

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 คอมโพสิต (Composites) [18]

คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base materials) อย่าง โลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความสมบัติโดยรวมดีกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

พอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer matrix composites- PMC's) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ง่ายของคอมโพสิตกลุ่มนี้คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก “ไฟเบอร์กลาส” ต่าง ๆ พอลิเมอร์คอมโพสิตมีพอลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น

เซรามิกคอมโพสิต (ceramic matrix composites- CMC's คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราช เหล็กเส้น) เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ขณะที่วัสดุเซรามิกคอมโพสิตรุ่นหน้า (advanced composite) มีเนื้อหลักเป็นเซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

โลหะคอมโพสิต (metal matrix composites- MMC's) คอมโพสิตกลุ่มนี้พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ โลหะคอมโพสิตมีโลหะเป็นเนื้อหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น สำหรับวัสดุเสริมแรงของคอมโพสิตกลุ่มนี้เป็นวัสดุเซรามิก เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ และกลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

แม้ว่าคอมโพสิตมีขอบข่ายกว้างครอบคลุมวัสดุ 3 ประเภทข้างต้น แต่ในที่นี้ขอพูดถึงเฉพาะพอลิเมอร์คอมโพสิตเท่านั้น

พอลิเมอร์บางชนิด เช่น อีพอกซี และพอลิเอสเตอร์มักมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีความแข็งแรงเชิงกลต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ เป็นต้น แต่พอลิเมอร์มีจุดเด่นเรื่องขึ้นรูปง่าย สามารถขึ้นรูปทรงที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ง่าย และมีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่นต่ำ) ขณะที่วัสดุเช่น แก้ว อะรามิด (aramide) และ โบรอน (boron) มีจุดเด่นเรื่องความ

แข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงต่อแรงกด (compressive strength) สูง แต่ว่าวัสดุที่กล่าวมานั้นเมื่อปรากฏในรูปของ “ของแข็ง” แล้ว สมบัติเด่นเหล่านี้ปรากฏออกมาได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากวัสดุสามารถแตกหักจากความเค้น (stress) ได้ง่ายเพียงแค่ผิวของวัสดุมีรอยตำหนิขนาดเล็กเท่านั้น หรือเรียกว่าเป็นวัสดุที่ไวต่อรอยบาก (crack sensitive)

ดังนั้นการผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนจะทำให้วัสดุมีสมบัติดีขึ้น เพราะเป็นการรวมเอาจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์กับจุดเด่นของเส้นใยเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน โดยเนื้อหลักของพอลิเมอร์ทำหน้าที่กระจายแรงที่กระทำต่อวัสดุและส่งถ่ายแรงกระทำไปยังเส้นใย จึงมีสมบัติในการรับแรงกระทำได้สูงกว่า และพอลิเมอร์ยังทำหน้าที่ปกป้องเส้นใยไม่ให้เสียหายเนื่องจากการเสียดสีและการกระแทก ผลของการรวมพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรงทำให้วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมีจุดเด่นหลายอย่าง ได้แก่ มีค่าความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) สูง สามารถขึ้นรูปง่าย น้ำหนักเบา และทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

### 2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต [18]

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตมีหลายปัจจัยด้วยกัน ดังนี้

1. สมบัติของเส้นใยเสริมแรง
2. สมบัติของพอลิเมอร์ (เรซิน)

3. สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fibre Volume Fraction – FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อพอลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัป (hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

4. การจัดเรียงตัว (orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

### 2.1.2 เมทริกซ์ [19]

เมทริกซ์เป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (Continuous phase) ซึ่งเป็นตัวกลางให้เส้นใยหรืออนุภาคเกิดการกระจายตัว และช่วยถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมมายังเส้นใยหรืออนุภาค

#### หน้าที่ของเมทริกซ์ มีดังนี้

1. ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
2. ป้องกันไม่ให้เส้นใยเกิดความเสียหายอันเนื่องจากสิ่งแวดล้อม
3. ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใย
4. กำหนดรูปร่างของวัสดุ
5. เชื่อมต่อกับตัวเสริมแรง

สำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

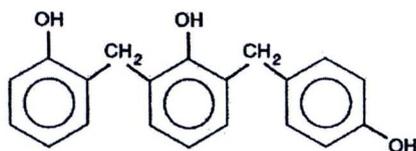
#### 2.1.2.1 เทอร์มอเซต (thermoset)

เทอร์มอเซตที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ได้แก่ ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ อีพอกซี พอลิยูรีเทน ซิลิโคน พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์มอเซตเรซินที่เหลวเริ่มแข็งตัว จะเกิดการเชื่อมโยงกันขึ้น ทำให้เกิดโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง [20-21]

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง โดยเกิดการเชื่อมโยง (cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย แต่ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมเกิดการสลายตัว และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์มอเซตที่นำมาผลิตเป็นไบโพลาร์เพลตนิยมใช้ไวนิลเอสเทอร์ ซึ่งในระหว่างการผลิตจะมีความหนืดต่ำจึงสามารถเติมสารตัวเติมตัวนำไฟฟ้าได้ในปริมาณสูง เทอร์มอเซตจะมีความแข็งแรง ในขั้นตอนการผลิตจึงอาศัยเฉพาะความร้อนและรอให้เกิดการแข็งตัว ซึ่งต่างจาก เทอร์มอพลาสติก ที่ต้องทำให้เย็นตัวลงเพื่อให้เกิดผลึก (crystallization) แต่ข้อเสียของเทอร์มอเซตคือ ต้องใช้เวลาแข็งตัวนานและมักจะเปราะ [7]

ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ดังรูป 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างฟีนอลหรือของผสมของฟีนอล (เช่น cresols) และ resosinol และฟอร์มัลดีไฮด์แต่ผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่สำคัญที่สุดได้แก่ พอลิเมอร์ของฟีนอลเองและฟอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหเป็นเทอร์มอเซต มีสมบัติแข็งแรงมาก ไม่ยืดหยุ่น ไม่หลอมและไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆทั้งสิ้น พอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมตัวฟิลเลอร์ มีสมบัติไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นพอลิเมอร์นี้เมื่อนำไปใช้ประโยชน์จะมีการเติมตัวเติมฟิลเลอร์เสมอ การเติมตัวฟิลเลอร์ไม่เพียงแต่ทำให้สมบัติการใช้งานดีขึ้น ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วย พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถทนทานต่อความร้อนได้เป็นอย่างดี (ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักแม้กระทั่งให้ความร้อนสูงถึง 200°C) สามารถคงรูปได้ดีมากและเฉื่อยต่อสารเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเมอร์นี้เป็นพอลิเมอร์ที่มีสภาพขี้ สบับติการเป็นฉนวนไฟฟ้าไม่ดีเท่าที่ควร [22]



รูป 2.1 สูตร โครงสร้างทางเคมีของ Novolac [20]

### 2.1.2.2 เทอร์มอพลาสติก (thermoplastic)

เทอร์มอพลาสติกมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นอิสระต่อกัน เมื่อให้ความร้อนสามารถหลอมเหลวได้ และแข็งตัวเมื่อเย็นลง สามารถหลอมและแข็งตัวได้หลายๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เทอร์มอพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับสมบัติของมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุล ตัวอย่างเทอร์มอพลาสติกที่นิยมใช้ เช่น พอลิสไตรีน พอลิพอฟิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น[24]

### 2.1.3 สารตัวเติม [25]

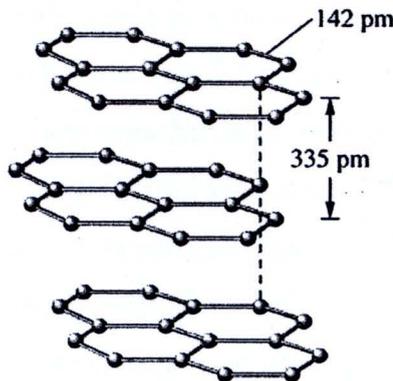
สารตัวเติมจะอยู่ในสภาพของแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากพอลิเมอร์ ปกติมักเป็นสารประเภทอนินทรีย์ มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เช่น ในยาง มักมีการเติมสารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ตัวอย่างของสารตัวเต็มที่นำไฟฟ้าและสารตัวเต็มที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตที่นำไฟฟ้าได้แก่

