

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

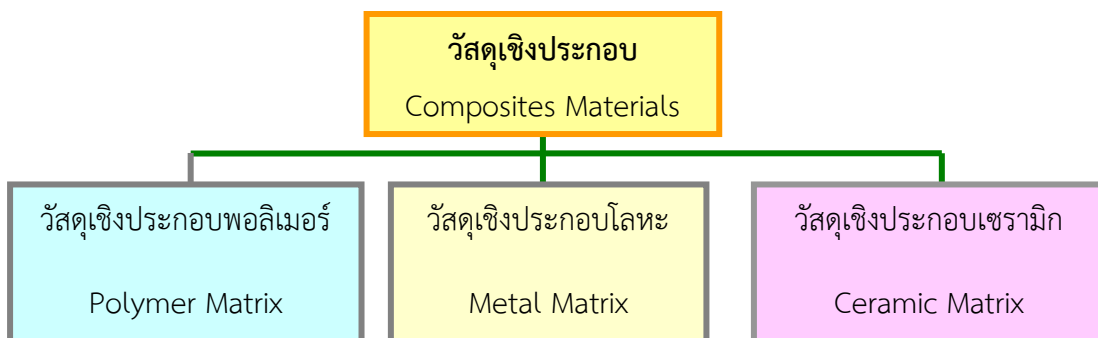
ในส่วนของบทนี้เป็นการนำเสนอเอกสาร ซึ่งเริ่มจากความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยเน้นไปที่วัสดุเชิงประกอบ พอลิเมอร์และวัสดุองค์ประกอบในงานวิจัย อีกทั้งยังได้กล่าวถึงระบบพลาสติกที่นำมาใช้ในการเพิ่มสมบัติการยึดเกาะ ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียของระบบพลาสติกต่างๆ อีกทั้งยังมีปฏิกิริยาในระบบพลาสติกที่เกิดขึ้นอีกด้วย

#### 1. วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ (composite materials) เป็นวัสดุที่เกิดจากรวมตัวของวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่ถูกใช้งานในลักษณะวัสดุเนื้อเดียวโดยวัสดุองค์ประกอบยังแสดงสมบัติพื้นฐานแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลง หากแต่เมื่อใช้งานเป็นวัสดุเชิงประกอบแล้วสมบัติของวัสดุองค์ประกอบแสดงลักษณะการเสริมสมบัติซึ่งกันและกัน ซึ่งสมบัติร่วมที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นสมบัติที่ไม่สามารถได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบเพียงชนิดเดียว (สุวินชัย พงษ์สุกิจวัฒน์และคณะ, 2548) การผสมกันของวัสดุนี้จะมีวัสดุชนิดหนึ่งกระจายตัวในเฟสของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง โดยเรียกวัดที่กระจายตัวนี้ว่าวัสดุเสริมแรง(reinforcement) และเรียกเฟสที่มีวัสดุเสริมแรงกระจายตัวอยู่ว่าเมทริกซ์(matrix) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2540) ตัวอย่างเช่น วัสดุเชิงประกอบจากบรรจุภัณฑ์ใช้แล้วในงานวิจัยนี้ มีวัสดุเสริมแรงเป็นแผ่นวัสดุเชิงประกอบของเยื่อกระดาษเซลลูโลสและแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งตัดเป็นชิ้น และกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งเป็นพอลิเอทิลีนรีไซเคิล โดยเป็นการนำพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหลอมใหม่เกิดเป็นเม็ดพลาสติกรีไซเคิลวัสดุเสริมแรงมีหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับเมทริกซ์ และเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นเฟสที่รวมเอาวัสดุเสริมแรงให้คงรูปได้

##### 1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) ดังภาพ 2 และยังสามารถจำแนกประเภทย่อยตามลักษณะของวัสดุเสริมแรงได้ เช่น วัสดุเสริมแรงลักษณะอนุภาค เส้นใยสั้น เส้นใยยาว และแผ่น เป็นต้น (หฤทภาค กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีรนิติสกุล, และอภิรัตน์ เลาห์บุตรี, 2553)



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์

1.1.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ โดยที่พอลิเมอร์เป็นสารประกอบคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำต่อกันเป็นสายยาว พอลิเมอร์เป็นสารปิโตรเคมีที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์คือ ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงไม่สูงนักเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทเซรามิกและโลหะ มีความทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นฉนวน ดังนั้นการเพิ่มวัสดุเสริมแรงเข้าไปในเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นการทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปเส้นใยเสริมแรงที่มีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิด โดยเส้นใยเสริมแรงจะมีหน้าที่รับแรงกระทำและกระจายแรงกระทำ ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นแข็งแรงทนทานกว่า รับแรงกระทำได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ปราศจากวัสดุเสริมแรง นอกจากนี้วัสดุเสริมแรงอาจอยู่ในรูปลักษณะอื่นๆได้ เช่น อนุภาค แผ่น และวิสเกอร์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเสริมสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ด้านใดด้านหนึ่ง ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ ได้แก่ เรซินพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และพอลิเอไมด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด เป็นต้น

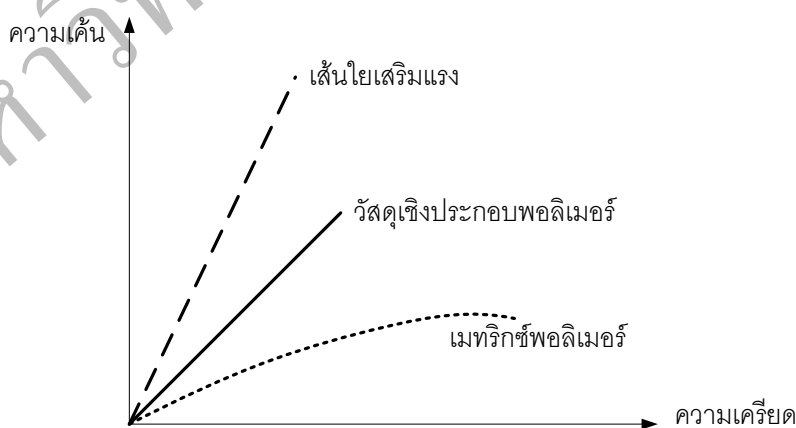
1.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ โดยที่การเพิ่มวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์โลหะ เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบโลหะมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการทนทานต่อความล้าระหว่างการใช้งานของโลหะ ตัวอย่างเช่น เมทริกซ์อะลูมิเนียมและไทเทเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่ถูกใช้งานในอุตสาหกรรมอวกาศยานซึ่งต้องการสมบัติพิเศษในการใช้งาน การเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงที่มีความแข็งแรงสูงจึงทำให้เมทริกซ์โลหะมีอายุการใช้งานนานขึ้น วัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบโลหะนอกจากจะต้องมีความแข็งแรงสูงแล้วยังต้องสามารถทนความร้อนสูงด้วยเนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการ

