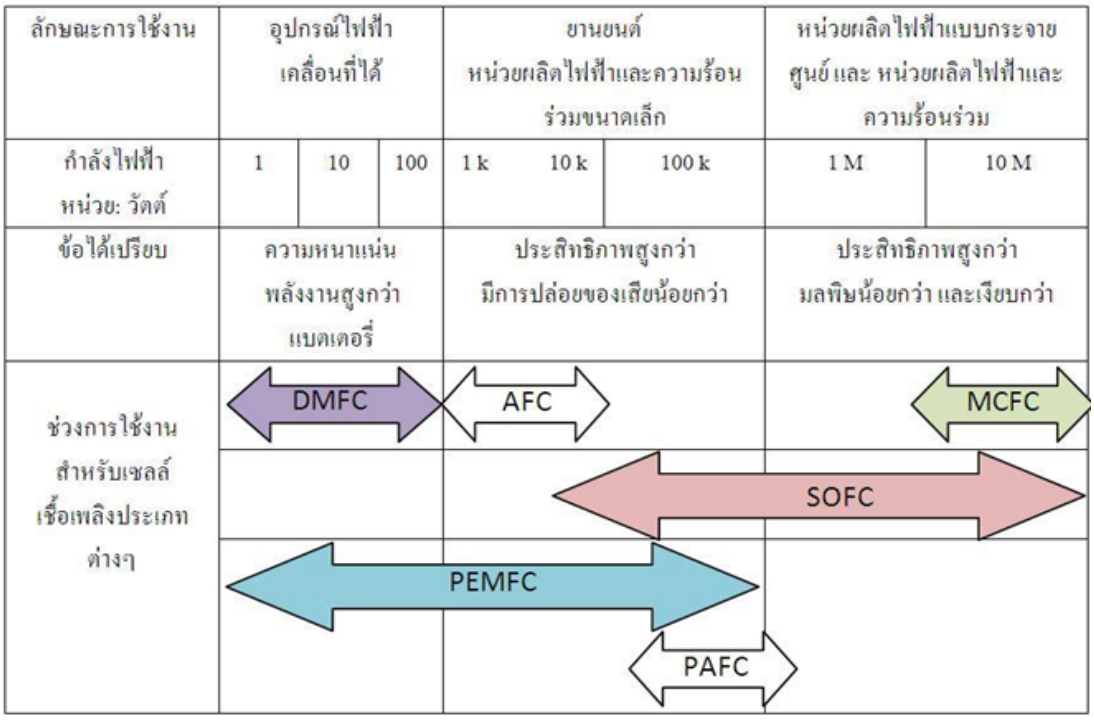
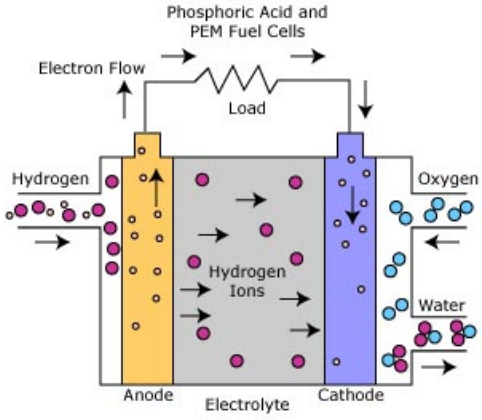
เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะมีช่วงการทำงานที่แตกต่างกัน เชื้อเพลิงที่ใช้อาจต่างกัน จึงเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภท [4]

2.2.1 เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริค (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)[5]

กรดฟอสฟอริคจะถูกใช้เป็นสารอิเล็คโทรไลท์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ โดยที่กรดฟอสฟอริคจะถูกบรรจุในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ปฏิกิริยาในตัวกลางที่มีฤทธิ์เป็นกรด อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีค่าอยู่ระหว่างในช่วง 170-200°C ณ สภาวะอุณหภูมิดังกล่าว สารอิเล็คโทรไลท์จะมีความเสถียรซึ่งจะทำงานโดยสามารถใช้อากาศที่มีก๊าซ CO_2 อยู่ การที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงปานกลาง จะช่วยลดความเป็นพิษของก๊าซ CO_2 ที่มีผลต่อตัวคะตะลิสต์ลง จากการทดสอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC นี้มีอายุการใช้งานได้นานถึง 40,000 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 40% และใช้ไอน้ำที่ผลิตได้ 85% ในระบบ ผลิตความร้อนร่วม อุณหภูมิในการทำงานระหว่าง 300-400 °F (150-200 °C) ปัจจุบันมีขนาดใช้งานที่ 1 kW และ 1 MW โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริค สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริค (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) [5]

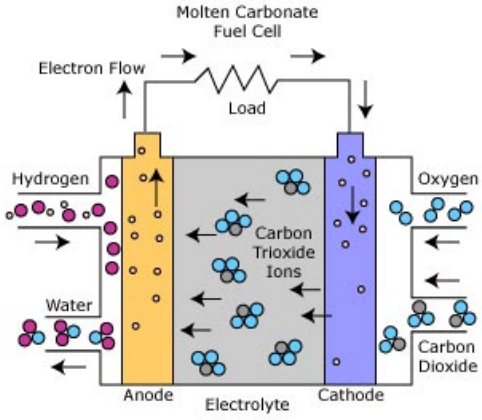
2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)[6]

ของผสมของเกลือลิเทียมคาร์บอเนตกับเกลือโพตัซเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนตัวกลาง $LiAlO_2$ จะถูกใช้เป็นสารอิเล็คโทรไลท์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง MCFC ก๊าซ CO_2 ที่ออกมาจากขั้วอะโนดจะถูกใช้ที่ขั้วแคโทด ซึ่งการไหลเวียนกลับของ CO_2 นี้เป็นสิ่งที่สำคัญต่อการทำงานของเซลล์ อุณหภูมิการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 500-700°C ด้วยสภาวะอุณหภูมิที่สูงนี้ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็คโทรดจึงไม่จำเป็นต้องมี Pt เป็นคะตะลิสต์ การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอมสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