### 2.1.3.1 แกรไฟต์ (Graphite) [26, 27]

แกรไฟต์มีสีดำเทา มีค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนสูงมาก มีความหนาแน่น  $2.1 \text{ g/cm}^3$  จะตกผลึกในรูปชั้นโครงสร้างหกเหลี่ยม (hexagonal) ดังรูป 2.2 ภายในระนาบพื้นอะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันได้ดี ส่วนระหว่างชั้นต่างๆ (layer lattice) กลับมีการยึดเหนี่ยวไม่ดี (slip ได้) เนื่องจากแนววาเลนซ์และแนวการนำไฟฟ้าเยื้องกัน (overlap) เล็กน้อย แกรไฟต์มีการนำไฟฟ้าเพราะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแต่ละระนาบ โดยอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามแกรไฟต์นำไฟฟ้าได้ระนาบเดียวเท่านั้น

ในผลึกชนิดหลายผลึก (poly-crystal) ของแกรไฟต์ ที่เป็นควอซีไอโซทรอปิก (quasiisotropic) จะปรากฏแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) โดยธรรมชาติให้เห็นน้อยมาก แกรไฟต์จะมีเม็ดเกรนละเอียดให้สมบัติสม่ำเสมอกว่าแกรไฟต์เม็ดเกรนหยาบ ในชั้นโครงสร้างอะตอมของแกรไฟต์จะมีอะตอมคาร์บอนไม่หนาแน่นเหมือนกับของเพชร แกรไฟต์จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าเพชร ค่าความเค้น ความแข็ง โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ก็น้อยกว่าเพชรมาก แต่แกรไฟต์ทนความร้อนได้ดีกว่าเพชร การยึดเหนี่ยวของโครงสร้างอะตอมแกรไฟต์จะเกิดขึ้นที่  $4000^\circ\text{C}$  จากรูป 2.2 ที่ความดันต่ำแกรไฟต์จะแยกตัวออกจากกันหรือเกิดเป็นเขม่า ชั้นโครงสร้างอะตอมของแกรไฟต์สามารถเลื่อนไหล (slip) ในขณะที่รับภาระเฉือนได้ง่าย แกรไฟต์จึงเป็นสารหล่อลื่นแข็งให้การสัมผัสกันคู่ของวัสดุได้ดี เนื่องจากทนความร้อนและสารเคมีได้ดี จึงมีการนำแกรไฟต์มาทำพื้นเบ้าหล่อโลหะ



รูป 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ [27]



### 2.1.3.2 แกรไฟต์ขยาย (Expanded graphite) [12]

แกรไฟต์ขยาย ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธี chemical intercalation ของแกรไฟต์ธรรมชาติ และการขยายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง แกรไฟต์ขยายเป็น modified graphite ที่มีช่องว่างภายในอยู่ในช่วง 20-50 nm ซึ่งช่องว่างในชั้นของแกรไฟต์ขยาย จะเพิ่มขึ้นในช่วง 0.335-0.8 nm โดยประมาณ โดยโครงสร้างของแกรไฟต์ขยายยังคงเหมือนแกรไฟต์ธรรมชาติ แต่มีช่องว่างภายในที่ใหญ่กว่า แกรไฟต์ขยายใช้เป็นสารตัวเติมนำไฟฟ้า เนื่องจากแกรไฟต์ขยายมีสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่ดี แกรไฟต์ขยายมีความหนาแน่น (0.01-0.015 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) น้อยกว่าแกรไฟต์ (2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นแกรไฟต์ขยายจึงเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งสำหรับพัฒนาคอมโพสิตไบโพลาร์เพลด

### 2.1.3.3 ผงเขม่าดำ (Carbon black) [7, 28, 29]

ผงเขม่าดำแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมี ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวหน้า เคมีผิวหน้า ความพรุน (porosity) และความแรงของสี (color strength) ไม่เท่ากัน ขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลงสีจะยิ่งดำมากขึ้น นอกจากนี้ การกระจายตัวในพอลิเมอร์ยังทำได้ยากขึ้นด้วย ผงเขม่าดำเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้า (conductor material) ดังนั้น การใส่ผงเขม่าดำในพอลิเมอร์ นอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้ว ยังช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า โดยผงเขม่าดำชนิดที่มีอนุภาคที่ละเอียด จะเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้พอลิเมอร์ได้ดีกว่าชนิดที่มีอนุภาคหยาบ นอกจากนี้ ผงเขม่าดำยังมีความสามารถในการดูดกลืนแสงยูวีได้ดี ดังนั้น จึงช่วยป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์จากแสงยูวีได้ด้วย

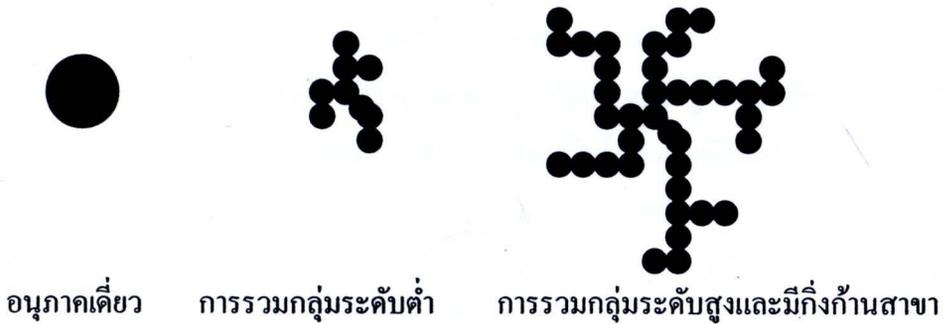
ผงเขม่าดำเตรียมได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน ที่นิยมใช้มีอยู่สามชนิด คือ แชนเนลแบล็ค (channel black) เฟอร์เนซแบล็ค (furnace black) และเทอร์มอลแบล็ค (thermal black) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีกรรมวิธีในการผลิตแตกต่างกัน โดยมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของผงเขม่าดำที่ผลิตขึ้นและจำหน่ายจะเป็นชนิดเฟอร์เนซแบล็ค ซึ่งมักจะมีขนาดอนุภาคในช่วง 5-100 นาโนเมตร

เฟอร์เนซแบล็คเตรียมได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอย (atomized mineral oils) ในเตาอิฐ โดยควบคุมปริมาณอากาศที่ผ่านเข้าไปในเตาให้น้อยที่สุด โดยวิธีนี้จะได้ผงเขม่าดำที่มีโครงสร้างระดับสูง มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น นำไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ยาง และเป็นสารให้สี ส่วนผงเขม่าดำที่ได้จากเทอร์มอลแบล็คจะได้ผงเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ (300 นาโนเมตร) นำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในยางรถยนต์

ผงเขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอน 90-99 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 0.1-10 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 0.2-1 เปอร์เซ็นต์ ซัลเฟอร์และซีลีเนียมปริมาณเล็กน้อย มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.04-

2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีลักษณะของโครงสร้างดังรูป 2.3



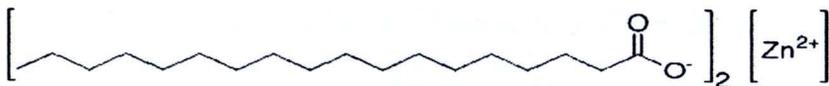


รูป 2.3 โครงสร้างของผงเขม่าดำ [29]

ตัวอย่างของสารตัวเติมอื่นๆ ได้แก่

2.1.3.4 ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) [53]