ขึ้นรูป โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะถูกใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบโลหะ ได้แก่ เมทริกซ์อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ และเมทริกซ์ไทเทเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น

- 1.1.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก ซึ่งเซรามิกเป็นวัสดุที่มีแข็งแรงสูง ทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ไม่นำไฟฟ้า ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก ข้อเสียของเซรามิกคือเปราะและแตกง่าย โดยถ้าเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความแกร่งมากขึ้น โดยวัสดุเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบเซรามิก ได้แก่ เมทริกซ์ซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเมทริกซ์คาร์บอนเสริมแรงด้วยเส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

## 1.2 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบโลหะและวัสดุเชิงประกอบเซรามิกเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่ใช้อุณหภูมิสูง และการประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันได้มากกว่า สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยทั่วไปเกิดจากการผสมสมบัติของวัสดุองค์ประกอบทั้งเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง โดยวัสดุเสริมแรงมักเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงสูง ส่วนเมทริกซ์มักเป็นเฟสที่ครอบคลุมวัสดุเสริมแรงไว้



รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ

ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบสามารถทำนายได้จากความแข็งแรงของวัสดุองค์ประกอบ ดังแสดงในภาพ 3 ซึ่งแสดงสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรง เมื่อให้แรงในทิศทางตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย (เหตุทัก กิริติเสวี

และคณะ, 2553) จะเห็นได้ว่าสมบัติที่เกิดขึ้นเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้พอลิเมอร์ที่ไม่เสริมแรง แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่มากไปกว่าระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ ส่วนเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีนซึ่งนิยมใช้เป็นแผ่นประดับสำหรับตกแต่งภายใน หากพอลิโพรพิลีนที่ใช้ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยแก้ว และมีเมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีน (glass fibre-reinforced polypropylene composite) วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น รับแรงกระแทกได้มากขึ้น จึงสามารถประยุกต์ใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของตัวถังรถยนต์ได้ ซึ่งต้องการความแข็งแรงมากกว่าแผ่นประดับสำหรับตกแต่งภายใน เป็นต้น

ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบนอกเหนือจากสมบัติของวัสดุองค์ประกอบ ได้แก่ สัดส่วนปริมาณของวัสดุเสริมแรงต่อปริมาณของเมทริกซ์พอลิเมอร์ (fibre volume fraction, FVF) การจัดเรียงตัวของวัสดุเสริมแรง การกระจายตัวของวัสดุเสริมแรง และความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุเสริมแรงและเมทริกซ์หากวัสดุเสริมแรงที่ใช้มีสมบัติเสริมสมบัติเชิงกลให้เมทริกซ์แล้ว การใช้วัสดุเสริมแรงปริมาณมากขึ้นย่อมทำให้ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ต้องไม่เกินปริมาณที่เมทริกซ์พอลิเมอร์จะสามารถครอบคลุมวัสดุเสริมแรงได้ การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงมีผลเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุเสริมแรงในลักษณะเส้นใย ซึ่งจะสามารถเสริมความแข็งแรงได้ดีที่สุดเมื่อแรงกระทำมาตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย การกระจายตัวที่สม่ำเสมอส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติที่คงที่มากกว่าการกระจุกตัวของวัสดุเสริมแรง นอกจากนี้ความสามารถในการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงหรือความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุก็มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงจำเป็นต้องยึดติดกันเป็นโครงสร้างเนื้อเดียว ซึ่งหมายถึงการไม่เกิดการแตกแยกระหว่างวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุองค์ประกอบมีหลากหลาย ทั้งสมบัติของวัสดุองค์ประกอบ และกระบวนการขึ้นรูป ที่ใช้ควบคุมการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของวัสดุ วัสดุเชิงประกอบจึงเป็นวัสดุที่สามารถออกแบบสมบัติได้ตามต้องการ โดยการเปลี่ยนปัจจัยนำเข้าเหล่านี้ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงถูกใช้งานในหลากหลายสาขา ครอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไป จนกระทั่งถึงวัสดุที่ต้องการสมบัติเฉพาะทาง

### 1.3 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเชิงความร้อนของเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นสำคัญ (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, 2553) เพราะหลักการสำคัญคือการผสมวัสดุเสริมแรงเข้ากับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีในขณะที่เมทริกซ์หลอมเหลวหรืออยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์มอพลาสติกต้องทำการผสมในขณะที่หลอมเหลว โดยการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก สำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอเซตติงต้องทำการผสมในขณะที่ยังมีสถานะเป็นของเหลวก่อนปฏิบัติการ

พอลิเมอร์ไรเซชันโดยเป็นการผสมวัสดุเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ก่อนปฏิกิริยา นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปยังขึ้นอยู่กับลักษณะวัสดุเสริมแรงอีกด้วย วัสดุเสริมแรงที่มีขนาดเล็กสามารถผสมเข้ากับเมทริกซ์ได้ระหว่างกระบวนการผสมก่อนขึ้นรูป ในขณะที่วัสดุเสริมแรงที่มีขนาดใหญ่ต้องมีกระบวนการจัดเรียงวัสดุเสริมแรงในแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำกระบวนการเคลือบทับหรือหล่อด้วยเมทริกซ์ เป็นต้นทั้งนี้การเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

