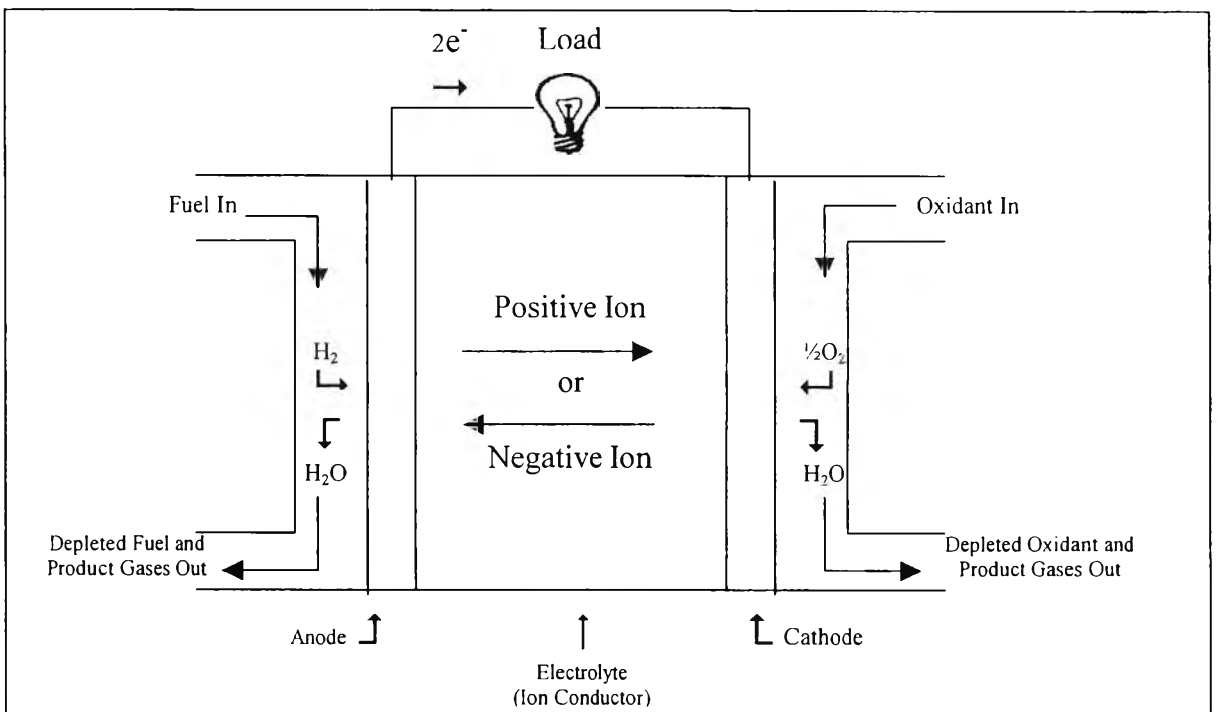


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง [2, 3]

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง มีการค้นพบครั้งแรกโดย วิลเลียม โกรฟ นักวิทยาศาสตร์และนักกฎหมาย เมื่อปี ค.ศ. 1839 โครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยชั้นของอิเล็กโทรไลต์ซึ่งในแต่ละด้านสัมผัสกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่มีรูพรุน การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [3]

ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปนั้น แก๊สเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และสารออกซิไดส์จะถูกป้อนเข้าสู่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) อย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ในทางทฤษฎีนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ราบเท่าที่ยังมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิไดส์เข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแต่ในความเป็นจริงแล้ว

การเสื่อมสภาพ การเกิดการกัดกร่อน หรือความผิดปกติในการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ จะจำกัดการทำงานและอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือ มีประสิทธิภาพสูง (High – energy conversion efficiency) กว่าพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเครื่องยนต์ มีไอเสียต่ำซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อนำไปใช้ในยานพาหนะ ปราศจากเสียงรบกวนในการทำงาน ซึ่งเป็นข้อสำคัญเมื่อนำไปใช้งานในลักษณะเป็นแหล่งพลังงานแบบพกพา

โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงได้จากชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ได้แก่

- 1) เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell)
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตรอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell)
- 3) เซลล์เชื้อเพลิงเมทานอลแบบป้อนโดยตรง (Direct methanol fuel cell)
- 4) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell)
- 5) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell) และ
- 6) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell)

รายละเอียดพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

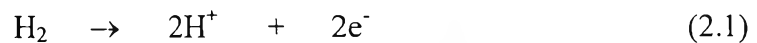
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [2]

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนเคลื่อนที่	ช่วงอุณหภูมิการทำงาน (°C)	การนำไปใช้งาน
แบบแอลคาไลน์	$\text{OH}^-$	50 – 200	ใช้ในยานอวกาศ เช่น ยานอพอลโล กระสวยอวกาศ
แบบพื้อเอ็ม	$\text{H}^+$	30 – 100	ใช้ในยานพาหนะ และอุปกรณ์ให้พลังงานแบบพกพา
เมทานอลแบบป้อนโดยตรง	$\text{H}^+$	20 – 90	สำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ที่ใช้พลังงานต่ำ และใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน
แบบกรดฟอสฟอริก	$\text{H}^+$	~ 220	ใช้งานสำหรับระบบพลังงานและความร้อนร่วม 200 กิโลวัตต์ หลายระบบ
แบบคาร์บอเนตหลอม	$\text{CO}_3^{2-}$	~650	เหมาะสำหรับระบบพลังงานและความร้อนร่วม ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ จนถึงระดับเมกะวัตต์
แบบออกไซด์แข็ง	$\text{O}^{2-}$	500 – 1000	เหมาะสำหรับระบบพลังงานและความร้อนร่วม ทุกขนาด

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [2]

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยบริษัท เจนเนอรัล อิเล็กทริก สหรัฐอเมริกา ในช่วงปีค.ศ. 1960 สำหรับใช้ในยานอวกาศที่ส่งมนุษย์ขึ้นไปควบคุมเป็นครั้งแรก ขององค์การนาซา สารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน (เป็นพอลิเมอร์แบบฟลูออรีเนตซัลโฟนิคแอซิด หรือพอลิเมอร์อื่นที่ใกล้เคียง) สามารถนำ โปรตอนได้อย่างดี ซึ่งการพัฒนาของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้โดยบริษัทดูปองต์ทำให้ได้เยื่อแผ่น แลกเปลี่ยนไอออนใหม่ที่มีประสิทธิภาพ คือ นีฟออน (ชื่อทางการค้า) เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนซึ่ง ต่อมาถูกจัดให้เป็นมาตรฐานในการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ และยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน

บนเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนแต่ละด้านจะเชื่อมติดกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมีรูพรุนที่ ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (แพลทินัม) เชื้อเพลิงและสารออกซิไดส์ที่ใช้ซึ่งจะเป็นแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจนที่ถูกทำให้ชื้น (เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน) จะเคลื่อนที่ผ่านขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับ ที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊ส ไฮโดรเจน ได้โปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.1

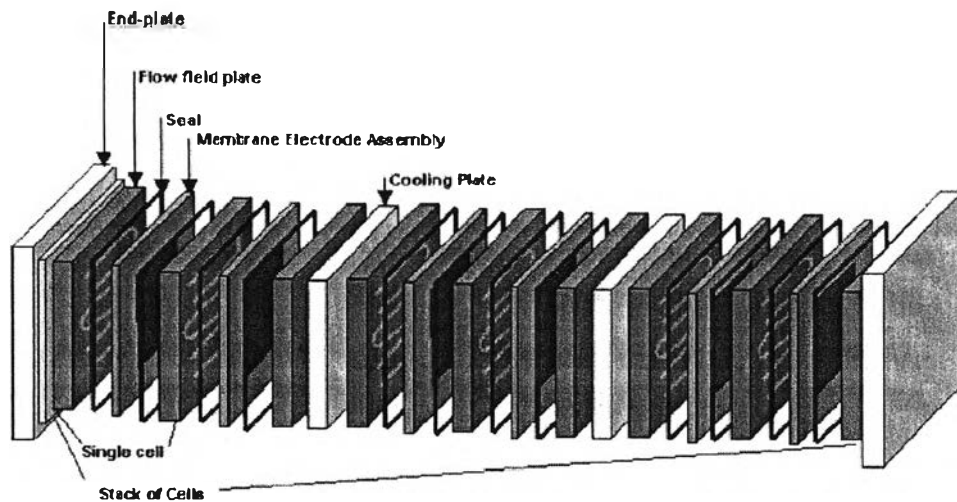


จากนั้น โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนเข้าสู่ขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อน ที่ผ่านแผ่นนำกระแสให้กระแสไฟฟ้าแก่โหลดภายนอก และจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโปรตรอนและแก๊สออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน ดังสมการที่ 2.2