-แบบที่มีการปฏิรูปภายนอกและแบบปฏิรูปภายใน ในรูปแบบแรกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ H_2 โดยเครื่องปฏิรูป (reformer) ที่ติดตั้งภายนอก

-แบบที่สองสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ H_2ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง

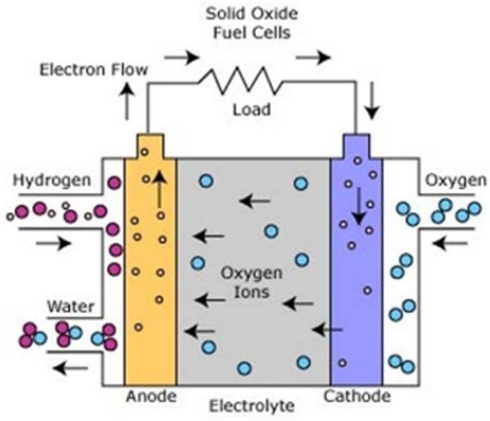
ข้อควรระวังอย่างหนึ่งในกรณีที่วัตถุดิบที่ใช้เป็นถ่านหินที่มีธาตุกำมะถันอยู่คือ การผลิตก๊าซจากถ่านหินโดยปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชั่นอาจจะทำให้เกิด H_2S ซึ่งก๊าซ H_2S นี้จะเป็นพิษต่อขั้วอิเล็คโทรด อุณหภูมิในการทำงานที่ 1,200°F (650°C) ปัจจุบัน MCFC ใช้ได้กับไฮโดรเจน, CO, ก๊าซธรรมชาติ, โพรเพน, มีเธน และก๊าซจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชั่นถ่านหิน กำลังการผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 10 kW - 20 MW โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC) [6]

2.2.3 เซลล□เชื้อเพลิงแบบออกไซด์□ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)[7]

ในระบบ SOFC ทั้งอิเล็คโทรดและสารอิเล็คโทรไลท์□ต่□างก็ทำมาจากวัสดุเซรามิค จำพวกออกไซด์□แข็ง อาทิ อิเทรีย (yttria) หรือเซอโคเนีย (zirconia) วัสดุเหล่□านี้จะสามารถเป็นตัวนำอิออน O^{2-} ที่อุณหภูมิสูงกว□า 800°C ถ้าเซลล์□มีสภาวะการทำงานที่ประมาณ 900°C การไหลเวียนกลับของ CO_2 จากทางออกขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเป็□นสิ่งที่ไม่□จำเป็□น ก็□าซธรรมชาติ ก็□าซจากถ่านหินหรือเชื้อเพลิงเหลวที่ถูกทำให้□ระเหยสามารถถูกปฏิรูปให้□กลายเป็□นก็□าซไฮโดรเจนภายในตัวเซลล์□เชื้อเพลิง ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์□ได้□ ระบบ SOFC สามารถใช้□ได้□กับก็□าซธรรมชาติ ดังนั้น SOFC จึงมีศักยภาพสูงในอนาคตอันใกล้ อุณหภูมิทำงานประมาณ 1,800°F (1,000 °C) ขนาดกำลังผลิตไฟฟ□า 100 kW โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์□ของแข็ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



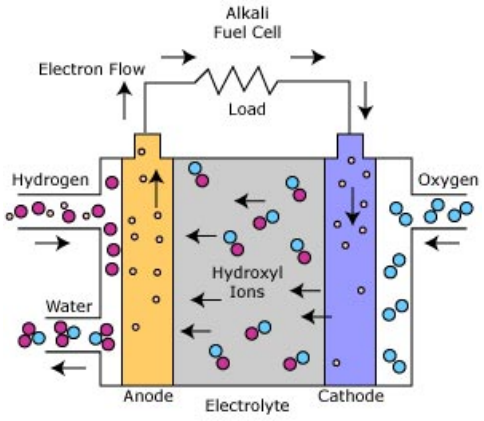
รูปที่ 2.4 หลักการเซลล์□เชื้อเพลิงแบบออกไซด์□ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) [7]

2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)[8]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะใช้ KOH เป็นอิเล็คโทรไลท์ (30-43%) เซลล์เหล่านี้จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้องและจะให้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแส (current densities) เดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงอื่นๆ

ก๊าซที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะมีก๊าซ CO_2 ไม่ได้ ทั้งนี้เพราะ CO_2 จะเกิดเป็นคาร์บอเนตในตัวกลางที่เป็นด่างและทำให้รูพรุนอุดตันก๊าซ CO_2 จะถูกดึงออกจากอากาศโดยการดูดซึมกับน้ำโซดา (soda lime)

ระบบ AFC เคยถูกใช้ในยานอวกาศ เรือดำน้ำ รถยนต์ไฟฟ้า และผลิตน้ำใช้ในยานอวกาศ อายุการทำงานของเซลล์อาจมีค่าสูงถึง 10,000-15,000 ชั่วโมง ราคาต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะใช้โลหะตระกูลสูง ต้องใช้พลังงานในการอัดหรือทำให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นของเหลว และก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงด้วย จากข้อเสียดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ยากต่อการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสูงถึง 70% โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