วัสดุเสริมแรงที่อยู่ในรูปอนุภาคขนาดเล็กหรือเส้นใยขนาดเล็ก สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์หลอมเหลวได้โดยการปรับอัตราการผสมให้เหมาะสมกับความหนืดของพอลิเมอร์ เมทริกซ์พอลิเมอร์และวัสดุเสริมแรงจะถูกผสมในบารเรลที่มีสกรูคลุกก่อนที่จะถูกอัดรีดผ่านหัวตายต่อไป ซึ่งเป็นกระบวนการที่คล้ายกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ทั่วไป แต่เพิ่มสภาวะในการผสมให้ดีขึ้น ได้แก่ การอัดรีด (extrusion) การฉีดเข้าแม่พิมพ์ (injection) และการพ่นเคลือบด้วยสเปรย์ (spray lay-up) เป็นต้น

วัสดุเสริมแรงที่อยู่ในรูปอนุภาคขนาดใหญ่ เส้นใยยาวหรือเส้นใยถักทอ ไม่สามารถผสมเข้ากับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้โดยง่าย ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปจึงเป็นกระบวนการจัดเรียงเส้นใยหรือฝืนเส้นใยในทิศทางที่รับแรงกระทำก่อน จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเคลือบทับหรือหล่อด้วยเมทริกซ์ ได้แก่ การเรียงเส้นใยด้วยมือและเคลือบทับ (hand lay-up) การอัดขึ้นรูป (compression) การพันเส้นใย (filament winding) และการดึงยืดขึ้นรูป (pultrusion) เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบ องค์ประกอบสำหรับการผลิตอาจอยู่ในรูปของชิ้นงานกึ่งสำเร็จหรือพรีเพรก (prepreg) เพื่อความสะดวกในการขึ้นรูป ถ้าเป็นวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง จะเป็นเส้นใยที่อยู่ในเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงแต่ทำให้เกิดการเชื่อมโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้น ต่อเมื่อนำมาทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการแล้วจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สมบูรณ์ พรีเพรกลักษณะนี้อาจมาในรูปแบบที่เรียกว่า พรีเพรกผสมเสร็จแบบแผ่น (sheet moulding compound, SMC) สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น และพรีเพรกผสมเสร็จแบบหนา (bulk moulding compound, BMC) สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรง สำหรับพรีเพรกของวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติกนั้น จะอยู่ในรูปแบบที่เป็นเส้นใยแก้วสั้นๆในเมทริกซ์พอลิโอเลฟิน ซึ่งเรียกว่า พรีเพรกฝืนแก้วเทอร์มอพลาสติก (glass mat thermoplastic, GMT) โดยพรีเพรกจะถูกให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวของเมทริกซ์ และทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการก่อนที่จะถูกทำให้เย็นตัวลงและคงรูป

การอัดขึ้นรูป (compression moulding press, hot press) เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปพอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก โดยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์เหนืออุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) จนกระทั่งเกิดการหลอมเหลวในแม่พิมพ์ จากนั้นอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยความดัน และทำให้แม่พิมพ์เย็นตัวลงจนเกิดการคงรูป ปัจจัยระหว่างกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สำเร็จ ได้แก่ อุณหภูมิ และความดันเนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิมีผลต่อการหลอมเหลวและเย็นตัวคงรูปของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์มีความหนืดที่แปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นสำคัญ นอกจากนี้ความดันยังมีผลต่อการอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ หากความดันมากเกินไป พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกดันออกจาก

แม่พิมพ์ หากความดันน้อยเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ หรือเกิดช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์ได้

จะเห็นได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของวัสดุองค์ประกอบ และการประยุกต์ใช้งาน อีกทั้งเทคนิคในการขึ้นรูปยังมีความสำคัญ เนื่องจากต้องทำให้การกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ปราศจากฟองอากาศในชิ้นงาน สัดส่วนระหว่างเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสม เป็นต้น

#### 1.4 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเชิงประกอบมีความหลากหลาย ตามคุณลักษณะของวัสดุองค์ประกอบ(กวี หวังนิเวศน์กุล, 2554) ไฟเบอร์กลาสหรือไฟเบอร์ เป็นตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูง ไฟเบอร์กลาสถูกประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง น้ำหนักเบา เช่น หลังคารถกระบะ เฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้เส้นใยเสริมแรงอื่นๆ นอกจากเส้นใยแก้ว ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด ซึ่งเส้นใยทั้งสองชนิดนี้มีความแข็งแรงสูงกว่า จึงพบในการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูงกว่า ส่วนวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกมักถูกใช้ในงานในการทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียวทนทาน หรือนำไปอัดขึ้นกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ถูกใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์มากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงจำเพาะสูงซึ่งหมายถึงการมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของวัสดุ สมบัติข้อนี้จึงมีประโยชน์สำหรับการขนส่ง ถ้าน้ำหนักรวมของยานยนต์ลดลง โดยที่สมบัติเชิงกลไม่ได้ลดลงไปด้วยจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนที่ซับซ้อนได้ และมีความทนทานต่อการใช้งาน จะเป็นประโยชน์ต่อการบำรุงรักษาในระยะยาวอีกด้วยวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ยังถูกใช้เป็นตัวทำเรือทดแทนไม้และโลหะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ขึ้นรูปได้ง่าย น้ำหนักเบา เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในการทำเรือได้แก่ พอลิเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ และอีพอกซี โดยมีเส้นใยแก้วทั้งแบบเส้นใยสั้น และเส้นใยผืนเป็นวัสดุเสริมแรง อีกทั้งยังมีการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ประกบร่วมกับแกน ซึ่งมักเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงเพื่อทำเป็นตัวเรือ ซึ่งจะได้เป็นแผ่นตัวเรือที่แข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โดยมีแผ่นผิวเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ความทนทานต่อสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบยังถูกใช้ประโยชน์ในอีกหลายๆด้าน ซึ่งพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น หมวกนิรภัย กระดานโต้คลื่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟ เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์พอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วสามารถใช้เป็นวัสดุทำฝ้าเพดาน แผ่นตกแต่งภายใน ฉากกันห้อง และวัสดุสำหรับทำเครื่องเรือน สำหรับการสร้างบ้านแบบประหยัด (Tue and Thwe, 2013) วัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์อะลูมิเนียมเสริมแรงพอลิเอทิลีนและลิกโนเซลลูโลสสามารถใช้เป็นวัสดุในการตกแต่งภายในสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ และการประยุกต์ใช้งานภายนอกอาคารได้ (Ayrimis, Kaymakci, Akbulut and Elmas, 2013)