พลาสติกที่นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนมากจะต้องมีการเติมสารหรือสารเติมแต่ง เช่น สี สารตัวเติม พลาสติกไซเซอร์ สารป้องกันออกซิเดชัน และสารหล่อลื่น เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้พลาสติก มีสมบัติตามที่ต้องการและมีสีสม่ำเสมอ ในการเติมสารต่าง ๆ ลงในพลาสติกส่วนใหญ่จะเกิดปัญหา 2 ประการ คือ เกิดการฟุ้ง และการกระจายตัวไม่ดี ซึ่งจะมีผลต่อเนื่อง ในด้านอื่น ๆ อีกมาก เช่น เกิดความร้อนจากการเสียดสีทำให้พลาสติกสลายตัวหรือเกิดความฝืดมากต้องใช้กำลังหมุนสกรูสูง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและอาจทำให้การกระจายตัวของสารไม่ดีเท่าที่ควร เช่น สีไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่ผู้ผลิต การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยใช้สารหล่อลื่นช่วยลดความฝืดภายใน และความฝืดภายนอก สารหล่อลื่นส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ บางชนิดได้มาจากธรรมชาติ เช่น ขี้ผึ้ง ไขมันจากพืชและสัตว์ บางชนิดได้มาจากการสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สารหล่อลื่นกึ่งสังเคราะห์จะได้มาจากการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติมาผ่านกระบวนการทางเคมี เช่น การนำกรดไขมันทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ หรือโลหะไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้เกลือโลหะของกรดไขมัน การทำปฏิกิริยาของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ให้เป็นเอสเทอร์

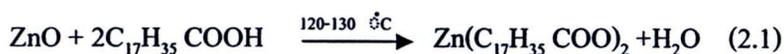


รูป 2.4 โครงสร้างเคมีของซิงค์สเตียเรต [52]

ซิงค์สเตียเรตจัดเป็นสารหล่อลื่นชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กับพลาสติก บางครั้งเรียกว่า ซิงค์โซฟ (Zinc soap) มีสูตรโมเลกุล คือ  $\text{Zn}(\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO})_2$  มีลักษณะโครงสร้างดังรูป 2.4 ซิงค์สเตียเรตมี

ลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายแป้ง และไม่ละลายน้ำ มีความสามารถในการหล่อลื่นสูงกว่าเมทัลโซฟ (metal soap) ที่มาจากกรดสเตียริกด้วยกัน ซิงค์สเตียเรตที่มีขายอยู่ในรูปผงละเอียด และอาจมีสบู่มากกว่า 30 เกรดที่แตกต่างกัน ซิงค์สเตียเรตทางการค้าจะไม่ใช้ซิงค์สเตียเรตที่บริสุทธิ์ เนื่องจากกรดสเตียริกทางการค้าประกอบด้วยกรดพาล์มมิก ประมาณ 30-60%

การเตรียมซิงค์สเตียเรต สามารถทำได้โดยกระบวนการหลอมเหลวและกระบวนการตกตะกอน ในวิธีแรก กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์จะถูกนำมาหลอมรวมกันที่อุณหภูมิประมาณ 120-130 °C ดังสมการ (2.1)



กระบวนการหลอมเหลวนี้อาจใช้ความร้อนจากภายนอกถึงปฏิกิริยาเหล็กกล้าไร้สนิมและการกวนที่ค่อนข้างรุนแรงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซิงค์สเตียเรตที่ได้โดยวิธีนี้มีกรดไขมันอิสระหลงเหลืออยู่มากกว่าที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนและมีเนื้อแน่นกว่า มีสีที่เข้มกว่า และทำการบดเป็นผงได้ยากกว่า ส่วนการเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนจะใช้วัตถุดิบ คือ คอสติคโซดา กรดสเตียริกและเกลือสังกะสีที่ละลายน้ำ คือ ซิงค์ซัลเฟต

กระบวนการตกตะกอนประกอบด้วยปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนคือ  
ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมอัลคาไลน์โซฟ โดยปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับคอสติคโซดา ดังสมการ (2.2)



ขั้นตอนที่ 2 การตกตะกอนโซเดียมสเตียเรตด้วยซิงค์ซัลเฟต ดังสมการ (2.3)



#### 2.1.4 สารเสริมแรง [30]

เป็นสารที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ มีรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้สารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตได้แก่ เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (aramid fiber) และเส้นใยธรรมชาติ (natural fiber)

หน้าที่ของสารเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

- เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม

- สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมได้ ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการบิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้น ๆ โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย

ตัวอย่างของสารเสริมแรง ได้แก่

#### 2.1.4.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) [9, 45]

ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นเซรามิกชนิดหนึ่ง มีสูตรเคมีคือ SiC มีความแข็งสูง มีสภาพนำความร้อนได้ดี มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 1,000°C ดียิ่งกว่าอะลูมินา มีมอดูลัสยืดหยุ่น 410 GPa แม้ที่ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1,600°C ความแข็งแรงก็ไม่ลดลง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความร้อนอย่างฉับพลันดีมาก อีกทั้งยังไม่ทำปฏิกิริยากับกรด ซึ่งอาจใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน วัสดุกึ่งตัวนำจะมีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น) และวัสดุสำหรับการขัด ใช้เป็นวัสดุทนไฟและการกัดกร่อน เกิดขึ้นในเตาหลอมที่มีปิโตรเลียมโค้กและซิลิกาอยู่และทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 2,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของซิลิกอนคาร์ไบด์ ได้แก่ สามารถทนความร้อนและสารเคมีได้ดี (high refractories and high chemical stability) มีการนำความร้อนสูง (high thermal conductivity) จึงได้มีการนำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์ ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติแต่เป็นสารที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมาใช้โดยปกติแล้วซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์เมื่อแบ่งตามโครงสร้างจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ  $\alpha$ -SiC เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่รูปผลึกเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) และ  $\beta$ -SiC เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่รูปผลึกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (cubic) การเตรียมซิลิกอนคาร์ไบด์มีอยู่หลายวิธีดังนี้

#### การเตรียม $\beta$ -SiC

1. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างซิลิกอนกับคาร์บอนดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



การเตรียมโดยวิธีการนี้จะมีการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา ตั้งแต่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 1,400°C ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จะอยู่ในรูป  $\beta$ -SiC ที่มีลักษณะเป็นก้อนหยาบๆ มองดูมีลักษณะคล้ายกับว่ายังคงมีโลหะซิลิกอนเหลืออยู่

2. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชัน ระหว่างซิลิกากับคาร์บอน (carbon thermal reduction of silica) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



การเตรียมโดยวิธีการนี้จะใช้ซิลิกาและคาร์บอนที่มีราคาไม่แพงมากนักเป็นสารตั้งต้นในการเตรียม โดยปกติแล้วซิลิกาที่ใช้จะเป็นทรายหรือควอตซ์ (quartz) และคาร์บอนที่ใช้จะเป็น

คาร์บอนแบล็ค (carbon black) ปิโตรเลียมโค้ก (petroleum coke) หรือผงแกรไฟต์ (graphite powder) โดยที่ซิลิกาและคาร์บอนจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1,050°C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 1,500 ถึง 1,900 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จะอยู่ในรูปของ  $\beta$ -SiC

3. เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในสภาวะไอ (vapor phase reaction of chemical vapor deposition, CVD) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride,  $\text{SiCl}_4$ ) ที่อยู่ในสภาวะไอทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (methane) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



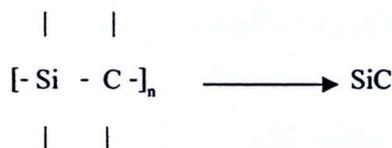
หรือเตรียมได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิกอนไตรคลอไรด์ (methyl silicon trichloride) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