น้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจะถูกดึงออกจากเซลล์พร้อมกับแก๊สที่เหลือจากการทำ ปฏิกิริยาทางขั้วแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกจากระบบโดยระบบหล่อเย็น (Cooling system)

การประกอบกันของขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์ และขั้วแคโทดจะคิดเป็น 1 ชิ้นส่วน มีลักษณะบางที่เรียกว่า หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs) ซึ่งจะต่อกันในลักษณะอนุกรม โดยใช้แผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว (Bipolar plate) กั้นระหว่างแต่ละเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PEM fuel cell stack) [4]

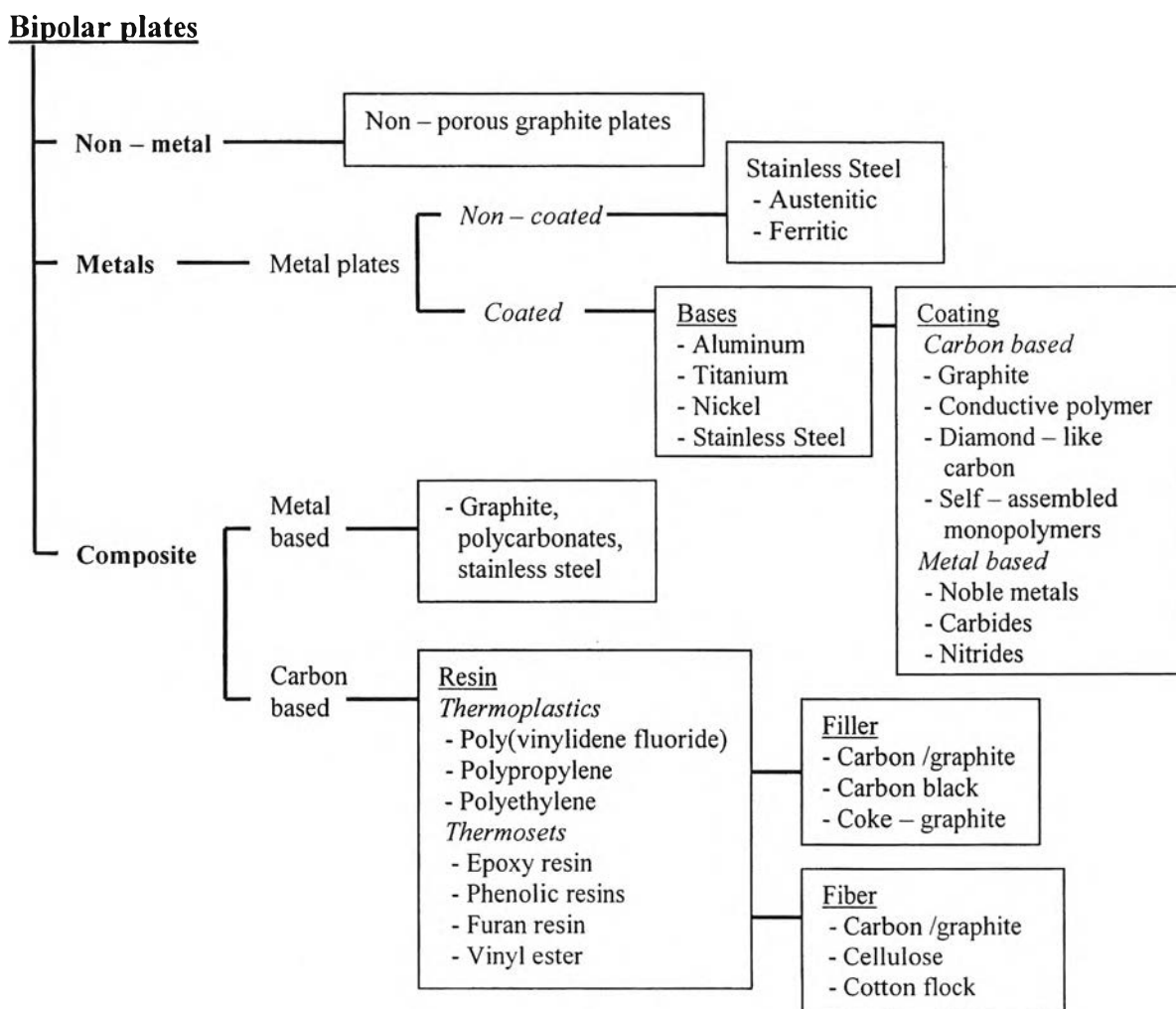
การที่หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดมีลักษณะบางมาก ทำให้สามารถสร้างเซลล์เชื้อเพลิงประกอบกันหลายๆ เซลล์เพื่อเพิ่มกำลังสำหรับการใช้งานได้ เหมาะสมกับการนำไปใช้ในยานพาหนะ หรือในลักษณะเซลล์เชื้อเพลิงแบบพกพา ของเหลวที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีเพียงน้ำบริสุทธิ์เท่านั้น ซึ่งทำให้ปัญหาด้านการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อย แต่การจัดการระบบน้ำเข้าออกภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องอยู่ภายใต้ภาวะที่ไม่ให้น้ำในส่วนของการผลิตเกิดขึ้นเร็วเกินไปกว่าน้ำที่จะถูกผลิตขึ้น เนื่องจากเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต้องมีน้ำซึมผ่านอยู่ตลอด จึงทำให้ภาวะการทำงานของเซลล์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์ และช่วยลดช่วงเวลาเริ่มต้นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.3 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว (Bipolar plate) [4 – 8]

แผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว มีบทบาทมากมายในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยจะเป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบภายในแผ่นเดียว หน้าที่หลักของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วได้แก่

- กระจายแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิไดส์ภายในเซลล์
- จัดการระบบน้ำเข้า – ออก ภายในเซลล์
- แยกเซลล์แต่ละเซลล์ภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
- นำกระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์
- จัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

ทอพอโลยีส์ของแผ่น (Plate topologies) และวัสดุที่ใช้ทำแผ่นนำกระแสจะช่วยให้หน้าทีการทำงานต่างๆ เหล่านี้ดำเนินไปได้ดีและง่ายขึ้น ทอพอโลยีส์ต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรง ความคดเคี้ยว (Serpentine) หรือช่องทางการเดินของแก๊สภายในแผ่นนำกระแส ท่อรวมภายใน (Internal manifold) การควบคุมความชื้นภายในเซลล์ และการระบายความร้อนภายในแผ่นนำกระแส วัสดุที่ได้รับการเสนอให้ใช้เป็นวัสดุในการผลิตแผ่นนำกระแสนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของความทนทานต่อสารเคมี ความทนทานต่อการกัดกร่อน ค่าการนำไฟฟ้าสูง การแพร่ผ่านของแก๊สหรือความสามารถในการให้แก๊สซึมผ่านมีค่าต่ำ ขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน และค่าการนำความร้อนดี จากข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้ ทำให้มีการวิจัยหาวัสดุหลายชนิดเพื่อผลิตเป็นแผ่นนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ [5]