## 2. เมทริกซ์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง สมบัติที่โดดเด่นโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ คือเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งยังมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเป็นเยี่ยม ในขณะที่สมบัติเชิงกลอยู่ในระดับปานกลาง หากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นสมบัติเชิงกลจำเพาะ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อความหนาแน่นของวัสดุแล้ว จะได้ว่าพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลจำเพาะอยู่ในระดับดี

### 2.1 การจำแนกประเภทของเมทริกซ์พอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์สามารถแบ่งประเภทตามพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์มอเซตติง และวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติก (สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ, 2548)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเทอร์มอเซตติงและเทอร์มอพลาสติก

สมบัติ	เทอร์มอเซตติง	เทอร์มอพลาสติก
ลักษณะการขึ้นรูป	ขึ้นรูปผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากมอนอเมอร์หรือแผ่นกึ่งสำเร็จซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้	ขึ้นรูปผ่านกระบวนการทำให้หลอมเหลวใหม่ โดยการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว
อุณหภูมิของการขึ้นรูป	อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	อุณหภูมิหลอมเหลวของ พอลิเมอร์
ความหนืดขณะหลว	ความหนืดค่อนข้างต่ำ	ความหนืดค่อนข้างสูง
ช่วงชีวิตของแผ่นกึ่งสำเร็จ	จำเป็นต้องเก็บแผ่นกึ่งสำเร็จที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาก่อนการขึ้นรูป	แผ่นกึ่งสำเร็จสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิห้อง
พฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน	ไม่เกิดการหลอมเหลวแต่เสื่อมสภาพที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการเสื่อมสภาพ	เกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิหลอมเหลว
การนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่	เป็นไปได้ยาก	สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้
การหดตัวหลังขึ้นรูป	ปานกลาง	ค่อนข้างต่ำ
สมบัติเชิงกลพื้นฐาน	ค่อนข้างแข็งแรงเปราะ	มีความแกร่งสูง
การทนทานต่อการใช้งาน	ดี	ปานกลาง – ดี

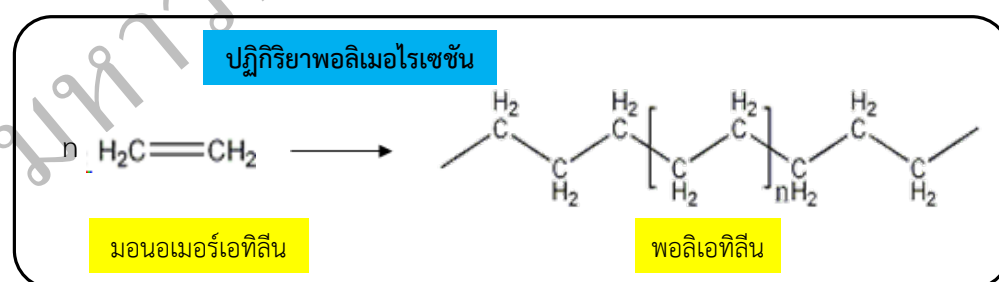
เทอร์มอเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ดังนั้นพอลิเมอร์ประเภทนี้จึงไม่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ ประเภทนี้ จำเป็นต้องขึ้นรูประหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์หรือขึ้นรูปจากแผ่นกึ่งสำเร็จในแม่พิมพ์ และจะสามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้หลังจากที่

ปฏิกิริยาลึกลับสุดลง ตัวอย่างของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง ได้แก่ เรซินอีพอกซี และเรซินพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว และเรซินฟีนอลิก เป็นต้น

ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมเหลวได้ จึงเป็นพอลิเมอร์ประเภทที่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ได้ การขึ้นรูปของพอลิเมอร์ประเภทนี้จึงเป็นการทำให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลว โดยการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ แล้วอัด ฉีด หรืออัดรีด ให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีรูปร่างตามแม่แบบที่ต้องการ จากนั้นพอลิเมอร์จะเกิดการคงตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ตัวอย่างของพอลิเมอร์ ประเภทนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ และพอลิอีเธอร์อีเธอร์คีโตน เป็นต้นสมบัติพื้นฐานของเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกถูกแสดงในตาราง 1

## 2.2 เมทริกซ์พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม (addition polymerization) ของมอนอเมอร์เอทิลีน (ดังภาพ 4) พอลิเอทิลีนถูกจำแนกได้เป็นประเภทย่อย ตามลักษณะโครงสร้างของโซ่โมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุล (Buscow and *et al.*, 2001) ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง มีผลึกสูง ทำให้มีความหนาแน่นสูง โดยสูงกว่า 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างเป็นโซ่กึ่ง จึงมีผลึกต่ำ มีผลทำให้ความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.91-0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ (linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นโคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนและอัลฟาโอเลฟิน (alpha-olefins) มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรงที่มีกิ่งสั้นของอัลฟาโอเลฟินยื่นออกมาจากสันหลังคาร์บอน มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูง (ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงมาก โดยสูงมากกว่า 3 ล้านขึ้นไป



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิเอทิลีน

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนคือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิกลาสส์แทรนซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ต่ำ ทำให้พอลิเอทิลีนเป็นของแข็งที่มีความอ่อนเหนียวที่อุณหภูมิห้อง มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ไม่สูงนัก โดยหลอมเหลวที่ 110 - 115 องศาเซลเซียสโดยประมาณสำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และหลอมเหลวที่ 120 - 135 องศาเซลเซียสโดยประมาณสำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว ค่อนข้าง



เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสูงมาก นิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เช่น ถูพลาสติก ขวดพลาสติก และฟิล์ม ซึ่งมีปริมาณการใช้งานสูง และกลายเป็นขยะครัวเรือนในปริมาณสูงตามไปด้วยพอลิเอทิลีนสามารถนำมาหลอมและตัดเป็นเม็ดใหม่ เพื่อทำเป็นเม็ดพลาสติก รีไซเคิลได้