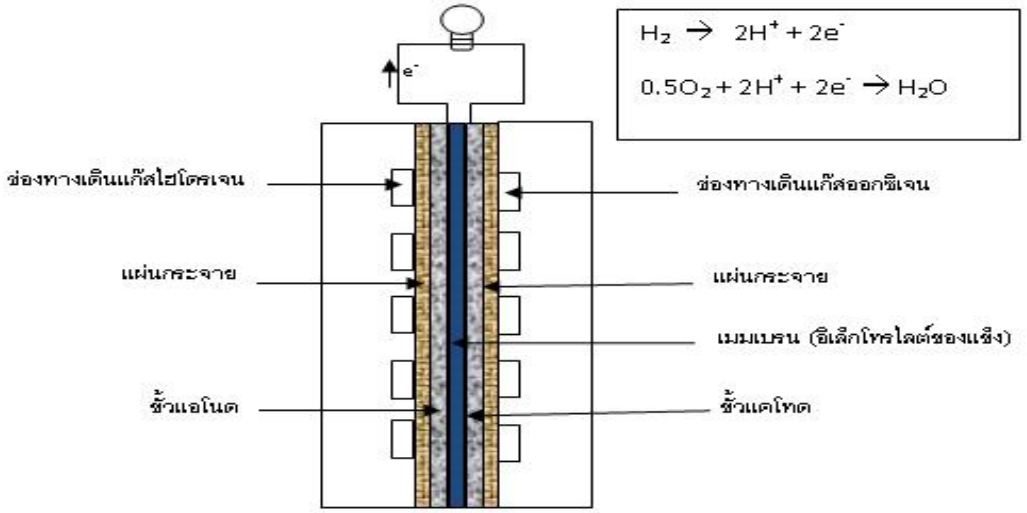


รูปที่ 2.5 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC) [8]

2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [9]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในยานยนต์ เช่นเดียวกับเซลล์เคมีไฟฟ้าทั่วไป เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยมีอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมให้ไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสามารถเดินทางข้ามจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งได้ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์เมมเบรนที่ยอมให้โปรตอน (H^+) ข้ามผ่านไป ส่วนประกอบสำคัญที่ถือได้ว่าเป็นหัวใจของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน คือส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าหรือ Membrane Electrode Assembly (MEA) ซึ่งเป็นการนำขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดมาประกบกัน

โดยมีเมมเบรนนำไอออนแทรกอยู่ระหว่างกลาง ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านเตรียมโดยจัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมลงบนขั้วไฟฟ้า ในกรณีนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือแพลทินัม ซึ่งมักเตรียมอยู่บนผงคาร์บอน (Pt/C) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีขนาด 2-10 นาโนเมตร ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ ไฮโดรเจนที่ป้อนเข้ามา จะเกาะลงบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วแตกตัวให้โปรตอนและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนออกจากระบบผ่านสายไฟฟ้า ส่วนโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมมเบรนข้ามมาฝั่งแคโทด ที่ซึ่งออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามาจะมาเกาะลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาและทำปฏิกิริยากับโปรตอนและอิเล็กตรอน ได้ผลผลิตเป็นน้ำและความร้อนดังแสดง



รูปที่ 2.6 หลักการและองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [4]

รูปที่ 2.7 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับงานวิจัยพื้นที่ขนาด 5 cm^2 [4]

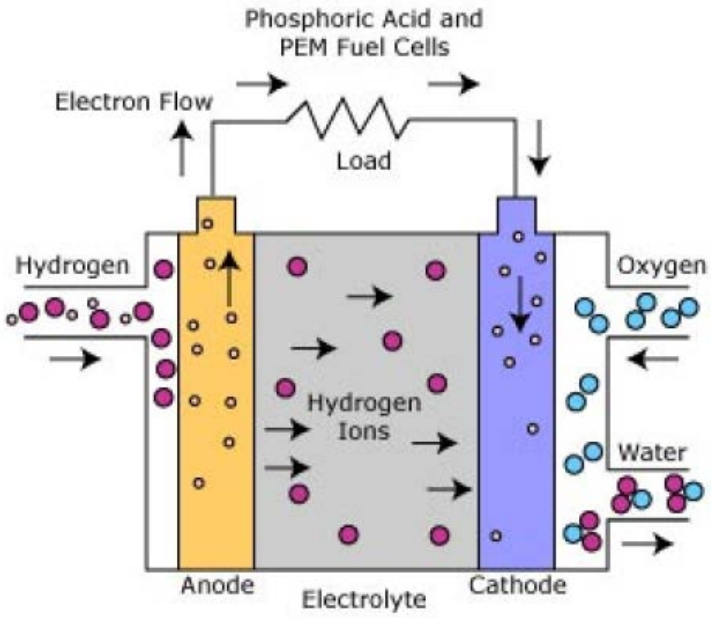
2.3 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEMFC) [10]

PEMFC ประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วน ได้แก่ อิเล็กโทรด 1 คู่ (แคโทด และแอโนด) พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน และตัวเร่งปฏิกิริยา เชื้อเพลิงซึ่งถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นโดยมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นโปรตอนอิเล็กตรอนและความร้อนจะถูกผลิตออกมาตามสมการ

$$2H_2 \quad \text{--------->} \quad 4H^+ + 4e^- + \text{Heat} \quad \text{(ปฏิกิริยาออกซิเดชัน)}$$

โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์เมมเบรน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนสูง (High Proton Conductivity) แต่ไม่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ (Electron Barrier) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อใช้เป็นกระแสไฟฟ้า จากนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วดังกล่าว ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากการที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ตามสมการ [1]

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \quad \text{------>} \quad 2H_2O \quad \text{(ปฏิกิริยารีดักชัน)}$$



รูปที่ 2.8 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน [10]

2.4 แผ่นสองขั้ว (Bipolar Plate) [10]