**2.3.1 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non – porous graphite plates)** จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแผ่นแกรไฟต์ชนิดที่ไม่มีรูพรุนมีความสามารถทนทานต่อสารเคมีเมื่อใช้ในบรรยากาศของเซลล์เชื้อเพลิง ในการผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนนั้นมีการใช้ทั้งแกรไฟต์ธรรมชาติและแกรไฟต์สังเคราะห์ในการผลิต สำหรับรูปแบบของการสร้างแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนนั้น Meissner [6] ได้เสนอการขึ้นรูปและเซาะร่องโดยใช้เครื่องกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ในวิธีนี้ส่วนผสมแกรไฟต์ซึ่งประกอบด้วยผลึกแกรไฟต์ร่วมกับสารช่วยยึดเกาะ (Binder) จะถูกอัดขึ้นรูปและจะเข้ากระบวนการบำบัดด้วยความร้อน (Heat treatment) ในบรรยากาศที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน

**2.3.2 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นโลหะ** ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- แผ่นโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ (Metallic plates) ในปัจจุบัน สแตนเลสสตีล ยังเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่มีความเหมาะสมในการผลิตแผ่นนำกระแส เนื่องจากตัววัสดุค่อนข้างมีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อสารเคมี การซึมผ่านได้ของแก๊สต่ำ มีช่วงของการทำเป็นอัลลอยด์ที่กว้าง สามารถผลิตในปริมาณมากได้และมีราคาถูก อย่างไรก็ตามได้มีผู้ศึกษาการใช้ ออสเทนนิติก (349<sup>TM</sup>) และเฟอร์ริติก (AISI446) สแตนเลสสตีลที่มีปริมาณโครเมียมสูงในการผลิตแผ่นนำกระแสพบว่ามีความเหมาะสม แต่สำหรับ AISI446 ยังต้องปรับปรุงค่าความต้านทานสัมผัส (Contact resistance)
- แผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบ (Coated metallic plates) อะลูมิเนียม สแตนเลสสตีล ไททาเนียมและนิกเกิล คือวัสดุที่ถูกเสนอและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน การออกแบบของแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบจะออกแบบให้มีชั้นเคลือบป้องกัน ซึ่งวัสดุที่จะมาเคลือบลงบนแผ่นโลหะจะต้องนำไฟฟ้าและติดแน่นอยู่กับชั้นโลหะที่เป็นฐานอย่างดี เพื่อปกป้องชั้นโลหะนั้นจากการกัดกร่อนของภาวะภายในเซลล์เชื้อเพลิง วัสดุสำหรับการนำมาประยุกต์เป็นชั้นเคลือบสำหรับแผ่นโลหะ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วัสดุเคลือบสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองชั้นชนิดแผ่นโลหะ [5]

การเคลือบ	โลหะที่เป็นฐานเคลือบ			
	อะลูมิเนียม	สแตนเลส สตีล	ไททาเนียม	นิกเกิล
พอลิเมอร์นำไฟฟ้า	ไม่ระบุ			
คาร์บอน โครงสร้างคล้ายเพชร	ไม่ระบุ			
ทอง	×			
แกรไฟต์พอยล์	×		×	×
แกรไฟต์ทอปโคท	×	×	×	×
อินเดียมทินออกไซด์ (ITO)		×		
ลีดออกไซด์ (PbO <sub>2</sub> )		×		
พอลิเมอร์อินทรีย์เชิงเดี่ยว	ไม่ระบุ			
ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)		×		
ไททาเนียม – อะลูมิเนียม (Ti – Al)	×			
ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN)				
ออกไซด์		×		×
โครเมียมไนไตรด์ (CrN)				นิกเกิล / โครเมียม

### 2.3.3 แผ่นนำกระแสแบบสองชั้นชนิดแผ่นคอมโพสิต (Composite plate)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- แผ่นคอมโพสิตฐานโลหะ พัฒนาขึ้นโดยศูนย์ปฏิบัติการแห่งชาติ Los Alamos โดยในแผ่นคอมโพสิตนี้จะประกอบด้วยแกรไฟต์ชนิดรูพรุน ซึ่งมีสมบัติทางด้านการทนทานต่อการกัดกร่อน สแตนเลสสตีล จะเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่กับ โครงสร้างของแผ่นคอมโพสิต และพลาสติกพอลีคาร์บอนเนตซึ่งจะช่วยในส่วนของการต้านทานต่อสารเคมีและ สะดวกต่อการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ช่องทางการไหลของแก๊สตามต้องการ
- แผ่นคอมโพสิตฐานคาร์บอน ซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนเมทริกซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก จัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) รวมทั้งเป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรง เข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปจะประกอบด้วย พอลิเมอร์และสารนำไฟฟ้า ประเภทคาร์บอน และส่วนเสริมแรงซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้คอมโพสิตมีความ

แข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆก็ได้ [7]

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่านักวิจัยจะใช้แผ่นคอมโพสิตฐานคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมากกว่า โดยแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ จัดอยู่ในประเภทแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นคอมโพสิตฐานคาร์บอนเช่นกัน ในการผลิตแผ่นคอมโพสิตชนิดนี้ใช้เทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติงเรซิน (เช่น ฟีนอลิก อีพอกซี และไวนิลเอสเทอร์) ร่วมกับสารนำไฟฟ้าประเภทคาร์บอน และอาจใช้สารเติมแต่งหรือไม่ใช้ก็ได้ วัสดุและสารเคมีสำหรับผลิตแผ่นคอมโพสิตฐานคาร์บอน รวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วัสดุคาร์บอนคอมโพสิตสำหรับใช้ผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว [5]

เรซิน	สารเติมแต่ง	เส้นใย
พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์	อนุภาคคาร์บอน / แกรไฟต์	-
พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์	อนุภาคคาร์บอน / แกรไฟต์	เส้นใยคาร์บอน / เส้นใยแกรไฟต์
พอลิพรอพิลีน	คาร์บอนแบล็ค, ผงแกรไฟต์	-
สารผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและสารช่วยให้แข็งตัวชนิดเอมีน	ผงแกรไฟต์	-
เฟนิล - แอลดีไฮด์รีโซลหรือโนโวแลก	ผงแกรไฟต์	เส้นใยแกรไฟต์
เฟนิล - แอลดีไฮด์รีโซลหรือโนโวแลก	โค้ก - อนุภาคแกรไฟต์	-
ริอิซโซลด์ 24 - 655 ฟีนอลิกเรซิน	ผงแกรไฟต์	เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เรยอน และเซลลูโลส อะซีเตท)
ฟีนอลิกเรซิน หรือ ฟูแรนเรซิน	ผงแกรไฟต์	เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เรยอน และเซลลูโลส อะซีเตท)
ฟีนอลิกเรซิน	-	เส้นใยคาร์บอน (กลุ่ม PAN)
ไวนิลเอสเทอร์	ผงแกรไฟต์	คอตตอนฟล็อก (แกรไฟต์ / คาร์บอน เส้นใยแก้ว คอตตอน และพอลิเมอร์)



อย่างไรก็ตาม วัสดุที่นำมาผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วนั้น ไม่มีวัสดุชนิดใดที่จะเป็นไปตามเกณฑ์ครบทั้งหมด ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการเลือกวัสดุสำหรับผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว รวบรวมแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเมื่อใช้วัสดุที่แตกต่างกัน [5]

แกรไฟต์ (เซาะร่องโดยใช้เครื่องจักร)	โลหะ	แกรไฟต์คอมโพสิต
<i>ข้อได้เปรียบ</i>		
มีความเสถียร	ค่าการนำความร้อนสูง	ค่าความต้านทานสัมผัสต่ำ
ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ	สามารถรีไซเคิลได้	ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง
ความต้านทานสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าต่ำ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ	
ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง		
<i>ข้อเสียเปรียบ</i>		
ราคาแพงเมื่อต้องเซาะร่องด้วยเครื่องจักร	ต้องการการเคลือบ	ค่าการนำไฟฟ้ารวมต่ำ
เปราะ	เป็นพิษต่อเชื้อแผ่นแลกเปลี่ยน	
มีความหนา	เกิดฉนวนออกไซด์ที่พื้นผิว	

โดยสรุปแล้วการออกแบบแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วนั้นจะขึ้นอยู่กับราคาและมวลโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และความทนทานต่อภาวะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีค่าความเป็นกรด – ค่างต่ำ และอุณหภูมิสูง แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วควรมีคุณสมบัติดังนี้ [5]