### 3. กล่องบรรจุเครื่องดื่ม

โดยทั่วไป กล่องบรรจุเครื่องดื่มเป็นชั้นของวัสดุหลายๆชั้นอัดซ้อนเข้าด้วยกัน ประกอบด้วย ชั้นกระดาษ และชั้นพลาสติก กล่องบรรจุบางประเภทจะเพิ่มชั้นฟอยล์อะลูมิเนียมด้วย โดยทั่วไป กล่องบรรจุเครื่องดื่มแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ กล่องบรรจุเครื่องดื่มยูเอชที (shelf-stable carton) ซึ่งกล่องบรรจุเครื่องดื่มประเภทนี้ต้องการการเก็บรักษาที่ยาวนาน โดยไม่ต้องแช่เย็น จึงต้องเพิ่มชั้นของฟอยล์อะลูมิเนียมเพื่อป้องกันปัจจัยจากสภาวะภายนอกด้วย อีกประเภทหนึ่งคือกล่องบรรจุเครื่องดื่มพาสเจอร์ไรซ์ (refrigerated carton) ซึ่งปราศจากชั้นของฟอยล์อะลูมิเนียม ซึ่งเครื่องดื่มในกล่องบรรจุประเภทนี้จำเป็นต้องแช่เย็นอยู่ตลอดเวลา แต่ละชั้นของวัสดุองค์ประกอบที่มาอัดซ้อนกัน นั้นมีหน้าที่ต่างกัน ชั้นพอลิเอทิลีนด้านนอกและด้านในส่วนสัมผัสอาหารจะเป็นชั้นป้องกันของเหลวไม่ให้ผ่าน ชั้นกระดาษเป็นชั้นที่เสริมความแข็งแรงให้แก่กล่องบรรจุเพื่อการคงรูปและสะดวกในการจัดเรียง ชั้นอะลูมิเนียมเป็นชั้นที่ป้องกันแสง กลิ่น และออกซิเจนซึ่งอาจมีผลต่อคุณภาพสินค้าภายใน บรรจุภัณฑ์นอกจากนี้ยังมีชั้นพอลิเอทิลีนระหว่างชั้นของกระดาษและฟอยล์อะลูมิเนียม เพื่อการเพิ่มความสามารถในการยึดติดอีกด้วย (ศูนย์สร้างสรรค์งานออกแบบ, 2551) ตัวอย่างเช่น กล่องบรรจุเครื่องดื่มยูเอชที ของบริษัทเต็ดตรา แพ้ค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตกล่องบรรจุเครื่องดื่มที่มีส่วนแบ่งการตลาดสูง ประกอบด้วยชั้นกระดาษร้อยละ 75 ชั้นพลาสติกพอลิเอทิลีนร้อยละ 20 และชั้นอะลูมิเนียมร้อยละ 5 และกล่องบรรจุเครื่องดื่มพาสเจอร์ไรซ์ ประกอบด้วยชั้นกระดาษร้อยละ 91 พลาสติกพอลิเอทิลีนร้อยละ 9 เป็นต้น

การรีไซเคิลบรรจุภัณฑ์กล่องบรรจุเครื่องดื่มมีหลายวิธีการ ตัวอย่างเช่น การแยกเยื่อกระดาษที่อัดซ้อนอยู่แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้สารเคมีฟอกสีหมักพิมพ์ออก และการนำมาแยกส่วนประกอบและอัดด้วยความร้อนอีกครั้งเป็นแผ่นวัสดุเชิงประกอบ หรือที่รู้จักกันในชื่อ กรีนบอร์ด (greenboard) ซึ่งเป็นการนำเอากล่องเครื่องดื่มที่ใช้แล้วมาตัดเป็นชิ้นและทำการขึ้นรูปใหม่ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และทำการอัดลอนให้เกิดเป็นหลังคาลอน หรืออัดเป็นแผ่นเอนกประสงค์ใช้แทนพาดิกลบบอร์ดทั่วไป(ศูนย์สร้างสรรค์งานออกแบบ, 2008, Carton Council of Canada, 2013) นอกจากนี้ยังอาจมีการเติมวัสดุเสริมแรงอื่นๆเพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นวัสดุให้ดีขึ้นตามการประยุกต์ใช้งาน

ปัจจุบันมีโครงการหลังคาเขียวเพื่อมูลนิธิเพื่อนพึ่ง (ภาฯ) ยามยาก สภากาชาดไทย ซึ่งได้ทำการรับบริจาคกล่องบรรจุเครื่องดื่มและทำการรีไซเคิลโดยแปรรูปเป็นหลังคา เพื่อให้มูลนิธิฯใช้เพื่อผู้ประสบภัย และได้รับการสนับสนุนจากกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ศูนย์รีไซเคิลกล่องเครื่องดื่ม, 2557)

#### 4. การรีไซเคิลบรรจุภัณฑ์และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

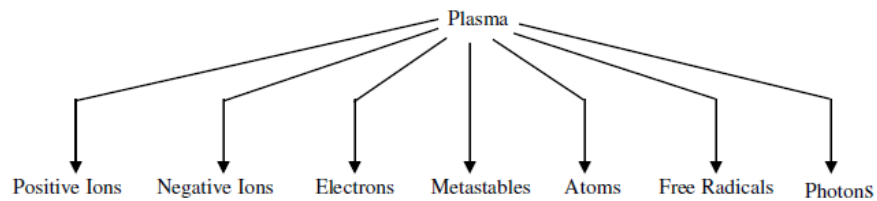
Xie, *et al.*, (2011) ได้ศึกษาเปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์กล่องนม 2 ชนิด ด้วยวิธีการประเมินค่าวงจรชีวิต (life cycle assessment) ระหว่างกล่องบรรจุภัณฑ์ที่เป็นแผ่นอัดซ้อนระหว่างเซลล์ลูโลสอะลูมิเนียม และพอลิเอทิลีน และบรรจุภัณฑ์พอลิเอทิลีนในประเทศจีน โดยพบว่า บรรจุภัณฑ์กล่องนมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าบรรจุภัณฑ์พลาสติกเล็กน้อย เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีระบบรีไซเคิลที่ดีสำหรับบรรจุภัณฑ์กล่องนมเปรียบเทียบกับระบบรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พลาสติก ดังนั้นแนวทางการลดปัญหาแนวทางหนึ่งคือการพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกชั้นพอลิเอทิลีนกับชั้นอะลูมิเนียม