แผ่นสองขั้วหรือไบโพลาร์เพลตจะวางคั้นระหว่างขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งกับขั้วแอโนดของเซลล์ที่อยู่ถัดไป (เซลล์เชื้อเพลิงแบบสแต็ค) ทำหน้าที่ดึงกระแสออก กระจายแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเข้าไปในพื้นที่ทำปฏิกิริยา ถ่ายเทความร้อนออกจากเซลล์ และเป็นช่องป้อนก๊าซออกซิเจนให้ขั้วแคโทด และป้อนไฮโดรเจนให้แก่ขั้วแอโนด ซึ่งแผ่นไบโพลาร์สามารถสร้างได้จากวัสดุต่าง ๆ เช่น

-แกร์ไฟต์ มีการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่สูงนำไฟฟ้าได้ดี และทนทานการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียคือ ยากต่อการขึ้นรูปเนื่องจากแข็งและเปราะ น้ำหนักและราคาสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในการสร้างหอเซลล์เชื้อเพลิง

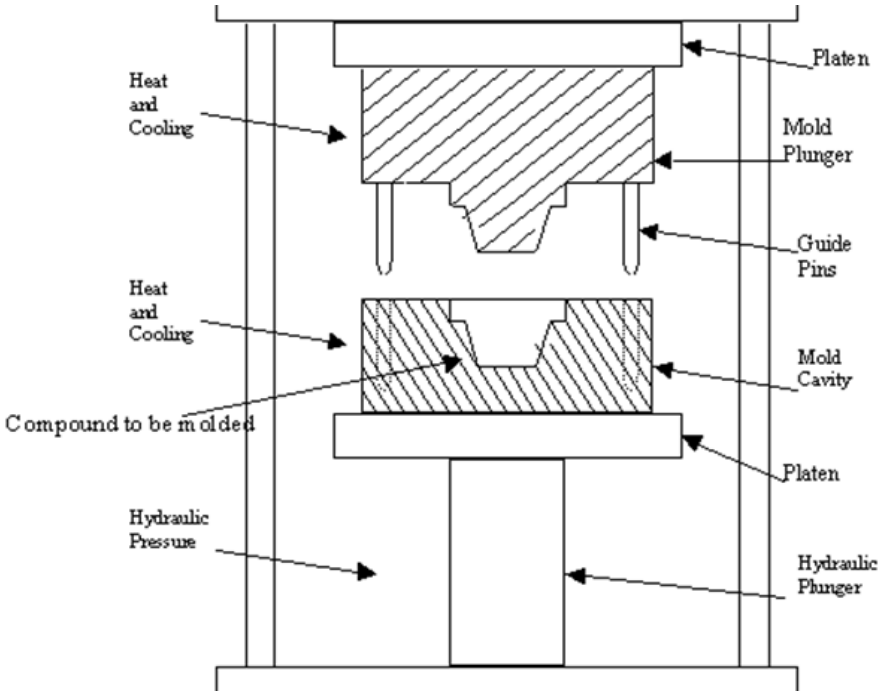
-โลหะ มีข้อดีคือมีสมบัติเชิงกลกลดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้สูง และกระบวนการผลิตช่องทางเดินของแก๊สทำได้ง่าย แต่ก็มีการกัดกร่อนสูง

-โพลิเมอร์ ข้อดีคือน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อนได้สูง ง่ายต่อการขึ้นรูป และมีราคาถูกกว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิดข้างต้นมาก จากคุณสมบัติหรือข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงมีการศึกษานำเอาวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกันเรียกว่า วัสดุ Composite มาสร้างเป็นแผ่นสองขั้ว ซึ่งวัสดุที่ถูกนำมาศึกษาเป็นอย่างมากคือวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยนำมารวมกับ กราไฟต์, คาร์บอน หรือโลหะ เนื่องจากพอลิ-เมอร์ มีราคาถูก น้ำหนักเบา และมีค่าความยืดหยุ่นสูง โดยพอลิเมอร์ที่เลือกมาจะพิจารณาจากคุณสมบัติหลักๆ ดังนี้ คือ

- Density
- Tensile strength
- Flexural modulus
- Water absorption

2.5 กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Plastic processing) [11]

กระบวนการแปรรูปพลาสติกมีด้วยกันหลายชนิด สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการแปรรูปที่เรียกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน นิยมใช้ชิ้นงานจากพลาสติกเทอร์โมเซตชนิดผง (เพราะชนิดเม็ดจะหลอมตัวได้ช้า) ส่วนประกอบหลักการของเครื่องอัดรูป แสดงในรูปที่ 2.9 โดยประกอบด้วยแผ่นเหล็กอัด (plates) จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ โดยแม่พิมพ์หรือเบ้าแต่ละซีกจะติดอยู่กับแผ่นเหล็กอัดแต่ละแผ่น โดยจะมีอุปกรณ์ให้ความร้อนและระบบหล่อเย็นต่อกับแม่แบบ



รูปที่ 2.9 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) [12]

2.6 การบดย่อย [13]

การย่อย หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีทางกล เพื่อให้พลาสติกมีขนาดและรูปร่างเหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปต่อได้ ในการบดย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกันตามความต้องการ เหตุผลที่จำเป็นต้องบดย่อยพลาสติกมีหลายอย่าง เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องจักรแปรรูปได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายได้เร็ว เป็นต้น เครื่องบดย่อยมีหลายชนิดซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก เช่น เครื่องรีดย่อย โม่ตี โม่กวน โม่ตัด โม่แท่งตี และโม่รีด เป็นต้น ลักษณะการทำงานของเครื่องบดย่อยต่างๆ จะแตกต่างกัน เช่น เครื่องรีดย่อยใช้แรงตัด เครื่องโม่ตัดใช้การตัดเฉือน และเครื่องโม่แท่งใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี เครื่องโม่ตัดเป็นเครื่องย่อยที่มีใช้มากในการย่อยพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการย่อยเศษพลาสติกหรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เครื่องโม่ตัดประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มั่นคงมีคมตัดติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่ วัสดุที่จะตัดถูกส่งเข้าทางปล่องด้านบนตรงกลางจะมีเพลาซึ่งมีมีดตัดติดอยู่ 3 เล่ม เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีดหมุนจับและนำไปตัดกับมีดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่อง โดยเครื่องจะทำงานซ้ำๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงออกมาได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องโม่ตัด