- ค่าการนำไฟฟ้า : ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นนำกระแส >100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
- ค่าการนำความร้อน : มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- ค่าการซึมผ่านของแก๊ส : น้อยกว่า  $10^{-4}$  ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที.ตารางเซนติเมตร
- ค่าการกัดกร่อน : อัตราการกัดกร่อน < 0.016 มิลลิเมตรปีต่อตาราง เซนติเมตร
- ความทนแรงอัด : มากกว่า 22 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- ความหนาแน่น : น้อยกว่า 5 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

## 2.4 แผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต (Graphite composite bipolar plate) [8]

คอมโพสิตระหว่างแกรไฟต์และพอลิเมอร์ปรากฏครั้งแรกในช่วง ค.ศ. 1960 เป็นวัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกและอิเล็กโทรไลเซอร์ ต่อมาได้นำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์แข็ง คอมโพสิตชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากใช้แกรไฟต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ขั้นตอนในการผลิตค่อนข้างง่ายและต้นทุนของวัสดุที่ใช้ผลิตมีราคาถูกกว่า เมื่อเทียบกับการผลิตคอมโพสิตชนิดอื่นๆ แกรไฟต์คอมโพสิตนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นพลาสติกที่ประกอบด้วยสารเติมแต่ง หรืออีกทางหนึ่งอาจเรียกว่าโครงข่ายการซึมผ่าน (Percolation network) ของอนุภาคแกรไฟต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โครงข่ายการซึมผ่านนี้ประกอบด้วยสายโซ่ของอนุภาคนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน เพื่อให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดได้ง่าย กลไกในการนำอิเล็กตรอนนี้เป็นแบบโอมิก (Ohmic)

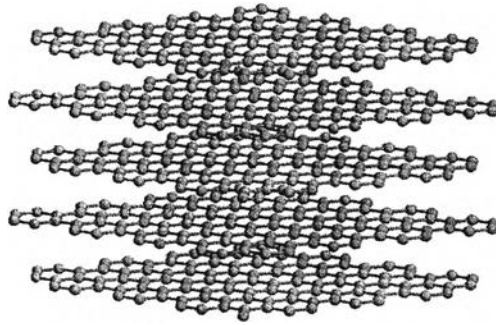
ข้อได้เปรียบของการทำวัสดุคอมโพสิตคือ สามารถนำสารนำไฟฟ้าและพอลิเมอร์มาผสมรวมกันได้หลากหลายซึ่งทำให้เกิดการออกแบบชนิดของวัสดุให้ตรงกับความต้องการนำไปใช้งาน สารนำไฟฟ้าที่ใช้สามารถเลือกได้จาก ผงแกรไฟต์สังเคราะห์ เกล็ดแกรไฟต์ เส้นใยแกรไฟต์ระดับนาโน แกรไฟต์ธรรมชาติ แกรไฟต์ที่มีการขยายตัว (Expanded graphite) หรือส่วนผสมของแกรไฟต์แบบต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

### 2.4.1 แกรไฟต์ [9 – 10]

แกรไฟต์ เป็นโครงสร้างธรรมชาติอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน แกรไฟต์ธรรมชาติเป็นธาตุคาร์บอนที่มีสีดำเป็นมัน โครงสร้างผลึกเป็นระบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งมีสมมาตรแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral symmetry) เกล็ดของแกรไฟต์จะทึบแสง ยืดหยุ่น และสามารถตัดได้ (Sectile) แกรไฟต์ธรรมชาติจะมีความมัน และค่อนข้างอ่อนตัว มีค่าความแข็ง (Hardness) ประมาณ 1 – 2 ในหน่วยโมห์ (Moh scale) มีค่าความถ่วงจำเพาะโดยเฉลี่ยประมาณ 2.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แกรไฟต์เป็นตัวนำไฟฟ้าและตัวนำความร้อนที่ดีมาก มีจุดหลอมเหลวสูงที่ 3,500 องศาเซลเซียส มีความต้านทานต่อความเป็นกรดสูง ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ในเชิงพาณิชย์สามารถแบ่งรูปแบบแกรไฟต์ได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แกรไฟต์อสัณฐาน (Amorphous graphite) ก้อนผลึกแกรไฟต์ (Crystalline lump) หรือสายแร่แกรไฟต์ (Vein) และแกรไฟต์แบบเกล็ด (Flake graphite)

โดยปกติแล้วโครงสร้างคาร์บอนอะตอมจะมีอะตอมอื่นๆ ข้างเคียง 4 อะตอม แต่ในโครงสร้างของแกรไฟต์นั้น จะมีอะตอมข้างเคียงแค่ 3 อะตอมเท่านั้น โดยสร้างเป็นพันธะโคเวเลนต์ แต่ละอะตอมคาร์บอนจะใช้อิเล็กตรอน 1 ตัวกับอะตอมข้างเคียง 2 อะตอม และใช้อิเล็กตรอน 2 ตัวกับอะตอมคาร์บอนตัวที่ 3 ดังนั้นในโครงสร้างจึงประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน – คาร์บอน

1 พันธะ ทุกอะตอมจะเชื่อมต่อกันในแนวระนาบ และแต่ละระนาบจะเรียงซ้อนต่อกันขึ้นไปทางด้านบนของแต่ละระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแกรไฟต์ [11]

ในโครงสร้างแกรไฟต์ พันธะระหว่างคาร์บอน – คาร์บอน ในแนวระนาบจะมีความแข็งแรงมาก แต่แรงพันธะที่เชื่อมระนาบแต่ละระนาบจะไม่ค่อยแข็งแรง เป็นผลให้เกิดการเลื่อนไถลระหว่างแต่ละระนาบที่เชื่อมต่อกันได้ ซึ่งเป็นการอธิบายถึงความอ่อนตัวของแกรไฟต์และการใช้เป็นสารหล่อลื่น เช่น ในน้ำมันเครื่อง การที่คาร์บอนแต่ละอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่นอีก 3 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันภายในชั้นเดียวกัน ส่งผลให้คาร์บอนแต่ละอะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเหลืออยู่โดยอิเล็กตรอนไม่อยู่กับที่ เคลื่อนที่ได้อิสระทั่วไปภายในชั้นเดียวกัน แกรไฟต์จึงนำไฟฟ้าได้ดีเฉพาะทิศทางขนานกับชั้นของแกรไฟต์เท่านั้น

นอกเหนือจากการใช้แกรไฟต์ อาจใช้ข้อกำหนดต่อไปนี้ในการเลือกสารที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นสารช่วยนำไฟฟ้าในส่วนของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

- มีค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนสูง
- มีความเสถียรต่อสารเคมีที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น เชื้อเพลิง สารออกซิไดส์ และน้ำ
- มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
- สามารถผลิตและขึ้นรูปได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสมบัติและลักษณะของสารคาร์บอน เช่น ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค รูปร่างของอนุภาค ความหนาแน่นพื้นที่ผิวจำเพาะ และความสามารถในการถูกดูดซับจากสารช่วยยึดเกาะ (binder) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 10 และ 20 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแนวแคบนั้น พบว่าให้ผลที่ดีในการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ระดับไมโครสโคป ส่วนอนุภาคขนาดเล็กที่พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าต่ำ (BET surface) สามารถลดความหนืดของสารประกอบได้ สารคาร์บอนที่มีความสามารถในการ

การถูกดูดซับจากสารช่วยยึดเกาะต่ำ จะทำให้ความหนืดของสารประกอบมีค่าต่ำ และ ยังช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีในสารช่วยยึดเกาะอีกด้วย

- ไอโซทรอปี (Isotropy) อัตราส่วนลักษณะ (Aspect ratio) ของอนุภาคที่ต่ำนั้น (เช่น รูปร่างของอนุภาคที่คล้ายทรงกลมมากกว่าจะสามารถขึ้นรูปได้ดี) จะทำให้ แนวโน้มของการเรียงตัวแนวราบในระหว่างที่วัสดุคานข้างเกิดการเคลื่อนที่ใน กระบวนการขึ้นรูปมีค่าต่ำ ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้าภายในระนาบ (Through plane electrical conductivity) มีค่าต่ำ
- ความบริสุทธิ์ของสาร สิ่งที่สำคัญมากที่สุดคือการปนเปื้อนของโลหะและซัลเฟอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