การเตรียมโดยวิธีนี้ถ้าใช้สารตั้งต้นในการเตรียมที่มีความบริสุทธิ์สูง จะทำให้ได้ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วย แต่อย่างไรก็ตามผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้ อาจมีการยึดติดกันเป็นก้อน ทำให้มีการดูดซับเฮลคลอริน (chlorine) หรือกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) เอาไว้ได้ ดังนั้นจึงต้องนำเอาผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้ไปเผาเพื่อไล่เฮลคลอรินออกไปก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

4. เตรียมโดยวิธี gas evaporation การเตรียมโดยวิธีนี้จะได้จากการทำ arc discharge ระหว่างซิลิกอนกับคาร์บอนทำให้ได้  $\beta$ -SiC ที่มีขนาดละเอียดมากคือมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

5. เตรียมได้จากการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่เป็น organosilicic polymers โดยใช้ความร้อน (thermaldecomposition of organosilicic polymers) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ polycarbosilane หรือพอลิเมอร์อื่นๆ ที่มีโครงสร้างคล้ายกัน นำไปสลายตัวโดยใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศ non-oxidizing ทำให้ได้ผง  $\beta$ -SiC ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



### การเตรียม $\alpha$ - SiC

วิธีการเตรียม  $\alpha$  - SiC เตรียมได้ต่อจากปฏิกิริยาการเตรียม  $\alpha$  - SiC จากวิธีการทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างซิลิกอนกับคาร์บอน ดังนี้



เมื่อได้  $\beta$  - SiC โดยที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นจะเกิดอุณหภูมิ 1,500 – 1,900 °C จนอุณหภูมิถึง 2,100 °C  $\beta$  - SiC ที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็น  $\alpha$  - SiC จนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงถึง 2,400 °C การเปลี่ยนจาก  $\beta$  - SiC ไปเป็น  $\alpha$  - SiC จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ซึ่ง  $\alpha$  - SiC นี้จะทนต่อการขัดสีได้ดี

ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ ใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกต่างๆ เช่น ใช้ทำหัวสำหรับพ่นไอร้อนที่ใช้ในการขับเคลื่อนจรวด เบ้าหลอมโลหะ ตัวต้านทานไฟฟ้า ส่วนประกอบต่างๆ ในเตาเผาและอื่นๆ จากคุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ในการนำไปพัฒนาทำเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟและเซรามิกต่างๆ มากมาย จึงทำให้สามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ออกเป็นประเภทต่างๆ ตามกรรมวิธีการผลิตในการยึดติดกันเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดติดกันเป็นรูปร่างด้วยตัวของมันเอง (self-bonded silicon carbide) ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ประเภทนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1 การยึดติดกันโดยวิธีการตกผลึกใหม่ของซิลิกอนคาร์ไบด์ (recrystallized silicon carbide) วิธีการนี้จะนำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปขึ้นรูปจากนั้นนำไปตกผลึกใหม่ (recrystallized) ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้สูง และทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดีมาก

1.2 การยึดติดกันโดยวิธีการเผาผลึก (sintered) ซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยวิธีการนี้จะนำซิลิกอนคาร์ไบด์ ไปเผาให้เนื้อเกิดการผนึกกันที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่จะมีการเติมสารที่ช่วยในการผนึกลงไปด้วย วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูง (high strength) และสามารถทำให้มีสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ตามที่ต้องการได้

2. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดโดยใช้ความร้อน (hot pressed silicon carbide) ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เตรียมได้โดยการอัดภายใต้ความดันประมาณ 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 2,000 ถึง 2,560 °C จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อผนึกแน่น (high dense sintered bodies) นอกจากนี้ในบางครั้งยังมีการเติมสารอื่นๆ ลงไปอีกเล็กน้อยเพื่อทำให้เนื้อแน่นขึ้น

การขึ้นรูปโดยวิธีการนี้จะมีข้อจำกัด คือ จะขึ้นรูปได้เฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างธรรมดาไม่สลับซับซ้อน

3. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดด้วยแกรไฟต์ ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้อนุภาคของแกรไฟต์จะกระจายตัวอยู่ในช่องระหว่างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ทำให้มีการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ทำให้เหมาะสำหรับการเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์จำพวกที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้แก่ rocket nose cone และ nozzles

4. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดติดกันโดยใช้ดินเป็นตัวยึด (claybonded silicon carbide) ผลิตภัณฑ์ที่ยึดติดกันโดยวิธีการนี้ เป็นวิธีการที่ถูกออกแบบมาใช้กับเตาเผามาเป็นเวลานานแล้ว ได้แก่ การทำอิฐทนไฟที่ใช้กับเตาเผา ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะมี ความแข็งแรงสูง ทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี และทนต่อตะกรันโลหะได้ดี (slag resistance)

5. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดติดกันโดยสารประกอบซิลิเกต (silicate-bond silicon carbide) วิธีการยึดติดกันด้วยสารประกอบซิลิเกตนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เนื้อของซิลิกอนคาร์ไบด์ผนึกอยู่ด้วยกันได้ที่อุณหภูมิต่ำ

6. ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดติดกันโดยซิลิกอนไนไตรด์ (silicon nitride, SiN) วิธีนี้เป็นกรรมวิธีที่ปรับปรุงขึ้นมา เพื่อให้เนื้อซิลิกอนคาร์ไบด์ยึดติดกันได้ดีกว่าวิธีการยึดติดกันด้วยสารประกอบซิลิเกต ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิได้สูงกว่า แต่มีความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (resistance to thermal shock) ได้น้อยกว่า และทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ต่ำกว่าวิธีการยึดติดกันด้วยตัวของมันเอง

จากกรรมวิธีการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ของซิลิกอนคาร์ไบด์ตามที่กล่าวมาแล้วในการนำเอาผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไปใช้งานนั้น ยังมีปัจจัยอื่นอีกหลายประการที่มีผลต่ออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ของซิลิกอนคาร์ไบด์เหล่านั้น เช่น การใช้งานหรือการเก็บผลิตภัณฑ์เหล่านั้นไว้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน (oxygen) จะพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถถูกออกซิไดส์ที่ละน้อย มีผลทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์เปลี่ยนไปเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ดังนี้



การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จะพบได้มากในผลิตภัณฑ์ของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้ทำ เป็นแท่งให้ความร้อน (heating element) ซึ่งจะพบว่าเมื่อใช้งานไปนานๆ หรือแม้แต่เก็บไว้ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนนาน ๆ จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเรื่อย ทำให้อายุการใช้งานของแท่งให้ความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้นอย่างไรก็ดีนอกจากออกซิเจนแล้วความชื้นและกรดไฮโดรฟลูออริก

(hydrofluoric acid) ก็มีผลต่ออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ กล่าวคือ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ และมีน้ำหรือไอน้ำอยู่ในบรรยากาศนั้น จะพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกออกซิไดส์ได้ดังนี้

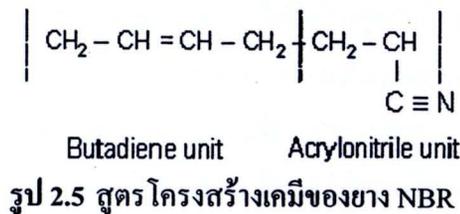


ส่วนกรดไฮโดรฟลูออริกนั้นพบว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกออกซิไดส์ไปเป็นซิลิกอนไดออกไซด์แล้ว เมื่อนำเอาผลิตภัณฑ์นี้ไปใช้งานหรือเก็บรักษาไว้ภายใต้บรรยากาศที่มีกรดไฮโดรฟลูออริกหรือมีฟลูออไรด์ (fluoride) ซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับกรดได้ที่อุณหภูมิห้องมีผลทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนี้



#### 2.1.4.2 ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber) หรือ Nitrile Rubber (NBR)

ยาง NBR เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์ (acrylonitrile monomer) และบิวตาไดอีนมอนอเมอร์ (butadiene monomer) ดังสูตรรูป 2.5 ซึ่งจะประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ ตั้งแต่ 20-50 % จากโครงสร้างของโมเลกุลจะเห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชัน -CN อยู่ ดังนั้นโมเลกุลจึงมีความเป็นขั้ว ทำให้ยางมีสมบัติเด่นต่างๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ที่มีในโมเลกุล [31]