2.7 วัสดุที่นำมาสร้างแผ่นสองขั้วในงานวิจัยนี้

2.7.1 แปรงถ่าน (Carbon Brush) [14]

แปรงถ่าน (Carbon Brush) คือตัวสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ หรือเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าบน commutator หรือ slip ring ทำหน้าที่รับแรงดันไฟโดยตรงจากแหล่งจ่าย และจ่ายผ่านไปยัง commutator หรือ slip ring เพื่อใช้ในการต่อให้ครบวงจร คอมมิวเตเตอร์ [14] จะทำหน้าที่ในการสัมผัสกับแปรงถ่านคาร์บอน (Carbon Brushes) ที่อยู่ในมอเตอร์เพื่อที่จะให้มีกระแสไหลผ่านไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเพื่อให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกันกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ อีกทั้งยังราคาถูกกว่าแกรไฟต์ด้วย จากหน้าที่และข้อดีของแปรงถ่าน จึงนำมาศึกษาเป็นวัสดุที่นำมาสร้างแผ่นสองขั้วในงานวิจัยนี้

2.7.2 พอลิคาร์บอเนตเสริมใยคาร์บอน (Stat-kon®)

เป็นพอลิคาร์บอเนตเสริมใยคาร์บอนที่มีชื่อเรียกว่า “Stat-kon®” ซึ่งมีสมบัติทางการค้าดังตารางที่ 2.1

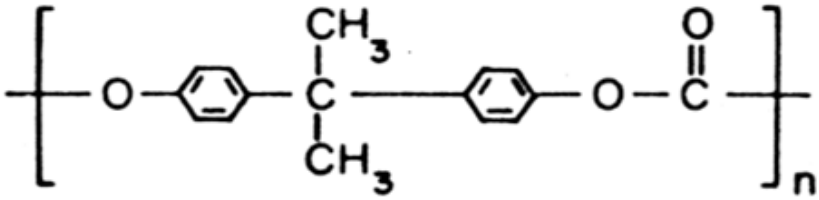
ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของพอลิคาร์บอเนตเสริมใยคาร์บอน (Stat-kon®)

Properties	ค่า	Unit
Tensile stress	113	MPa
Flexural modulus	7580	Mpa
Density	1.26	g/cm^3
Volume resistivity	2×10^0	Ohm-cm

พอลิคาร์บอเนตเสริมใยคาร์บอน (Stat-kon®) จะประกอบด้วยพอลิคาร์บอเนต และใยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งลักษณะทั่วไปของพอลิคาร์บอเนต และใยคาร์บอนมีดังนี้

2.7.2.1 พอลิคาร์บอเนต [15]

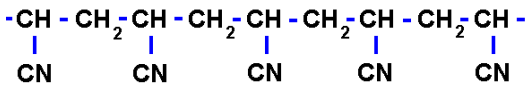
เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งใส และแข็งมาก ต้านทานการขีดข่วนได้ดี จึงมักใช้ทำผลิตภัณฑ์แทนแก้วหรือกระจก สมบัติทั่วไป มีความใสคล้ายกระจก ผสมสีได้ง่าย มีความแข็ง เหนียว และยึดเกาะตัวดีมาก คงรูปดี ทนความร้อนได้สูง ไม่ติดไฟแต่จะทำให้ไฟดับ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิคาร์บอเนต จะมีลักษณะของเรซินทั้งเป็นเม็ดใส เป็นผง และเป็นแผ่น เหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เช่น การฉีดเข้าแม่พิมพ์ หรือเอกซ์ทรูชัน ใช้ทำโคมไฟฟ้า กระจกเลนส์โคมไฟหน้าของรถยนต์ กระจกแว่นตา ภาชนะและขวดพลาสติก ใบพัดเรือ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแสดงโครงสร้างดังรูป 2.10



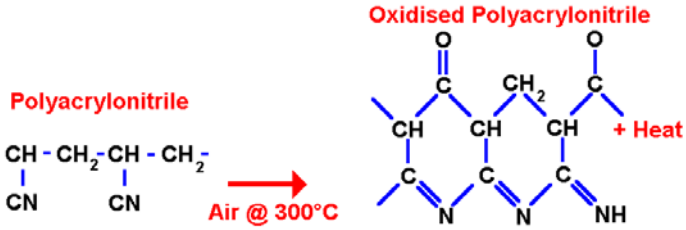
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิคาร์บอเนต [16]

2.7.2.2 ใยคาร์บอน [17]

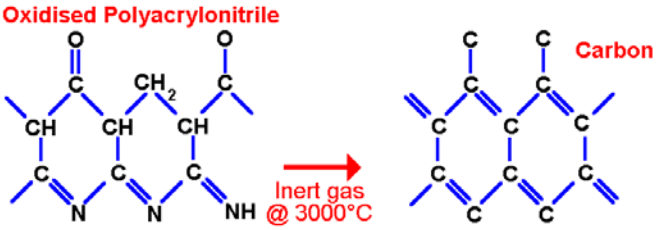
ใยคาร์บอนผลิตมาจากพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymer) เช่น พอลิอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) หรือเรียกย่อๆ ว่า PAN มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลดังรูป 2.11 โดยมีกระบวนการผลิตดังนี้