#### 2.4.2 พอลิเมอร์

สำหรับส่วนของพอลิเมอร์หรือส่วนของสารช่วยยึดเกาะ (Binder component) ในการเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์คอมโพสิต อาจเลือกได้จากทั้ง เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือพลาสติกเทอร์โมเซต (Thermosetting plastic) ในการ เลือกชนิดของพอลิเมอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิคในกระบวนการผลิตที่มีอยู่ การนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เทอร์โมพลาสติกที่มีราคาสูงซึ่งมีขีดจำกัดในด้านความเสถียรต่ออุณหภูมิ อาจนำไปใช้งาน สำหรับอุปกรณ์แบบพกพาที่ทำงานในอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้อาจใช้สมบัติในเรื่องความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของแผ่นนำกระแสเป็นเครื่องตัดสินใจในการเลือกพอลิเมอร์ที่เหมาะสม

ในการเลือกชนิดของพอลิเมอร์นั้น คุณสมบัติที่มีความสำคัญได้แก่

- ความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (ปัจจุบันจำกัด อยู่ที่ ประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นผลจากความเสถียรต่ออุณหภูมิของ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ แต่ขีดจำกัดของอุณหภูมิอาจมีค่าเพิ่มขึ้น ได้เมื่อมี เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีความไวต่ออุณหภูมิน้อยลงจำหน่ายในเชิงพาณิชย์)
- การแผ่ขยายของอุณหภูมิต่ำ
- มีความเสถียรต่อความชื้น (การบวมตัวหรือการแยกสลายด้วยน้ำของวัสดุพอลิเมอร์ใน เซลล์เชื้อเพลิงเป็นผลให้โครงสร้างของแผ่นแตกแยกเป็นชิ้น)
- มีความเสถียรต่อสารเคมีที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น เชื้อเพลิง สารออกซิไดส์ และน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างเป็นกรดอ่อนๆ (อาจมีค่าต่ำจนถึง pH 4)
- ต้องไม่มีการปล่อยสารที่อาจจะมีแนวโน้มทำให้เกิดอิเล็กโทรออกซิเดชัน (เช่น สาร ช่วยให้อ่อนตัว หรือสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) หรืออาจรบกวนการทำงานของ

องค์ประกอบอื่นๆ ในเซลล์เชื้อเพลิง (เช่น สารที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เช่น แอมโมเนีย)

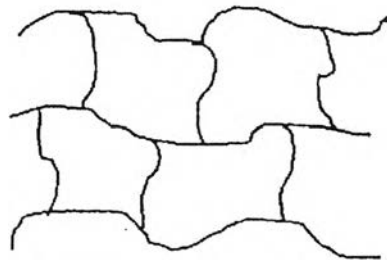
- ขั้นตอนผลิตเป็นคอมโพสิตมีความรวดเร็ว และมีความหนืดต่ำ
- มีประสิทธิภาพในการเป็นสารยึดเกาะสูง (มีความสามารถในการดูดและรวมตัวกับสารเติมแต่งปริมาณมากได้ โดยไม่เกิดการแยกตัว หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน)
- มีค่าการซึมผ่านได้ของแก๊สต่ำเพื่อป้องกันการรั่วซึมของเซลล์เชื้อเพลิงและสารออกซิไดส์
- เหมาะสมกับคุณสมบัติความชอบน้ำ หรือความไม่ชอบน้ำ

ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตแกรไฟต์พอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับแผ่นนำกระแส [8]

พอลิเมอร์	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
ฟลูออโรพอลิเมอร์ (เช่น พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์, PVDF)	- มีเสถียรต่อสารเคมี ไม่ชอบน้ำ	- ราคาสูง มีความหนืดสูง
ลิกวีดคริสตัลพอลิเมอร์ (LCP)	- มีความเสถียรต่อสารเคมีสูง ความหนืดต่ำ	- ราคาสูง
พอลิฟีนิลเลนซัลไฟด์ (PPS)	- มีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูง (สูงถึง 230 °C), ความหนืดต่ำ	- ราคาสูง
พอลิโพรพิลีน (PP)	- มีความสะดวกในขั้นตอน การผลิตคอมโพสิต, ราคาต่ำ	- ใช้เวลาในการขึ้นรูปนานกว่า LCP และ PPS
พอลิฟีนีลีน	- มีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูง (จุดอ่อนตัวประมาณ 200 °C)	
พีนอลิกเรซิน	- ราคาต่ำ	- จำเป็นต้องมีการบ่มภายหลังการขึ้นรูป
ไวนิลเอสเทอร์	- มีความรวดเร็วในขั้นตอน การผลิตคอมโพสิต	- ชีดจำกัดของความเสถียรต่ออุณหภูมิ และการแยกสลายด้วยน้ำที่อุณหภูมิ มากกว่า 100 °C

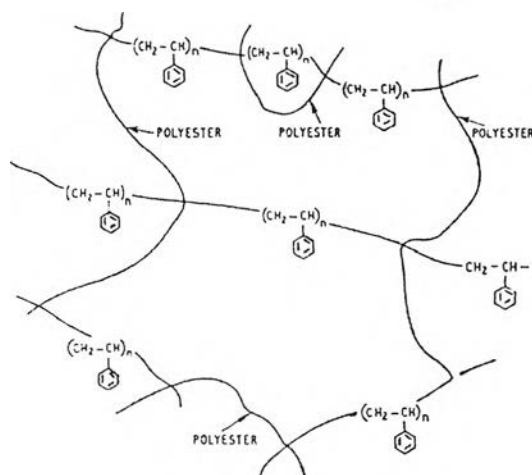
ในงานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาสารช่วยยึดเกาะชนิดพลาสติกเทอร์โมเซต ซึ่งพลาสติกชนิดนี้ได้จากพอลิเมอร์กลุ่มที่เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตแล้วจะมีรูปทรงถาวร ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง เกิดการเชื่อมโยง (Cross – linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงทน ไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมและมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมทริกซ์มีความแข็งแรงมาก หรือมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลง ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซตแสดงดังรูปที่ 2.5 เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ พอลิเอสเทอร์เรซิน อีพอกซีเรซิน ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต [12]

- พอลิเอสเทอร์เรซิน (Polyester resin) [13] เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เตรียมได้จากการควบแน่นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของแอนไฮไดรด์ (Anhydride) และไดไฮดริกแอลกอฮอล์ (Dihydric alcohols) พอลิเอสเทอร์ประเภทเทอร์โมเซตจะเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดสายโซ่ตรงไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester) จะละลายในไวนิลมอนอเมอร์ที่ว่องไว เช่น สไตรีน (Styrene), ไวนิลโทลูอีน (Vinyl toluene), ไดอัลลิลฟทาเลต (Diallyl phthalate) หรือ

เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) ซึ่งจะได้สารละลายที่มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 200 – 2000 เซนติพอยต์ การให้ความร้อน ร่วมกับการใช้ตัวเริ่ม (Initiator) ประเภทเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็น โครงร่างตาข่าย (Cross – linking reaction) ระหว่างมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว 2 มอนอเมอร์ เปลี่ยนจากสารละลายที่มีความหนืดต่ำไปเป็นพลาสติกเทอร์โมเซต ลักษณะการเชื่อมโยงในพอลิเอสเทอร์เรซิน แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 การเกิดการเชื่อมโยงเป็น โครงร่างตาข่ายอาจเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้องถ้าเลือกชนิดของเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่เหมาะสม พอลิเอสเทอร์อาจแบ่งตามชนิดของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ชนิดออร์โธเรซิน (Ortho resin), ชนิดไอโซเรซิน (Iso resin), ชนิดไบสฟีนอล เอ ฟูมาเรต (Bisphenol A (BPA) fumarates), ชนิดคลอเรนดิกส์ (Chlorendics) และชนิดไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl ester)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซิน [14]