การเพิ่ม % ของ -CN (ความมีขั้วสูง) เป็นการเพิ่ม สมบัติต่างๆต่อไปนี้

- ความคงทนต่อน้ำมัน (oil resistance) เช่น จารบี น้ำมันพืช น้ำมันหรือไขมันจากสัตว์
- ความคงทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง (fuel resistance) เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันเครื่อง น้ำมันไฮดรอลิก สารที่สกัดจากปิโตรเลียม หรือมีส่วนผสมของปิโตรเลียมเป็นต้น
- ความทนต่อแรงดึง (tensile strength)
- ความคงทนต่อการเสียดสี (abrasion resistance)
- การไม่ยอมให้ก๊าซผ่าน (gas impermeability)

- ความคงทนต่อความร้อน (heat resistance) ทนอุณหภูมิระหว่าง -20 ถึง 120 องศาเซลเซียส)
- ทนต่อสารเคมีจำพวกกรด เช่น ซัลฟิวริก 10% - 40%, แอซิดิก 100%, ไฮโดรคลอริก 37% เป็นต้น
- ทนต่อเบส เช่น โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) เป็นต้น
- ทนต่อสารเคมีอื่นๆ เช่น ฟอรัมาลีน เมทิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น

ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ใช้ทำปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียงหรือทำท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ยางพื้นรองเท้า ยางเคลือบลูกกอล์ฟ เป็นต้น

## 2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิตที่นำไฟฟ้า [32, 33]

พอลิเมอร์โดยทั่วไปมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ทำให้นำไฟฟ้าได้โดยการสังเคราะห์โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีให้เกิดโครงสร้างที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugated bond) แล้วยังสามารถทำให้นำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า เช่น ผงโลหะ ผงเขม่าดำ แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน ลงในพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulator) โดยเมื่อผสมกันแล้วจะทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคของสารตัวเติมนำไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น สมบัติของสารตัวเติมนำไฟฟ้า และการกระจายตัวของสารตัวเติมนำไฟฟ้า ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปผสมในเมทริกซ์ ต้องมีปริมาณเกินกว่า สัดส่วนวิกฤติ (critical concentration of conducting filler) ที่เรียกว่าปริมาณของสารตัวเติมในระดับนี้ว่าระดับที่น้อยที่สุดที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคได้ (percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่สารตัวเติมนำไฟฟ้ามักพอที่จะเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตมากขึ้น สำหรับงานของพอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ในหลายๆด้าน เช่น ทำแบตเตอรี่ และขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

## 2.3 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่แปลงพลังงานเคมีจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนโดยตรงโดยปฏิกิริยารีดักชัน ที่ขั้วแคโทด (cathode) และแอโนด (anode) ของเซลล์ซึ่งจะได้น้ำเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยานี้ เซลล์

เชื้อเพลิงได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้สำหรับยานยนต์ในการขับเคลื่อน ใช้ในอาคารธุรกิจที่อยู่อาศัย หรือแม้กระทั่งนำมาไปใช้ในอุปกรณ์ชิ้นเล็ก ๆ อย่างคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถที่จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 80 % หรือมากกว่าเมื่อกระบวนการความร้อนถูกรวมเข้าด้วยกันกับกระบวนการกำเนิดกำลังงาน [4] ระบบเซลล์เชื้อเพลิงถูกบูรณาการขึ้นด้วยผลิตภัณฑ์ของไฮโดรเจน และกักเก็บเอาไว้เพื่อนำไปใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงของยานยนต์ นำไปเป็นพลังงานให้กับระบบทำความร้อนหรือระบบทำความเย็น หรือแม้แต่ผลิตไฟฟ้าให้เรานำมาใช้กัน และด้วยเป็นระบบที่สะอาด จึงเป็นสิ่งที่เหมาะสำหรับการผลิต รวมถึงมีความเชื่อมั่นสูงในการบริการด้านพลังงาน และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

### 2.3.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [4,35]

Fuel Cell มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดยแบ่งตามประเภทของสารพาประจุ (electrolyte) โดยจะกล่าวถึงการทำงาน โดยละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. ขั้วแอโนด เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้ว โดยอิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป

2. ขั้วแคโทด เป็นขั้วบวก โดยมีช่องติดกับเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำหน้าที่รับโปรตอนและก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเชื้อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ และทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก เพื่อรวมกันเป็นน้ำ ดังปฏิกิริยา  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

3. สารพาประจุ เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้ สารพาประจุจะเป็นเพียงเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นฟิล์มพลาสติกบางที่มักใช้ในการทำครัว โดยจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่างๆ เกิดได้ดี โดยส่วนใหญ่จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน

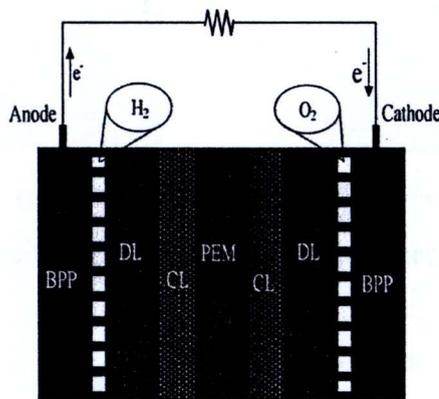
หลักการทำงาน คือ  $H_2$  จะถูกปล่อยไปในด้านแอโนด โดยใช้ความดัน เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะเกิดการแตกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัว

โดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็น โมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ เพื่อประโยชน์ในงานด้านต่างๆ

แต่เนื่องจาก  $H_2$  เป็นก๊าซที่อันตราย เนื่องจากติดไฟได้ จึงไม่เหมาะสมในการบรรจุ หรือเคลื่อนย้ายไปมา และจึงทำให้มีการพัฒนา Fuel Processor ซึ่งมีหลักการคือ

1. ใช้เครื่อง Reformer เปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ  $H_2O$  และ  $O_2$  ให้กลายเป็น  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$
2. ใช้เครื่อง Catalytic Converter เปลี่ยน  $CO$  ให้กลายเป็น  $CO_2$
3. จากนั้นก็นำ  $H_2$  มาใช้ได้ตามต้องการ ส่วน  $CO_2$  ก็ถูกปล่อยสู่บรรยากาศต่อไป

วิธีนี้ นอกจากจะเพิ่มความปลอดภัยแล้ว ยังเป็นการประหยัดอีกด้วย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสารอื่นๆ มาเป็น  $H_2$  ได้



PEM : Proton Exchange Membrane    CL : Catalyst layer

DL : Diffusion Layer

BP: Bipolar Plate

รูป 2.6 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน [34]

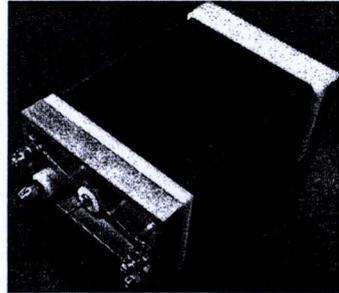
จากรูป 2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอนประกอบไปด้วยขั้วแอโนด แคโทด ชั้นเชื้อเลือกผ่าน (diffusion layer) ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst layer) และอิเล็กโตรไลต์ (Proton Exchange Membrane) โดยอิเล็กโตรไลต์จะอยู่ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เซลล์เชื้อเพลิงจะเริ่มทำงานเมื่อไฮโดรเจนถูกปล่อยไปที่ขั้วแอโนดด้วยความดัน เมื่อก๊าซไปผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้นสามารถที่จะผ่านช่องของเชื้อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทดได้ ซึ่งจะไปรวมกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัว

โดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำและความร้อนขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ เพื่อประโยชน์ในงานด้านต่างๆ