รูปที่ 2.11 หน่วยพื้นฐานของ PAN [17]



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PAN [17]



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยา carbonization (graphitization) ของ PAN [17]

PAN จะถูกดึงยืดออกในแนวขนานกับแกนของเส้นใย โดยใช้ความร้อน จากนั้นจะผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในอากาศที่อุณหภูมิ 200 - 300°C ดังแสดงในรูป 2.12 เพื่อที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปของพอลิเมอร์ไปสู่รูปของเส้นใย ซึ่งไม่สามารถที่จะหลอมได้ จากนั้นเส้นใยที่ได้นี้จะถูกทำให้ร้อนในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงถึง 1000 - 3000°C ซึ่งในขั้นตอนนี้เรียกว่า Carbonizing จะมีการระเหยของสารผสมต่างๆ ออกไปจนกระทั่งเส้นใยพอลิเมอร์นี้มีส่วนประกอบของคาร์บอน อย่างน้อย 92% ดังแสดงในรูปที่ 2.13

เส้นใยคาร์บอนที่ผลิตได้นี้ จะมีขนาดเล็กและบางมาก โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 - 10 μm หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมมนุษย์ถึง 5 เท่า เส้นใยคาร์บอนเป็นรูปอสัณฐานของคาร์บอน เช่นเดียวกับผงเขม่าดำ และถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี มีความแข็งแรงสูงมาก และเนื่องจากมีสมบัติเป็นอสัณฐาน ทำให้ไม่สามารถอธิบายรูปแบบของโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างได้ชัดเจน แต่จากผลของเอกซ์เรย์ พบว่าโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมของเส้นใยคาร์บอน มีบางส่วนที่เป็นบริเวณเล็กน้อยมากที่เป็นแบบแกรไฟต์ และมีบางส่วนที่ประกอบด้วยริบบิ้น (Ribbon) ของคาร์บอนอะตอมที่จัดเรียงตัวขนานกับแกนของเส้นใย

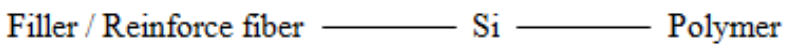
ใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูงมาก (High strength and high stiffness) (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) โดยเส้นใยคาร์บอนมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านโครงสร้าง (Structural applications) และงานด้านไฟฟ้า (Electrical applications)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของใยคาร์บอนกับเหล็กกล้า [18]

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm)	ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) (GPa)	ค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile Modulus) (GPa)	ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) (GPa)
ใยคาร์บอน	1.75	3.5	230.0	2.00
เหล็กกล้า	7.87	1.3	210.0	0.17

2.8 สารประสานคู่ควบ (Coupling agent) [19]

สารประสานคู่ควบจะทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมพอลิเมอร์สารตัวเติมชนิดเสริมแรง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างเฟสทั้งสอง ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น กลไกการเชื่อมประสานของสารประสานคู่ควบ [19] แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์หรือเส้นใยเสริมแรงโดยการใช้สารประสาน [19]

2.8.1 ประโยชน์ของสารประสานคู่ควบ

1) ช่วยพัฒนาความแข็งแรงทางกายภาพและทางเคมีระหว่างสารตัวเติมชนิดเสริมแรงและเมทริกซ์

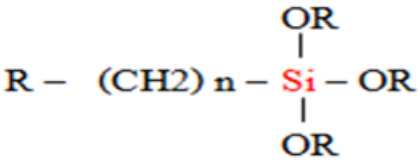
2) ป้องกันผิวของสารตัวเติมจากความชื้น

3) ป้องกันการเสียดสีและรอยแตกของสารตัวเติมระหว่างกระบวนการผสมและการผลิตวัสดุผสม

สารประสานคู่ควบที่นิยมใช้กันมาก คือไซเลน (Silane) โครงสร้างของไซเลนแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยประกอบด้วย 1) อะตอมซิลิกอน (Silicon atom)

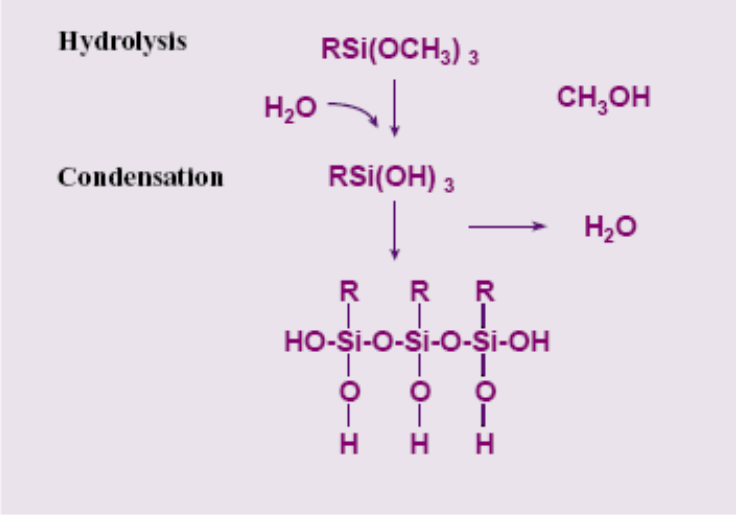
2) หมู่อัลคิลอีเทอร์ (Alkyl ether) 3 หมู่ที่ต่อกับอะตอมซิลิกอน

3) หมู่ทางเคมี (Chemical group) จะต่อกับกลุ่มของอะตอมซิลิกอนและทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่สัมผัสกับหมู่ทางเคมี [19]