พอลิเอสเทอร์เรซินที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว จะมีสมบัติแข็ง ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ สมบัติทางกายภาพของเรซินชนิดนี้ในทางการค้ามีตัวแปรมากมาย จึงไม่มีสมบัติที่เฉพาะเจาะจงแล้วแต่ความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปจะทนความร้อนได้ดีจนถึง 200 องศาเซลเซียส ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีสำหรับไฟฟ้าความถี่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากเรซินนี้มีสภาพขั้วจากหมู่เอสเทอร์ สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลที่ถูกเชื่อมโยง สมบัติทางด้านเคมี มีความต้านทานตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี ยกเว้นพวกคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เอทิลีนไดคลอไรด์ (Ethylchloride) และไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) พวกเอสเทอร์เช่น เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) คีโตน เช่น อะซีโตน (Acetone) เมทิลเอทิลคีโตนเหล่านี้

อาจเกิดการกัดกร่อนได้ แต่มีความต้านทานกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ได้ดี ยกเว้นกรดที่เป็นตัวออกซิไดส์แรงๆ เท่านั้น

- อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) [14] เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ในกลุ่มพลาสติกเทอร์โมเซตด้วยกันนั้น พอลิเอสเทอร์ชนิดสายโซ่ตรงไม่อิ่มตัวอาจจะมีราคาถูกกว่า และพอลิอีมีดอาจมีสมบัติที่ดีกว่าเมื่อใช้งานในอุณหภูมิสูง แต่อีพอกซีเรซินนั้นมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลอยู่ในช่วงกว้าง ทำให้นิยมใช้อีพอกซีเรซินเป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อการใช้งานในหลากหลายความต้องการ สมบัติของอีพอกซีเรซินที่ได้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของเรซิน สารช่วยบ่ม (Curing agent) สารเติมแต่งพอลิเมอร์ต่างๆ และภาวะที่ใช้ในการบ่มเรซิน ทำให้อีพอกซีเรซินที่ได้อาจมีสมบัติในด้านความเหนียว (Toughness) ทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย สมบัติเชิงกลซึ่งอาจจะอยู่ในช่วงมีความยืดหยุ่นมากจนถึงมีความทนทานสูงและมีความแข็ง มีความต้านทานต่อการคืบ (Creep) และความล้า (Fatigue) สามารถยึดติดต่อสารพวกเส้นใยได้ดีมาก มีความต้านทานต่อความร้อน และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี รวมถึงไม่มีผลิตภัณฑ์พลอยได้เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มเรซิน การหดตัวเนื่องจากการบ่มมีน้อยมาก เรซินที่ยังไม่ได้ผ่านการบ่มจะมีโครงสร้างทางกายภาพหลากหลาย ช่วงของความหนืดมีค่าต่ำไปจนถึงของแข็งที่ไม่มี ความเหนียว

อย่างไรก็ตาม มีอยู่หลายกรณีที่พบว่าพอลิเมอร์เพียงลำพังไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการได้ จึงมีการนำพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุอื่นตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ได้ตามความต้องการของการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุที่นำมาผสมรวมกับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า สารเติมแต่งหรือสารปรับแต่ง (Additives) โดยสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ทางด้านใดด้านหนึ่งดังต่อไปนี้ [15]

1. ปรับปรุงลักษณะเฉพาะของกระบวนการ เช่น ลดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยการใช้สารหล่อลื่น
2. ปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยการรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้สารให้สี เป็นต้น

ในบางครั้งสารเติมแต่งอาจนำมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายของวัสดุลง แม้ว่าโดยปกติสารเติมแต่งจะมีราคาแพงกว่าพอลิเมอร์ แต่ก็ยังเป็นที่ยอมรับใช้เนื่องจากสารเติมแต่งช่วยลดจุดบกพร่องที่สำคัญของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะวัสดุในทางวิศวกรรมให้มีความแข็งแรง ความแข็งแรง และมีจุดอ่อนตัวต่ำ สามารถใช้สารเติมแต่งช่วยทำให้วัสดุนั้นๆเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากขึ้น โดยที่สารเติมแต่งที่ใช้ในพลาสติกมีมากมายหลายชนิดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidation) สารป้องกันความร้อน (Heat stabilizer) เป็นต้น



ในที่นี้จะขอกล่าวถึงสารเติมแต่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแกรไฟต์คอมโพสิตสำหรับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ดังนี้

- สารเติมและสารเสริมแรง สารเติม คืออนุภาคของแข็งที่ไม่เพิ่มความแข็งแรงทางกลให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่วนสารเสริมแรง (Reinforcement) คือวัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็งจำนวนมากสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์และสามารถเพิ่มความแข็งแรงทางกล ตัวอย่างของสารเติมและสารเสริมแรงได้แก่

1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) จัดเป็นสารเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวอนุภาคมีขนาดเล็กละเอียด ดัชนีการหักเหแสงค่อนข้างสูง (High refractive index) และมีเสถียรภาพต่อสารเคมี

2) ผงคาร์บอน (Carbon black) จัดเป็นสารเติมประเภทเสริมแรงหลักในยางเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด เหมาะกับโครงสร้างที่มีการยึดเกาะกับโมเลกุลยาง ในพลาสติกนั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้ผงคาร์บอนเสริมแรงเพราะจะทำให้เปราะ แต่นิยมใช้แบบความเข้มข้นสูงเพื่อผลิตสารกึ่งตัวนำ ส่วนแบบที่มีความเข้มข้นต่ำจะเป็นสารเสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเล็ต

3) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) จัดเป็นสารเสริมแรงประเภทเส้นใย ได้จากการไพโรไลซิสเส้นใยอินทรีย์ต่างๆ ที่นิยมใช้คือ พอลิอะคริโลไนไทรล์ประกอบด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) เสริมแรงด้วยเส้นใยแกรไฟต์ชนิดผลึก (Crystalline graphite fibrils) โดยมีอัตราส่วนของความแข็งแรงดึงต่อความถ่วงจำเพาะเป็น 3.5 เท่าของเหล็กกล้า ช่วยทำให้เกิดการหล่อลื่น (Lubricity) สูงและการนำไฟฟ้าสูงด้วย ในเริ่มแรกใช้กับเทอร์โมเซต แต่ต่อมานิยมใช้กับวิศวกรรมเทอร์โมพลาสติกด้วย อย่างไรก็ตามเส้นใยเหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนลักษณะของอนุภาคสูง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสัดส่วนระหว่างเส้นใยที่เรียงตัวในแนวระนาบเพื่อช่วยเสริมสมบัติเชิงกลกับอนุภาคที่เรียงตัวแบบสุ่มเพื่อเสริมในส่วนของการนำไฟฟ้าภายในระนาบให้มีค่าเหมาะสม

- สารช่วยให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ (Mold release agents) ควรมีลักษณะที่สำคัญดังนี้ คือ ไม่ควรมีผลต่อการอัดแบบพลาสติก ไม่ควรมีผลต่อรูปร่างลักษณะชิ้นงานที่อัดแบบได้ ไม่ควรมีผลทำให้สมบัติที่ได้ลดลง ต้องไม่เกิดการเคลื่อนออกจากชิ้นงานอัดแบบที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว มีเสถียรภาพต่อการเองจิง (Aging) และอายุการใช้งานได้นาน รวมทั้งง่ายต่อการนำไปใช้ สารช่วยให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ ได้แก่

1) ซิลิโคน (Silicones) เป็นสารที่ช่วยให้เกิดชั้น (layer) ระหว่างพลาสติกกับแม่พิมพ์ได้ดี โดยมีแรงตึงผิวต่ำ จึงไม่เกิดการติดกับผิวโลหะ ประโยชน์ของซิลิโคนคือ มีการลื่นไหลสูงสุดแม้จะใช้ปริมาณน้อย ทนอุณหภูมิได้สูง ประมาณ 260 องศาเซลเซียส มีความเหนียวค่อนข้างมาก และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงมาก แต่ข้อเสียของซิลิโคนคือราคาค่อนข้างสูง