ซึ่งเมื่อต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงมีกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ให้เหมาะสมและเพียงพอกับการใช้งาน จะต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลายๆ เซลล์มาเรียงซ้อนกันแบบอนุกรม เรียกว่า หอเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell stack) การต่อเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันต้องใช้วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและแคโทด พร้อมทั้งมีการออกแบบช่องทางเดินของก๊าซเพื่อช่วยกระจายก๊าซให้สัมผัสกับอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึง วัสดุนี้เรียกว่า ไบโพลาร์เพลต ซึ่งลักษณะของไบโพลาร์เพลต และหอเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูป 2.7 และ 2.8

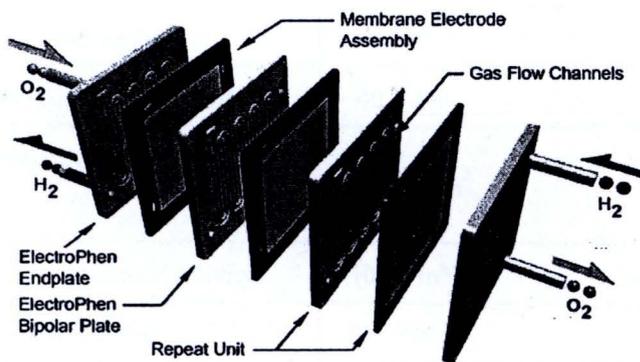


(ก)



(ข)

รูป 2.7 แผ่นไบโพลาร์เพลต (ก) [36] และหอเซลล์เชื้อเพลิง (ข) [37]



รูป 2.8 หอเซลล์เชื้อเพลิง [14]

## 2.4 ไบโพลาร์เพลต

ไบโพลาร์เพลต เป็นส่วนประกอบสำคัญอันหนึ่งของ PEMFC มีน้ำหนักประมาณ 60 - 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลล์เชื้อเพลิง และยังมีราคาประมาณ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ของราคาเซลล์เชื้อเพลิง [14] มีหน้าที่สำคัญหลายประการคือ เป็นทางเดินของก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนภายในเซลล์ ควบคุมน้ำภายในเซลล์ กระจายแก๊สออกจากเซลล์ ควบคุมความร้อน และเป็นตัวกั้นระหว่างเซลล์ภายในห่อเซลล์ (cell stack) โดยไบโพลาร์เพลตจะต้องสามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี ก๊าซสามารถซึมผ่านได้น้อย ทนต่อสภาวะในเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2-3 อุณหภูมิประมาณ 50-80 °C) นอกจากนี้ควรมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และผลิตง่าย [12, 38] สมบัติของไบโพลาร์เพลตตามความต้องการของ DOE (Department of Energy) ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติของไบโพลาร์เพลตตามความต้องการของ DOE (Department of Energy) และ Plug Power [6, 38]

สมบัติ	ค่า
ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity)	>100 S/cm
ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน (Low hydrogen permeability)	$< 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \text{ sec}^{-1}$
ความทนแรงโค้งงอ (flexural strength)	> 25 MPa
ความทนแรงดึง (tensile strength)	> 41 MPa
ความทนแรงกระแทก (Impact strength)	> 40.5 J/m
ความทนต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance)	$< 16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity)	>10 W/mK
เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)	-40 - 120 °C
ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดภายในเซลล์	pH<4

วัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นไบโพลาร์เพลตแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน แผ่นโลหะและคอมโพสิต [12, 39, 40]

**2.4.1 ไบโพลาร์เพลตชนิดแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (non-porous graphite/ electrographite) [54]**

แกรไฟต์เป็นวัสดุที่นิยมนำมาทำไบโพลาร์เพลต เนื่องจากทนการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำทำให้ได้กระแสไฟฟ้าสูง มีความหนาแน่นต่ำกว่าโลหะ แต่มีข้อเสียคือความเปราะ จึงต้องทำให้เป็นแผ่นหนาทำให้มีน้ำหนักมาก นอกจากนี้กระบวนการผลิตในขั้นตอนการทำช่องทางไหลของก๊าซค่อนข้างยากและมีราคาสูง

**2.4.2 ไบโพลาร์เพลตชนิดโลหะ [39]**

สามารถนำโลหะมาผลิตเป็นไบโพลาร์เพลตได้ โลหะนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถทำให้เป็นแผ่นบางได้ ดังตาราง 2.2 นอกจากนี้ยังประกอบง่ายและราคาถูก

ตาราง 2.2 สมบัติของไบโพลาร์เพลตชนิดที่ทำจากโลหะและแกรไฟต์ [40]

Property	Titanium	Aluminum	Stainless Steel	Graphite
Bulk Conductivity	1500 S/cm	376,000 S/cm	10,000 S/cm	110-680 S/cm
Density	4.54 g/cm <sup>3</sup>	2.70 g/cm <sup>3</sup>	8.0 g/cm <sup>3</sup>	1.8-2.0 g/cm <sup>3</sup>
Thermal Cond.	17.2 W/m K	205 W/m K	16.3 W/m K	N/A
Thickness	1-2 mm	1-2 mm	1-2 mm	5-6 mm

จากตาราง 2.2 จะเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของไบโพลาร์เพลตที่ทำจากแผ่นโลหะจะมากกว่าแผ่นแกรไฟต์ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เป็นแผ่นบางประมาณ 1-2 มิลลิเมตรได้ ซึ่งบางกว่าแผ่นแกรไฟต์ แต่โลหะกลุ่มสแตนเลส (stainless) ไทเทเนียม (Ti) จะมีข้อเสียคือไม่ทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะที่เป็นกรดของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากเกิดการป้องกันตัวเองของโลหะ โดยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวโลหะเพื่อลดการกัดกร่อนของโลหะ ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการเคลือบผิวของโลหะ แต่ยังมีโลหะบางชนิดที่สามารถนำมาใช้ทำเป็นไบโพลาร์เพลตโดยมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง เช่น แพลทินัม (Pt) แทนทาลัม (Ta)

ไนโอเบียม (Nb) เซอร์โคเนียม (Zr) แต่เป็นโลหะที่มีราคาแพงมาก จึงเป็นอุปสรรคต่อการผลิตในเชิงพาณิชย์ [39,40]

### 2.4.3 ไบโพลาร์เพลตชนิดคอมโพสิต [12, 39, 40]

แผ่นไบโพลาร์เพลตที่ทำจากแกรไฟต์มีสมบัติเด่นคือ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมอีกทั้งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยมาก แต่ข้อเสียของแกรไฟต์คือ ขึ้นรูปค่อนข้างยากเนื่องจากมีความเปราะ อีกทั้งยังมีราคาสูง นอกจากนั้นไบโพลาร์เพลตที่ทำจากโลหะที่ผ่านการเคลือบแล้ว เมื่อนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถลดการกัดกร่อนได้ แต่ไปเพิ่มความต้านทานหน้าสัมผัส ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตไบโพลาร์เพลตเนื่องจากราคาต่ำ ง่ายต่อการขึ้นรูป ทนต่อการกัดกร่อนและน้ำหนักเบา เช่น พอลิเมอร์-คาร์บอนคอมโพสิต (ตัวอย่างแสดงในตาราง 2.3) พอลิเมอร์-โลหะคอมโพสิต ซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อผลิตเป็นไบโพลาร์เพลต

ตาราง 2.3 วัสดุคาร์บอนคอมโพสิตที่นำมาใช้เป็นไบโพลาร์เพลต [40]