Tue and Thwe, (2013) ได้ผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเอทิลีนรีไซเคิลและใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยจากแกลบ โดยมีการปรับปรุงเส้นใยจากแกลบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น และศึกษาสัดส่วนวัสดุเสริมแรง และสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป โดยพบว่าสัดส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบชนิดนี้คือที่สัดส่วนวัสดุเสริมแรงต่อเมทริกซ์เป็น 3:2 และที่สภาวะอุณหภูมิในการขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส และความดัน 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การปรับปรุงเส้นใยทั้งสองวิธีมีแนวโน้มจะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ดีขึ้น และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

Szabo, Koltai and Fodor, (2013) ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบการรีไซเคิลบรรจุภัณฑ์กล่องบรรจุเครื่องดื่ม 2 ประเภท คือประเภทที่มีพอยล์อะลูมิเนียม และประเภทปราศจากพอยล์อะลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคการบดละเอียดแบบแห้ง (dry grinding technology) โดยปราศจากการเติมสารเติมแต่ง และขึ้นรูปวัสดุใหม่ที่ได้จากการบดละเอียดด้วยวิธีการอัดด้วยความดันที่ 180 องศาเซลเซียส จากการศึกษาอนุภาคที่ได้ พบว่าส่วนประกอบของบรรจุภัณฑ์ที่มีพอยล์อะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบประกอบด้วยพอยล์อะลูมิเนียมร้อยละ 5.01 พอลิเอทิลีนร้อยละ 16.61 และกระดาษร้อยละ 78.38 ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่ปราศจากพอยล์อะลูมิเนียมประกอบด้วยพอลิเอทิลีนร้อยละ 11.43 และกระดาษร้อยละ 88.57 การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าร้อยละของพอลิเอทิลีนองค์ประกอบส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ วัสดุเชิงประกอบที่ได้จากบรรจุภัณฑ์ที่มีพอยล์อะลูมิเนียมซึ่งมีพอลิเอทิลีนเป็นองค์ประกอบมากกว่าถึงร้อยละ 33 แสดงความแข็งแรงด้านแรงดึงและการโค้งงอมากกว่าถึงร้อยละ 44 และ 51 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากบรรจุภัณฑ์ปราศจากพอยล์อะลูมิเนียม โดยระยะยืดสูงสุดของวัสดุทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกัน

#### 5. ระบบพลาสมา

ระบบพลาสมา (Plasma system) เป็นกระบวนการทางเคมี ร่วมกับกระบวนการทางไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบกันเป็นและเกิดปฏิกิริยาพลาสมา โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง จนทำให้สถานะของก๊าซเปลี่ยนไป โดยเป็นสถานะพลาสมาซึ่งอธิบายส่วนประกอบของพลาสมาได้จากในรูปที่ 2.4 (Vijay Nehra, Ashok Kumar and H K Dwivedi, 2008)



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของปฏิกิริยาพลาสมา

จากรูป 2.4 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของปฏิกิริยาพลาสมาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีหลายส่วนเช่น ไอออน อิเล็กตรอน อะตอม ราดิคอล หรือโปรตอน เป็นต้น นอกจากนั้นการเกิดปฏิกิริยาพลาสมานั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ หลักได้เป็นพลาสมาที่ไม่มีความร้อน (Non thermal plasma) และพลาสมาที่มีความร้อน (Thermal Plasma) โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 (Vijay Nehra, Ashok Kumar and H K Dwivedi, 2008) ซึ่งระบบพลาสมาทั้งสองแบบหลักๆที่ต่างกันจะสามารถอธิบายและนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

- Thermal Plasma (Quasi – equilibrium plasma) โดยทั่วไปจะมีค่าความร้อนสูง โดยทั่วไปใช้สำหรับงานกำจัดของเสีย แต่ไม่เหมาะกับงานด้านปรับปรุงคุณลักษณะต่างๆของวัสดุ
- Non thermal plasma (Non-equilibrium plasma) เป็นกระบวนการทางพลาสมาที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำ ความดันของต่ำ ทำให้ไม่เกิดผลกระทบกับองค์ประกอบต่างๆของวัสดุ ทำให้มีการประยุกต์ไปใช้ในทางด้านต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ประเภทของปฏิกิริยาพลาสมา

Plasma	State	Example
Thermal plasma (Quasi – equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Arc plasma, plasma torches, RF inductively coupled discharges
Non thermal plasma (Non-equilibrium plasma)	$T_e \gg T_i = T_g = 300 \dots 10^3 K$ $n_e \approx 10^{20} m^{-3}$	Glow, corona, APPJ, DBD, MHCD, plasma needle, etc.

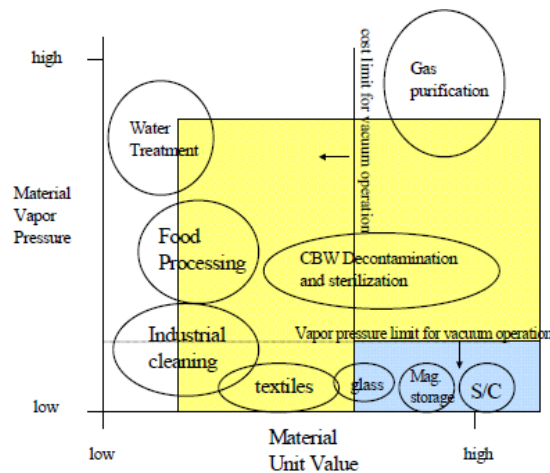
หมายเหตุ : APPJ คือ Atmospheric – pressure plasma jet

DBD คือ Dielectric barrier discharge

MHCD คือ Micro hollow cathode discharge

สำหรับงานด้านปรับปรุงคุณลักษณะของวัสดุโดยมากจะใช้พลาสมาที่ไม่มีความร้อน เนื่องจากไม่เกิดผลกระทบกับองค์ประกอบต่างๆของวัสดุดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนั้นระบบพลาสมาดังกล่าวยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น ขบวนการผลิตอาหาร ผ้า หรือน้ำ ที่ต้องการทำให้เกิดความสะอาด และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเรื่องการฟอกอากาศ ซึ่งการประยุกต์ใช้

งานในแต่ละส่วนต้องคำนึงถึงความดันและลักษณะของวัสดุที่จะกระทำด้วย โดยในรูปที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.3 (Selwyn G. S., H. W. Herrmann, J. Park and I. Henins, 2001) แสดงถึงการประยุกต์ใช้งาน Non thermal plasma ในงานต่างๆ รวมทั้งส่วนประกอบที่เกิดขึ้นในระบบของพลาสมาจากการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ



รูปที่ 2.5. การประยุกต์ใช้งาน Non thermal plasma ในงานต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของพลาสมาจากการประยุกต์ใช้งาน

Material/Substrate	Plasma Component	Desired Product
Semiconductor substrates	Active neutral and ionic species generated by electron impact	Etching, thin film deposition, stripping, cleaning
Magnetic Storage Media	Sputtered atoms generated by ion bombardment of the target	Magnetic thin films, anti-corrosive coatings
Glass	Thin film chemical precursors, neutrals	Energy efficient coatings
Textiles	Ion bombardment, active neutrals	Increased wettability, wear properties,
Industrial Cleaning	Oxygen atoms, ions	Oxidation and removal of organic films
Food Processing/ Decontamination of CBW Agents/Medical Equipment Sterilization	O, O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H, OH: chemical reactions initiated by plasma chemistry	Destruction or denature of pathogens, prions; chemical destruction of toxins
Water/Wastewater Treatment	O, O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O <sub>3</sub> , OH: chemical reactions initiated by plasma chemistry	Removal or destruction of water contaminants, pathogens, and reduction of biological oxygen demand (BOD)

โดยที่ปฏิกิริยาการเกิดพลาสมามีขั้นตอนหลักๆ คือการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง จากนั้นพลังงานที่ส่งไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม (Ionization) กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีปริมาณที่มากทำให้เกิดแก๊สแตกตัวและเป็นพลาสมา โดยปฏิกิริยาการเกิดพลาสมาแสดงได้ดังนี้

- Ionization เป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลประจุลบหรือบวกมีการเปลี่ยนแปลงโดยทำการรับหรือเสียอิเล็กตรอนจากไอออนโดยมี Reaction เช่น
 
$$A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$$

$$AB + e^- \rightarrow AB^+ + 2e^-$$
- Excitation เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมอยู่ในสภาพกระตุ้น (เกิดเมื่อ  $e^-$  ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าโดยมี Reaction เช่น
 
$$A + e^- \rightarrow A^* + e^-$$

$$AB + e^- \rightarrow AB^* + e^-$$
- Dissociation เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัว โดยผลของการแตกตัวจะเกิดเป็นราดิคัล (Radical) โดยมี Reaction เช่น
 
$$AB + e^- \rightarrow A + B + e^-$$
- Dissociative ionization เป็นกระบวนการ Dissociation ที่เกิดควบคู่กับการ Ionization โดยมี Reaction เช่น
 
$$A^* + e \rightarrow A^+ + 2e$$

$$AB^* + e \rightarrow A^+ + B + 2e$$

การเกิดพลาสมาขึ้นในระบบโดยใช้ chemical reaction ในสมการที่ 2.1-2.5 เป็นตัวอย่างในการอธิบายถึงกลไกในการเกิดพลาสมาซึ่งแสดงให้เห็นถึงขบวนการเกิดปฏิกิริยา (ณัฐที่ ถึงสุข, 2558)



จากสมการที่ 2.1-2.5 สังเกตได้ว่าจะต้องมีอิเล็กตรอนเข้าไปชนกับก๊าซ จากนั้นจึงเกิดการแตกตัวของก๊าซ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในสายส่งไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจนไปเกิดเป็นปฏิกิริยาดังกล่าว นอกจากนั้นยังมีปฏิกิริยาและกลไกการเกิดพลาสมาอีกหลายแบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 และปฏิกิริยาของพลาสมาที่พื้นผิวซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.5 (Vijay Nehra, Ashok Kumar and H K Dwivedi, 2008)

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาพลาสมา

Name	Reactions	Description
Excitation of atoms or molecules	$e + A_2 \rightarrow A_2^* + e$ $e + A \rightarrow A^* + e$	Leads to electronically excited state of atoms and molecules by energetic electron impact.
De-excitation	$e + A_2^* \rightarrow A_2 + e + h\nu$	Electronically excited state emits electromagnetic radiations on returning to the ground state.
Ionization	$e + A_2 \rightarrow A_2^+ + e$	Energetic electrons ionize neutral species through electron detachment and positively charged particles are formed.
Dissociation	$e + A_2 \rightarrow 2A + e$	Inelastic electron impact with a molecule causes its dissociation without ions.
Dissociative attachment	$e + A_2 \rightarrow A^- + A + e$	Negative ions are formed when free electrons attach themselves to neutral species.
Dissociative ionization	$e + A_2 \rightarrow A^+ + e$	Negative ions can also be produced by dissociative ionization reactions.
Volume recombination	$e + A + B \rightarrow A + B$	Loss of charged particles from the plasma by recombination of opposite charges.
Penning dissociation	$M^* + A_2 \rightarrow 2A + M$	Collision of energetic metastable species with neutral leads to ionization or dissociation.
Penning ionization	$M^* + A \rightarrow A^+ + M + e$	
Charge exchange	$A^+ + B \rightarrow B^+ + A$	Transfer of charge from incident ion to the target neutral between two identical or dissimilar partners.
Recombination of ions	$A^- + B^+ \rightarrow AB$	Two colliding ions recombine to form a molecule.
Electron-ion recombination	$e + A_2^+ + M \rightarrow A_2 + M$	Charge particles are lost from the plasma by recombination of opposite charges.
Ion-ion recombination	$A^+ + B^- + M \rightarrow AB + M$	Ion-ion recombination can take place through three body collisions.

ตารางที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่พื้นผิว

Name	Reactions	Description
Etching	$AB + C_{solid} \rightarrow A + BC_{vapour}$	Material erosion.
Adsorption	$M_g + S \rightarrow M_s$ $R_g + S \rightarrow R_s$	Molecules or radicals from a plasma come in contact with a surface exposed to the plasma and are adsorbed on surfaces.
Deposition	$AB \rightarrow A + B_{solid}$	Thin film formation.
Recombination	$S - A + A \rightarrow S + A_2$ $S - R + R_1 \rightarrow S + M$	Atoms or radicals from the plasma can react with the species already adsorbed on the surface to combine and form a compound.
Metastable de-excitation	$S + A^* \rightarrow A$	Excited species on collision with a solid surface return to the ground state.
Sputtering	$S - B + A^+ \rightarrow S^+ + B + A$	Positive ions accelerated from the plasma towards the surface with sufficient energy can remove an atom from the surface.
Polymerization	$R_g + R_s \rightarrow P_s$ $M_g + R_s \rightarrow P_s$	Radicals in the plasma can react with radicals adsorbed on the surface and form polymers.