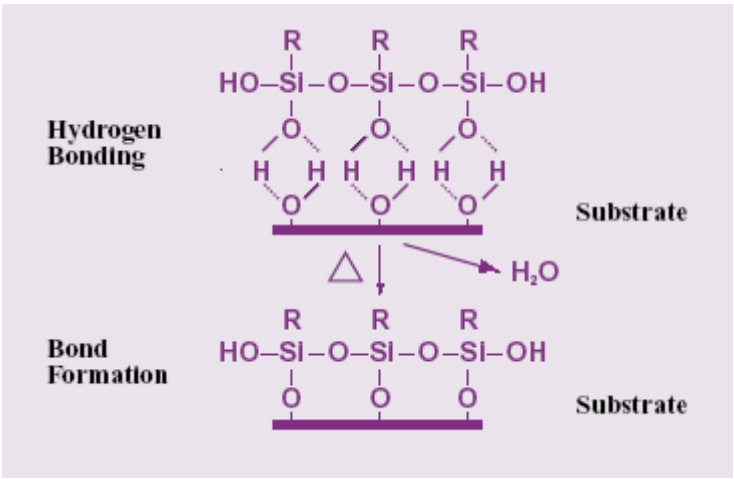
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของไซเลน [19]

ผิวของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงจะถูกเคลือบด้วยไซเลน โดยการเตรียมสารละลายไซเลน ซึ่งเตรียมได้โดยการเติมน้ำลงในไซเลนแล้วจะเกิดการไฮโดรไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การไฮโดรไลซิสของไซเลน [19]

เมื่อจุ่มสารตัวเติมลงในสารละลายไซเลนจะเกิดพันธะเคมี (Si-O-Si), พันธะไฮโดรเจน(H-bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนผิวของสารตัวเติม และเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของ R'-Si $(OH)_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของไซเลนกับสารตัวเติม [19]

เมื่อผสมสารตัวเติมและเมทริกซ์เข้าด้วยกัน หมู่ R' ในไซเลนจะมีหน้าที่ในการเกิดปฏิกิริยากับเมท-ริกซ์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการพิจารณาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แผ่น Bipolar plate นับว่าเป็นอีกส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญมาก จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีผู้คิดค้นเพื่อพัฒนาและปรับปรุงเกี่ยวกับ bipolar plate อย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับแผ่น bipolar plate อยู่มากมายเช่น

ฐิติพร เพชรอุดม และจันทราวรรณ พุ่มชูศักดิ์ [18] ได้ทำการศึกษาพัฒนาการใช้ไบโพลาร์เพลตที่ทำจากพอลิเมอร์คอมโพสิต แทนแผ่นแกรไฟต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม (Polymer Electrolyte Membrane) ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการผลิต ทั้งยังมีน้ำหนักเบา และทนการกัดกร่อนได้ดี งานวิจัยนี้ใช้พอลิคาร์บอเนตเป็นเมทริกซ์ มีแกรไฟต์และผงโลหะเป็นฟิลเลอร์ตัวนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปโดยการอัดเบ้า พบว่าเมื่อใช้พอลิเมอร์และแกรไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้นตามปริมาณแกรไฟต์ และสูงสุดถึง 2.17 S/cm ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ต่อพอลิเมอร์เป็น 70 ต่อ 30

Hermann และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาไบโพลาร์เพลตซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม ไบโพลาร์เพลตมีหน้าที่หลายๆอย่างด้วยกัน เช่น ช่วยดึงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ลดค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า สามารถจัดการน้ำภายในเซลล์ได้ เป็นเชื้อเพลิงและเกิดปฏิกิริยา Oxidant ได้ภายในเซลล์ ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก แต่เนื่องจากไบโพลาร์เพลตมีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้อธิบายการศึกษาวิจัย และพัฒนาเพื่อหาวัตถุดิบที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบของไบโพลาร์เพลต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สรุปเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำโพลาร์เพลตที่มีอยู่ 3 คุณลักษณะคือ 1. โลหะ แยกออกเป็นสองประเภท คือ โลหะที่เคลือบกับไม่เคลือบ 2. วัสดุนำไฟฟ้าที่ไม่ใช่โลหะ เช่น กราไฟต์ เป็นต้น 3.วัตถุผสมระหว่างโพลิเมอร์-คาร์บอนและโพลิเมอร์-โลหะ เพื่อใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มสำหรับการใช้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต

เสาวลักษณ์ และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นแกรไฟต์ ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม โดยศึกษาชนิดของสารตัวเติม (ได้แก่ ฟีนอลิกโมดิฟายด์ แอลคิลเรซิน และโพลีเอสเทอร์เรซิน) และอัตราส่วนของผงแกรไฟต์กับสารตัวเติม และขึ้นรูปงานด้วยเครื่องกดอัด ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 140 kg/cm^2 เป็นเวลา 20 นาที ผลการทดลองพบว่าโพลีเอสเทอร์เรซินสามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ ได้ดีกว่าฟีนอลิกโมดิฟายด์ แอลคิลเรซิน โดยผสมผงแกรไฟต์ได้มากถึง 66% เมื่อทดสอบค่าการนำไฟฟ้าที่ปริมาณผงแกรไฟต์เท่ากัน พบว่าโพลีเอสเทอร์เรซินจะให้ค่าการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟีนอลิกโมดิฟายด์ แอลคิลเรซิน และปริมาณของผงแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลน้อยมาก

กับการใช้ฟีนอลิกโมดิฟายด์ แอลคิลเรซิน ซึ่งตรงข้ามกับโพลีเอสเทอร์เรซิน โดยค่าการนำไฟฟ้ามากสุดของโพลีเอสเทอร์เรซิน ได้ 4.524 S/cm ที่ผงแกรไฟต์ 66% โดยน้ำหนัก