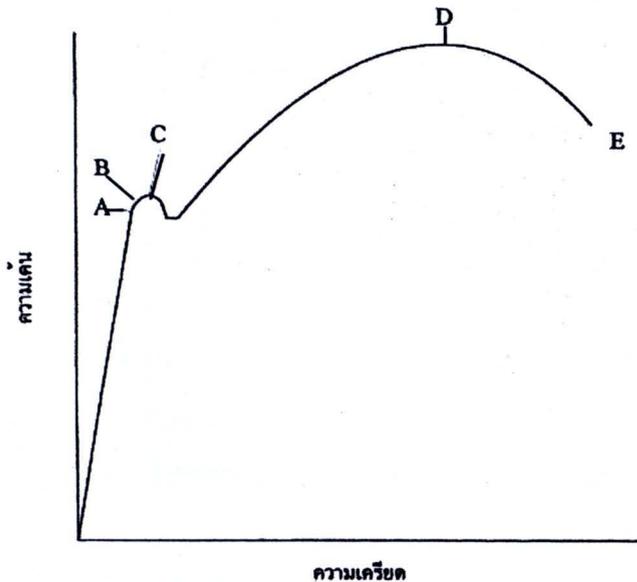
Resin	Type of resin	Filler	Fiber
<b>Poly (vinylidene fluoride)</b>	Thermoplastic	Carbon /Graphite particle	Carbon fiber
<b>Polypropylene</b>	Thermoplastic	Carbon black/ Graphite Powder	-
<b>Mixer of an epoxy resin and an aromatic amide hardener</b>	Thermoset	Graphite Powder	-
<b>Phenyl-aldehyde resin</b>	Thermoset	Graphite Powder	Graphite fiber
<b>Phenol resin or furan resin</b>	Thermoset	Graphite Powder	Cellulose fiber
<b>Phenolic resin</b>	Thermoset	-	Carbon fiber
<b>Vinyl ester</b>	Thermoset	Graphite Powder	Graphite fiber Carbon fiber Glass fiber

## 2.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของวัสดุพลาสติกเป็นสมบัติที่สำคัญในการเลือกวัสดุเพื่อใช้ในงานต่าง ๆ โดยพิจารณาสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) มอดุลัส (modulus) การยืดตัว (elongation) และ ความทนแรงกระแทก (impact strength) เป็นต้น

### 2.5.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ความทนแรงดึงของวัสดุ คือ ความต้านทานของวัสดุนั้นต่อการยืด หรือการแตกหัก (breaking) เมื่อมีแรงดึงวัสดุ พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุส่วนมากขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วที่ทำให้ความเค้นด้วย เช่น ถ้าดึงวัสดุอย่างรวดเร็วทันทีทันใดอาจทำให้วัสดุขาดได้ แต่ถ้าใช้แรงเท่ากันแต่ดึงช้าๆ อาจทำให้วัสดุเพียงแต่ยืดออกเท่านั้นความต้านทานต่อการขาดของวัสดุมีค่าสูงขึ้น [41] โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียด สามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูป 2.9

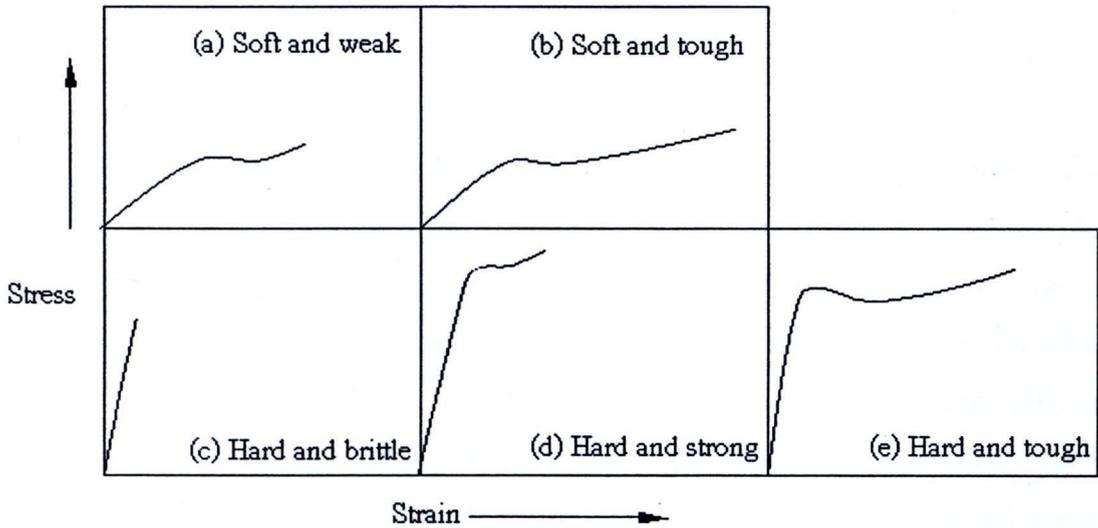


รูป 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด พบว่าเมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) จากกราฟจะเห็นว่าช่วงนี้เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรง นั่นคือความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น ซึ่งถ้าปล่อยแรงดึงออกวัสดุจะกลับคืนสภาพเดิม ที่จุด A นี้เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น ซึ่งจุดนี้เรียกว่า ชิดจำกัดของสัดส่วน (proportional limit) เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงเป็นช่วงสั้นๆ จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด B) เรียกว่า ชิดจำกัด

ความยืดหยุ่น (elastic limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่วัสดุจะกลับคืนสภาพเดิมได้ และเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร และเมื่อเลยจุด C วัสดุจะยืดตัวออกได้เองโดยไม่ต้องออกแรงเพิ่ม จุดนี้เรียกว่า จุดคราก (yield point) และเมื่อออกแรงดึงวัสดุจะยืดต่อไปอีกจนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่วัสดุจะรับความเค้นได้ เรียกว่าจุดประลัย (ultimate strength) จากนั้นวัสดุจะยืดตัวเองออกจนถึงจุด E วัสดุจะขาดออกจากกัน จุด E เรียกว่าจุดแตกหัก (breaking point)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด สามารถบอกสมบัติของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุประเภทใด เช่นเป็นวัสดุที่เปราะ (brittle) หรือเป็นวัสดุที่เหนียว (ductile) ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละประเภทมีลักษณะกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดที่แตกต่างกันดังรูป 2.10 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ปรากฏ ทำให้สามารถจำแนกสมบัติของพลาสติกได้ดังตาราง 2.4 [42]



รูป 2.10 ลักษณะของของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆ [42]

ตาราง 2.4 สมบัติทางด้านความเค้น-ความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆ [42]

ประเภทของพลาสติก	มอดุลัส	ความเค้น ณ จุดคราก	ความเค้นสูงสุด	ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด
นิ่มและไม่แข็งแรง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
นิ่มและเหนียว	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
แข็งเปราะ	สูง	ไม่ชัดเจน	ปานกลาง	ต่ำ
แข็งแรง	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
แข็งและเหนียว	สูง	สูง	สูง	สูง

การคำนวณเกี่ยวกับความทนแรงดึง

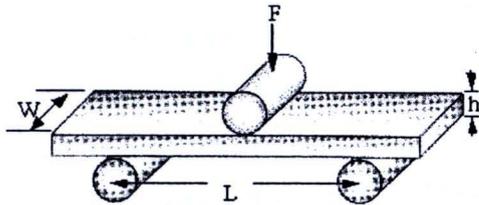
$$\text{ความทนแรงดึง} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดก่อนทดสอบ}} \quad (2.4)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ระยะยืด}}{\text{ความยาวก่อนดึง}} \times 100 \quad (2.5)$$

$$\text{มอดุลัส} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{\text{แรง/พื้นที่หน้าตัด}}{\text{ความยาวที่ยืดออก/ความยาวเดิม}} \quad (2.6)$$

### 2.5.2 ความทนแรงโค้งงอ (Flexural strength) [41, 42]

ความทนแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (indenter) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (tensile stress) และแรงเค้นกด (compressive stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ชิ้นทดสอบ ดังรูป 2.11 การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะ คือการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 3 จุด (three point bending) และการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 4 จุด (four point bending) และค่า flexural strength คือความเค้นมากที่สุด หรือความเค้นโค้งงอ (maximum stress or flexural stress:  $\sigma_{\max}$ ) ที่เกิดตรงกลางชิ้นทดสอบตรงส่วนผิวนอก หาได้ดังสมการ (2.7)