2) เมทัลลิก สเตียเรท (Metallic stearates) ได้แก่ โลหะ อะลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม แบเรียม และซิงก์ของกรดสเตียริก เช่น ซิงก์สเตียเรท จัดเป็นฟิล์มที่กันน้ำได้แต่เป็นสารช่วยหลุดที่ไม่ดี และมีแนวโน้มก่อตัวเป็นแม่พิมพ์ได้ด้วย

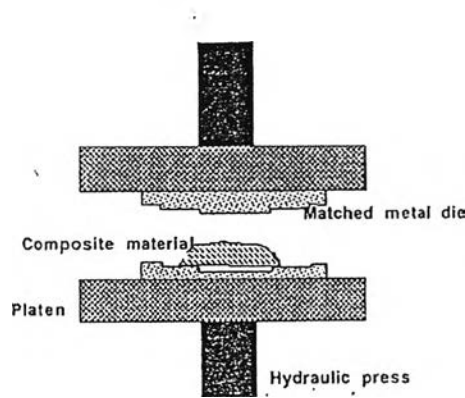
เพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่ดี องค์ประกอบส่วนที่นำไฟฟ้านั้นจะต้องกระจายตัวอยู่ในสารช่วยยึดเกาะ ในช่วงต้นของการผลิตวัสดุคอมโพสิต ส่วนใหญ่จะใช้ตัวกระจายที่เป็นของเหลว (Liquid dispersant) เช่น สารพอลิเมอร์ช่วยยึดเกาะจะถูกละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ และแกรไฟต์จะถูกระบายในสารละลายนั้นเพื่อให้ได้เป็นสเลอรี (Slurry) จากนั้นตัวทำละลายอินทรีย์จะถูกกำจัดออกโดยการทำให้แห้งด้วยอากาศ หรือทำให้แห้งภายใต้ภาวะสุญญากาศ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และการทำงานที่จะทำให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันโดยกระบวนการทำให้แห้งด้วยอากาศเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก การใช้ภาวะที่รุนแรงขึ้น เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ (ให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์) หรือใช้การเฉือนค่าสูง (High shear) พบว่าสามารถช่วยให้สารเติมแต่งเกิดการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนี้ การผสมแบบเย็น (Cold mixing) ก็เป็นที่นิยมเนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือ อนุภาคแกรไฟต์ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ที่หลอมเหลว การผสมแบบแห้ง (Dry mixing) สามารถดำเนินการได้โดยใช้กระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะใช้เครื่องนวดผสม (Kneader) หรือโดยใช้กระบวนการแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะใช้เครื่องหลอมอัดรีด (Extruder) แต่ถ้าใช้เครื่องรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Double – screw extruder) จะมีส่วนผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า พอลิเมอร์จะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องหลอมอัดรีดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะถูกให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) ถูกอัด และทำให้กลายเป็นพลาสติก จากนั้นสารนำไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอโดยคำนวณจากอัตราส่วนที่ต้องการจะถูกป้อนที่ส่วนท้ายของกระบวนการ ซึ่งเป็นจุดที่พอลิเมอร์จะกลายเป็นพลาสติก อนุภาคนำไฟฟ้าจะกระจายตัวอยู่ในพลาสติกนั้น ซึ่งส่วนผสมที่ได้นี้จะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือแท่ง หรือจากการหล่อเย็นและผ่านการทำให้เป็นของแข็ง ส่วนผสมที่เป็นเม็ดหรือแท่งนี้จะถูกทำให้เป็นเม็ดเล็กๆ หรือบดให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อผ่านเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์จะเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) แต่ในกระบวนการผลิตคอมโพสิตระหว่างแกรไฟต์และพอลิเมอร์ก็ยังคงเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปพอลิเมอร์ไว้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตคอมโพสิตจึงสามารถขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆได้ด้วยเทคนิคสำหรับพอลิเมอร์เช่น การหลอมอัดรีด (Extruding) การอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) หรือการฉีดเข้าแบบ (Injection molding)

โดยในขั้นตอนที่จะขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นแผ่นนั้น เทคนิคการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ส่วนผสมจะถูก

นำไปใส่ในแม่พิมพ์และให้ความร้อนภายใต้แรงดัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์จะกลายเป็นพลาสติก สำหรับเทอร์โมพลาสติกนั้นอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 10 – 50 เคลวินเหนือจุดหลอมเหลว และพลาสติกเทอร์โมเซต อุณหภูมิที่ใช้ในตอนแรกจะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกนิ่มเพื่อให้เกิดรูปร่างของชิ้นงาน ตามด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อให้การบ่มตัว (Curing) เกิดได้สมบูรณ์

เมื่อขึ้นรูปได้เป็นแผ่นคอมโพสิตแบบเรียบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้เกิดช่องทางการไหลของแก๊สภายในแผ่น ซึ่งจะใช้เครื่อง CNC – driven milling machine วิธีการนี้ค่อนข้างกินเวลาและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่ขนาดของช่องทางการไหลที่ได้ก็มีความเที่ยงตรง นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการลดขั้นตอนการทำงาน อาจใช้แม่พิมพ์โลหะที่มีช่องทางการไหลของแก๊สเพื่อขึ้นรูปแผ่นคอมโพสิตก็ได้



รูปที่ 2.7 เครื่องอัดแบบขึ้นรูป [16]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kuan และคณะ [17] ได้ศึกษาผลของปริมาณแกรไฟต์และขนาดของผงแกรไฟต์ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางอุณหภูมิของแผ่นนำกระแสแบบสองชั้นชนิดคอมโพสิตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง สารเคมีที่ใช้ในการทดลองคือ ฟีนอลิกโนโวแลก อีพอกซี – เบสไวนิลเอสเทอร์เรซิน และผงแกรไฟต์ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความหนาแน่น 1.88 และขึ้นรูปแผ่นนำกระแสด้วยกระบวนการบีเอ็มซี (BMC, Bulk Moulding Compound) ผลการศึกษพบว่า สามารถเตรียมแผ่นนำกระแสด้วยกระบวนการบีเอ็มซีได้ ความเสถียรต่ออุณหภูมิของแผ่นนำกระแสชนิดคอมโพสิตนี้ สามารถทนต่ออุณหภูมิได้มากกว่า 250 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของแผ่นคอมโพสิตเพิ่มจาก 1.49 เป็น 1.82 เมื่อปริมาณแกรไฟต์

เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 80 และลดลงจาก 1.70 เป็น 1.45 เมื่อขนาดอนุภาคลดลงจากช่วง 1000 – 177 เป็นขนาดน้อยกว่า 53 ไมโครเมตร จากค่าความต้านทานไฟฟ้าและความสามารถให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่าน พบว่า แผ่นคอมโพสิตที่มีปริมาณแกรไฟต์ 75% โดยน้ำหนัก และขนาดของอนุภาคแกรไฟต์อยู่ในช่วง 177 – 1000 ไมโครเมตร มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด โดยมีความสามารถให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านน้อยที่สุดที่  $5.82 \times 10^{-8}$  ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตรวินาที และค่าความต้านทานไฟฟ้า 3.7 มิลลิโอห์ม จากการทดสอบ ค่ากระแส – ศักย์ไฟฟ้า และค่ากระแส – ความต่างศักย์ พบว่า แผ่นนำกระแสชนิดคอมโพสิตที่ได้มีประสิทธิภาพในการใช้งานเทียบเท่ากับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วฐานแกรไฟต์