จากที่ได้กล่าวมานั้นพบว่า การที่จะทำให้เกิดพลาสมานั้นต้องมีการให้พลังงานที่สูงในสนามไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ของไฟฟ้าในแก๊สเพื่อทำให้แก๊สทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเกิดเป็นพลาสมา โดยที่แรงดันเบรกดาวน์ในแก๊สสามารถหาได้จากกฎของ Paschen ดังสมการที่ 2.6

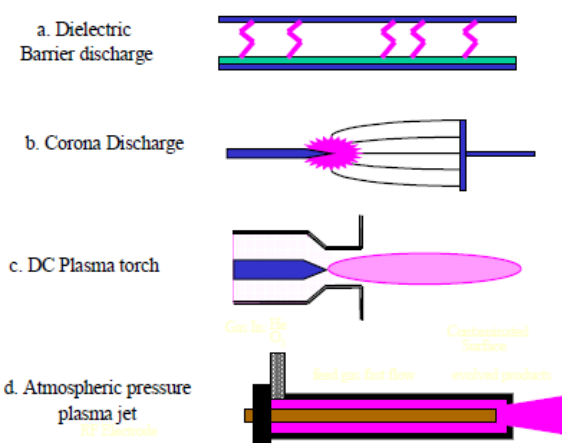
$$V_b = \frac{Bpd}{\{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma})]\}} \quad (2.6)$$

ถ้าต้องการให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดหรือตัวกลางใดๆ ให้สูงขึ้นจนทำให้เกิดแรงดันวิกฤติ (Critical voltage) โดยแรงดันไฟฟ้าวิกฤติแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (Disruptive critical voltage) กับ แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (Visual critical voltage) โดยอธิบายได้ดังนี้

- 1) แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (Disruptive critical voltage) เป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดระหว่างสายที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวของอากาศเนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ในอากาศได้รับผลจากความเข้มสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดพลังงานจลน์วิ่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระและไอออนขึ้น
- 2) แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (Visual critical voltage) เป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าวิกฤติที่สูงกว่าค่าแรก ซึ่งเกิดจากการชนของอิเล็กตรอนอิสระทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลแตกตัวหลุดออกไปและวิ่งไปชนโมเลกุลอื่นๆ ในกรณีนี้จะเป็นใช้ Chemical reaction เข้า

มาอธิบายปรากฏการณ์การเกิดพลาสมาได้ ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาในสถานะที่อำนวยการ

ด้วยการให้สนามไฟฟ้าที่สูงจนทำให้เกิดพลาสมาได้นั้นในระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศต้องมีอิเล็กโทรดที่ทำให้เกิดพลาสมาในบริเวณ (Plasma region) ซึ่งมีเทคนิคของระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศต่างๆ เช่น Corona Discharge, APPJ คือ Atmospheric – pressure plasma jet , DBD คือ Dielectric barrier discharge หรือ MHCD คือ Micro hollow cathode discharge ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 (Selwyn G. S., H. W. Herrmann, J. Park and I. Henins, 2001)



รูปที่ 2.6 เทคนิคของระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

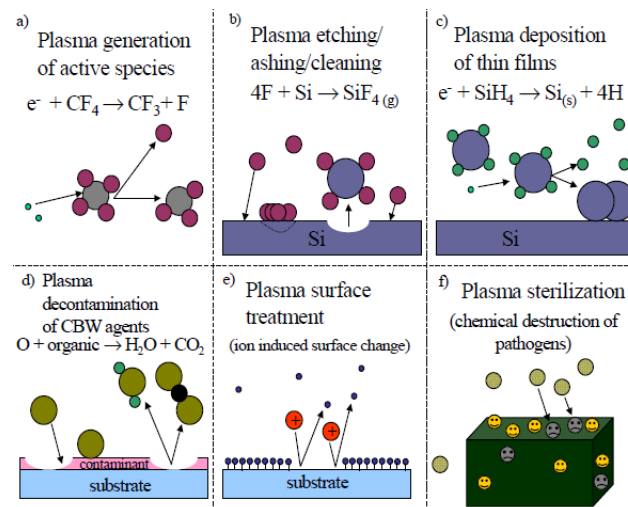
ตารางที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการ Atmospheric Non – Thermal Plasma

Parameters	Corona Discharge	DBD	APPJ	Atmospheric glow MHCD
Method and Type	Sharply pointed electrode	Dielectric barrier on cover electrodes	RF capacitively coupled	DC glow with micro hollow cathode electrode
Excitation	Pulsed DC	AC or RF	RF 13.5 MHz	DC
Pressure (bar)	1bar	1bar	760 torr	1bar
Electron energies (eV)	5 variable	1-10	1-2	.....
Electron Density, cm <sup>-3</sup>	10 <sup>9</sup> -10 <sup>13</sup> variable	≈10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup>	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>	
Breakdown Voltage (kV)	10-50	5-25	0.05-0.2	.....
Scalability & Flexibility	No	Yes	Yes	Yes
T <sub>max</sub> Temp T (K)	Room	Average gas Temp (300)	400	2000
Gas	.....	N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> + NO+ Rare gas/Rare gas halides	Helium, Argon	Rare gas Rare gas halides



ตารางที่ 2.6 ได้แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับในกระบวนการทำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในแบบต่างๆ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ต่างกันก็ทำให้การใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ต่างๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้เช่น แหล่งกำเนิดพลาสมา ความดัน แรงดันเบรกดาวน หรือก๊าซที่ใช้ในระบบ

รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อเกิดกระบวนการพลาสมาในลักษณะต่าง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการทำทรีตเมนต์พื้นผิวด้วยพลาสมา (Plasma surface treatment) และการช่วยในการยึดเกาะพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังรูป 2.8 (b) และ (e) (Selwyn G. S., H. W. Herrmann, J. Park and I. Henins, 2001)



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อเกิดกระบวนการพลาสมา