รูป 2.11 แรงเค้นในชิ้นทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด

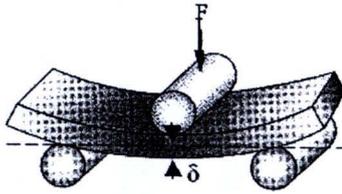
$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $F$  = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอลิเมอร์  
 $L$  = ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง  
 $W$  = ความกว้างของตัวอย่าง  
 $h$  = ความสูงของตัวอย่าง

มอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8) เมื่อ คือระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง  $F$

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3 F}{4Wh^3} \quad (2.8)$$

การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด เป็นการทดสอบความเค้นโดยจะมีตัวกดสำหรับแรงกด 1 จุด ซึ่งอยู่ด้านบนขึ้นทดสอบ และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้านล่างขึ้นทดสอบ 2 จุด ดังรูป 2.12



รูป 2.12 การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด

### 2.5.3 ความความทนแรงกระแทก (Impact strength) [41, 42, 43]

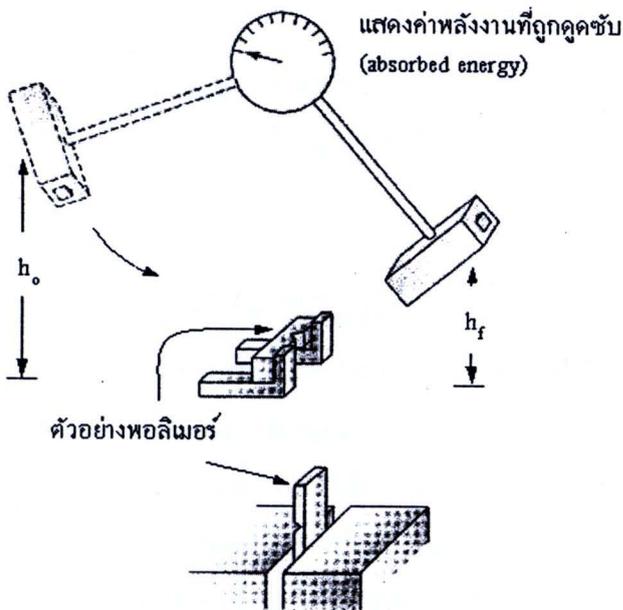
ความทนแรงกระแทกเป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้การกระทบ ความทนแรงกระแทกมักจะสัมพันธ์กับค่าความเหนียว (toughness) ของวัสดุ การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบเชิงกลในลักษณะการได้รับแรงกระทำอย่างทันทีทันใด จึงนับว่าเป็นสมบัติที่มีความสำคัญในเชิงวัสดุศาสตร์ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าความเหนียว โดยต้องคำนึงถึงขนาดและความหนาของตัวอย่างด้วยวัสดุต่างๆ ที่ต้องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก จึงควรเป็นวัสดุที่นำไปใช้งานที่มีโอกาสที่รับแรงในลักษณะดังกล่าว เช่น วัสดุเพื่อการหีบห่อ การขนส่ง เป็นต้น

เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุที่ใช้กันมากแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. แบบค้อนน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก (Pendulum impact) ซึ่งอาจใช้การทดสอบแบบอิซอด (Izod type) หรือ แบบชาร์ปี (Charpy type) ดังรูป 2.13

## 2. แบบน้ำหนักตกกระแทก (Drop weight impact)

ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบไอซอด (Izod type) และ แบบชาร์ปี (Charpy type) คือ การวางชิ้นทดสอบ โดยการทดสอบแบบ Charpy จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ ให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วนการทดสอบแบบ Izod จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้ง และให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบาก



รูป 2.13 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทก โดยตุ้มน้ำหนัก

### ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบ

#### 1. รอยบาก

โดยปกติแล้วในการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดและชาร์ปีมักจะมีการบากชิ้นงานเพื่อก่อให้เกิดจุดอ่อนแอของชิ้นงาน เนื่องจากการใช้งานจริงผลิตภัณฑ์มักจะมีจุดที่มีความเค้นสูงอยู่ในชิ้นงานเสมอ ซึ่งมักจะเป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักเสียหาย แต่การจำลองรอยบากเป็นการจำลองสภาพให้คล้ายคลึงกับสภาพจริงในชีวิตประจำวัน ดังนั้นรอยบากจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการทดสอบ โดยรอยบากที่ตื้นจะมีความทนแรงกระแทกที่สูงกว่ารอยบากที่ลึก เพื่อให้การทดลองถูกต้องจึงต้องมีการควบคุมความลึกของรอยบากให้ตรงตามมาตรฐาน



## 2. ความหนาของชิ้นงาน

ความหนาที่แตกต่างกันของชิ้นงานทดสอบสามารถก่อให้เกิดความแตกต่างในระดับของความต้านทานต่อแรงกระแทกของพลาสติกได้ ชิ้นงานที่มีความหนามากจะทำให้ชิ้นงานมีความเปราะมากกว่าชิ้นงานที่มีความบาง ซึ่งชิ้นงานที่บางสามารถที่จะบิดตัวและคดงอได้ในระหว่างการกระแทกได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนากว่า ทำให้โดยทั่วไปชิ้นงานที่มีความบางกว่ามักมีความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า ดังนั้นชิ้นงานที่ทดสอบจึงควรมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6.36 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่บางมักจะให้พลังงานกระแทกที่สูงกว่า

## 3. อุณหภูมิการทดสอบ

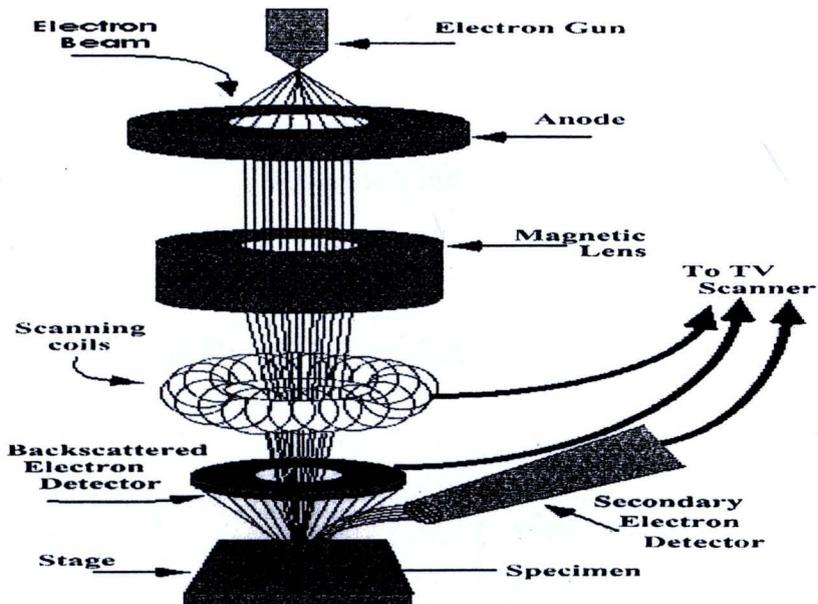
พลาสติกจะมีความทนแรงกระแทกตกลงอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง พลาสติกจะมีความเปราะมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลมีค่าลดลง

### 2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) [44]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector, SE detector) มาจับสัญญาณตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Detector, BSE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้สามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry: EDS และ Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry: WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

ในเครื่อง SEM จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญดังรูป 2.14 ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source)
2. อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์ (electromagnetic lens) หรือ ขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของอิเล็กตรอน
3. ปัมสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน (control pressure system)
4. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector)
6. อุปกรณ์สร้างภาพ (imaging devices)



รูป 2.14 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [44]

ซึ่งก่อนที่จะนำชิ้นงานไปส่องกล้องหากชิ้นงานไม่นำไฟฟ้าจะต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างโดยใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง-พลาเดียม เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าให้แก่ตัวอย่าง