Vovchenko และคณะ [18] ศึกษาโครงสร้างของแกรไฟต์และชนิดของตัวเติมอินทรีย์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของแผ่นอัดคอมโพสิตซึ่งมีแกรไฟต์เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยศึกษาแกรไฟต์ธรรมชาติ และทีอีจีแกรไฟต์ (TEG, Thermoexfoliated graphite) โดยใช้ตัวเติมอินทรีย์ชนิดพอลิเออร์กาโนไซโลเซน 2 ชนิดในการปรับปรุง ทีอีจีแกรไฟต์คือ พอลิเมทิลเฟนิลไซโลเซนและพอลิเฟนิลไซโลเซน ปริมาณแกรไฟต์จะใช้ตั้งแต่วัตถุ 4 – 73 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปโดยการอัดแบบไฮดรอลิก ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าตามแนวแกน ( $\rho_c$ ) และในแนวตั้งฉาก ( $\rho_a$ ) โดยใช้วิธีแบบสี่จุด (Four – probe method) พบว่า แผ่นคอมโพสิตที่ใช้ ทีอีจีแกรไฟต์และปรับปรุงด้วยตัวเติมอินทรีย์ โดยใช้ปริมาณทีอีจีแกรไฟต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีสัดส่วน  $\rho_c/\rho_a$  ประมาณ 10 ซึ่งน้อยกว่าค่าที่วัดได้ในทีอีจีแกรไฟต์บริสุทธิ์ที่ความหนาแน่นเดียวกัน 2 – 3 เท่า

Novak และ Krupa [19] ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ของอีพอกซี และพอลิยูรีเทนเรซิน ที่เติมด้วยแกรไฟต์สังเคราะห์ 2 ชนิด รวมถึงศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงกระแทกและความแข็งแรงของการยึดเกาะกับอะลูมิเนียมฟอยล์ สารเคมีที่ใช้จะเป็นผงแกรไฟต์สอง ชนิดคือ KS6 และ KS15 ซึ่งทั้งคู่มีส่วนของคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 99.9 และสัดส่วนของเส้นน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ขนาดอนุภาคของผงแกรไฟต์โดยเฉลี่ยร้อยละ 90 ของอนุภาคทั้งหมดสำหรับ KS15 มีขนาด 15 ไมโครเมตร และสำหรับ KS6 มีขนาด 6 ไมโครเมตร ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะขึ้นรูปโดยใช้แบบยางซิลิกอน โดยใช้แกรไฟต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันผสมกับพอลิเมอร์ (อีพอกซี และพอลิยูรีเทนเรซิน) ซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำหนักพอลิเมอร์และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) เป็น 2:1 พบว่าแผ่นคอมโพสิตที่ใช้ผงแกรไฟต์ต่างชนิดกันมีค่าขีดเริ่มการไหลซึมผ่าน (Percolation concentration) ซึ่งเป็นความเข้มข้นของตัวเติม (Filler) ที่วัดได้เมื่อมีการเชื่อมโครงข่ายนำไฟฟ้าของอนุภาคตัวเติมภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เท่ากันคือร้อยละ 22 โดยปริมาตร ดังนั้น ความแตกต่างของชนิดแกรไฟต์ที่ใช้ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการนำไฟฟ้า และค่าขีดเริ่มการไหลซึมผ่าน สำหรับค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกจะลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์

เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดสำหรับคอมโพสิตพอลิยูรีเทน/แกรไฟต์ KS6 ค่าความแข็งแรงต่อแรงยึดเกาะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดสำหรับคอมโพสิตอีพอกซี/แกรไฟต์ KS6

Wolf และคณะ [1] ศึกษาการเตรียมแผ่นคอมโพสิตสำหรับใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์โดยใช้ liquid crystal polymer (LCP) เป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ ในการทดลองจะนำคาร์บอนไฟเบอร์และ LCP พอลิเมอร์ไปทำให้แห้งที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ LCP พอลิเมอร์ผสมกับคาร์บอนไฟเบอร์ในเครื่อง microcompounder แบบเกลียวแฝด ที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้เครื่อง extrudate ตัดให้เป็นเม็ด (Granules) โดยจะเปลี่ยนแปลงปริมาณของไฟเบอร์ระหว่าง ร้อยละ 3.5 – 44 โดยปริมาตร จากนั้นนำเม็ดที่ได้ไปเคลือบด้วยคาร์บอนแบล็คโดยใช้เครื่องผสม T2F การขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดรีดไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 296 องศาเซลเซียส และความดัน 50 กิโลนิวตัน โดยจะให้ความดันจนกว่าอุณหภูมิจะลดลงจนถึง 160 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เมื่ออุณหภูมิของเครื่องอัดลดลงจนถึง 75 องศาเซลเซียส เมื่อได้ชิ้นงานแล้ว จะใช้เครื่อง MF 70 milling cutter ตัดผิวชิ้นงานบริเวณด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานออกประมาณ 100 – 200 ไมโครเมตร แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าการใช้ LCP ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในคอมโพสิตลดลงจากปริมาณที่ใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์ถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้ความหนาแน่นและความเปราะของแผ่นนำกระแสมีค่าลดลง นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะและสมบัติเชิงกลก็มีค่าผ่านเกณฑ์สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในเซลล์เชื้อเพลิง และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสสูงสุดที่ได้เมื่อใช้ในภาวะการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงกับแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าเพียงร้อยละ 20 เท่านั้น

Huang และคณะ [20] ศึกษาการเตรียมแผ่นคอมโพสิตโดยกระบวนการเวทเลย์ (Wet-lay) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการทำกระดาษ สารที่ใช้ช่วยในการยึดเกาะได้แก่พอลิเอทิลีนเทอแรพลาสต์และพอลิฟีนิลซัลไฟด์ โดยในขั้นแรกจะผสมเทอร์โมพลาสติกไฟเบอร์กับน้ำและทำให้สารผสมแขวนลอยนั้นปั่นป่วน จากนั้นเติมเส้นใยคาร์บอนและอนุภาคแกรไฟต์ลงไปและผสมกัน ทำให้สเลอรีเจือจางโดยให้มีระบบน้ำหมุนเวียนเติมลงในอ่างผสมที่อัตราการไหลคงที่ จากนั้นจะนำแผ่นที่รวบรวมได้ไปอบในเตาอบ โดยจะตั้งอุณหภูมิเตาอบที่จุดหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกไฟเบอร์เพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำและเกิดการหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกไฟเบอร์บางส่วน นำแผ่นวัสดุที่ได้เข้าสู่ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป ซึ่งจะแบ่งการขึ้นรูปได้เป็น 3 แบบคือการขึ้นรูปโดยตรง (Direct molding) การขึ้นรูปแบบเวท/คาย เลย์ (Wet/dry lay) และการขึ้นรูปแบบอัดซ้อนผิวนอก – แกนกลาง (Skin – core laminate) ผลที่ได้พบว่า กระบวนการเวทเลย์คอมโพสิตที่ใช้ในการทำแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ สามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในแนวระนาบในขณะที่ยังรักษาค่าการนำไฟฟ้าภายในแนวระนาบของแผ่นคอมโพสิตไว้ได้

ส่วนสมบัติเชิงกลของแผ่นคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนี้สามารถใช้ส่วนผสม และสารเติมแต่งได้แตกต่างกันทั้งการขึ้นรูปส่วนที่เป็นแกนกลาง และส่วนที่เป็นผิวนอก เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามยังต้องปรับปรุงค่าความต้านทานครึ่งเซลล์ และค่าการนำไฟฟ้าภายในระนาบของแผ่นคอมโพสิตที่เตรียมได้จากกระบวนการผลิตวิธีนี้

เอื้องดาว [21] ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนและสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า ได้แก่ อะเซทิลีนแบล็ค แกรไฟต์ และเส้นใยคาร์บอน โดยศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ในการผสมพอลิพรอพิลีนและสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าจะใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กๆแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ผลที่ได้พบว่า ผลกระทบร่วมในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมระหว่างอะเซทิลีนแบล็คกับเส้นใยคาร์บอนให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 20 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 30 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3.3 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เมื่อพิจารณาต้นทุนในการผลิต พบว่า การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีต้นทุนต่ำที่สุด การเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งการเติมซิงค์สเตียเรท 5 phr ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 phr ในพอลิเมอร์คอมโพสิตของอะเซทิลีนแบล็คร้อยละ 40 กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.006 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร อีกทั้งยังพบว่าการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดนี้ ส่งผลให้ความหนาแน่นและความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับน้ำและความแข็งแรงดัดมีค่าลดลง