Lee และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาไบโพลาร์เพลตที่เป็นส่วนประกอบในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม โดยใช้วัสดุ graphite composite ผสมกับ Epoxy resin ที่สร้างจากการกระบวนการ Compression molding โดยศึกษาสัดส่วนการผสมต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิในกระบวนการผลิต เพื่อทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง, surface properties, contact angle และ surface roughness

Kuan และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาเพื่อดูผลของ ปริมาณ graphite และขนาดของผง graphite ที่มีต่อคุณสมบัติด้าน electrical, physical, mechanical และ thermal ของ Composite bipolar plate โดยการใช้ Graphite/Vinyl ester resin เป็น composite material และขึ้นรูป bipolar plate ด้วยกระบวนการ Bulk-molding compound ซึ่งในการทดลองจะปรับเปลี่ยนปริมาณ graphite (60 wt% ถึง 80 wt%) และขนาดเม็ดผง graphite (1000-177, 177-125, 125-74, 74-53, น้อยกว่า 53 μm) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ graphite ความหนาแน่นของ composite plate จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้น้ำหนักของ fuel cell stack สูงขึ้น และเมื่อลดขนาดของเม็ดผง graphite ความหนาแน่นของ composite plate จะลดลง แต่ทำให้เกิดช่องว่างใน composite plate โดยปริมาณ graphite ที่สูงสุดที่เติมได้คือ 80%wt นอกจากนี้ยังพบว่าค่า electrical resistance ของ composite plate จะลดลง เมื่อปริมาณ graphite และขนาดของเม็ดผง graphite เพิ่มขึ้น นั่นคือนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น และค่า thermal expansion ของ composite plate จะลดลง ในขณะที่ค่า oxygen permeability ของ composite plate จะเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อขนาดของเม็ดผง graphite น้อยกว่า 53 μm ค่า oxygen permeability จะมีค่าสูงถึง 3.28×10^{-5} cm^3/cm^2 ส่วนค่า Flexural strength และ flexural modulus จะลดลง เมื่อปริมาณ graphite เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า electrical resistance และ oxygen permeability ของ composite plate สามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณ graphite เท่ากับ 75% และขนาดเม็ดผง graphite ในช่วง 1000 - 177 μm จะได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด

สราณีย์ ชิ้มประเสริฐ และคณะ [23] ศึกษาการเตรียมแผ่นไบโพลาร์เพลตจากคาร์บอนคอมโพสิตผสมพอลิอะนิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมพอสิต โดยศึกษาผลขององค์ประกอบของคาร์บอนคอมพอสิตที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้า ได้แก่ ชนิดของคาร์บอน (RGN, BDH, ผงแปรงถ่าน) , อัตราส่วนของคาร์บอนต่อสารตัวเติม, ปริมาณของพอลิอะนิลีน และการปรับปรุงพื้นผิวของผงแปรงถ่านด้วยกรดก่อนนำไปขึ้นรูป ส่วนผสมคาร์บอนคอมโพสิตที่เตรียมได้นำไปขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180°C ความดัน 140 kg/cm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อสารตัวเติม เป็น 70 : 30 คาร์บอนชนิด BDH และผงแปรงถ่านให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ค่า 11.9 S/cm ซึ่งสูงกว่าคาร์บอนชนิด RGN ใน

การศึกษานี้เลือกใช้ผงแปรงถ่านเนื่องจากมีราคาถูกกว่าคาร์บอนชนิด BDH เมื่อปริมาณคาร์บอนต่อสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเติมพอลิอะนิลีนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานลดลงเนื่องจากปริมาณผงแปรงถ่านที่ใช้ลดลง และการปรับปรุงพื้นผิวของผงแปรงถ่านด้วยกรดก่อนนำไปเตรียมแผ่นคอมโพสิต ทำให้ชิ้นงานมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

Yin และคณะ [24] ได้ศึกษาค่าของ Electrical conductive composite material ระหว่าง Phenol formaldehyde resin powder กับ graphite powder ของไบโพลาร์เพลต โดยใช้ hot pressure molding เพื่อศึกษาผลของสัดส่วน Phenol formaldehyde resin powder, เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปที่มีต่อค่า bending strength ของ composite ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Phenol formaldehyde resin powder ทำให้ค่า bending strength เพิ่มขึ้น แต่ค่า electrical conductivity จะลดลง โดยค่า electrical conductivity จะแปรตามค่า bending strength นอกจากนี้ยังศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูปซึ่งให้ผลเช่นเดียวกัน การทดลองนี้ค่า electrical conductivity และค่า bending strength ที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 142 S/cm และ 61.6 MPa ตามลำดับ เมื่อใช้ Phenol formaldehyde resin powder 15% โดยใช้เวลาขึ้นรูป 60 นาที และอุณหภูมิ 240 ^{o}C

จากงานวิจัยที่กล่าวมาจะพบว่า ปัญหาที่สำคัญก็คือไบโพลาร์เพลตมีน้ำหนักมาก เนื่องจากแกรไฟต์มีน้ำหนักและราคาสูง จากงานวิจัยต่างๆ จึงได้ใช้ composite material เช่น Vinyl ester resin, Epoxy resin, Phenol formaldehyde เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาน้ำหนักและราคาสูงดังกล่าว แต่การใช้วัสดุ composite material ที่มีน้ำหนักเบา ก็จะทำให้ค่า electrical conductivity ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาและทำความเข้าใจตลอดจนหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งถือเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้ นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการผสมวัสดุคอมโพสิตโดยใช้สารละลาย (Solution blending) เพื่อช่วยให้ composite material มีความเข้ากัน (Homogeneity) อีกทั้งยังใช้สารเติมแต่งจำพวกไซเลนเพื่อเพิ่มสมบัติความแข็งแรง และเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น