

บทที่ 2

ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุประกอบ (Composites material) [1]

ปัจจุบันพัฒนาการด้านวัสดุได้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากกลุ่มพอลิเมอร์ โลหะและเซรามิกแล้ว ยังมีวัสดุที่สามารถจัดได้เป็นอีกกลุ่มใหญ่เพิ่มเติมจากสามกลุ่มหลักข้างต้นคือกลุ่ม วัสดุประกอบ คือ “วัสดุที่เกิดจากการรวมกันหรือผสมกันขององค์ประกอบ (จุลภาคหรือมหภาค) ที่มีสมบัติทางเคมีและโครงสร้างที่ต่างกันตั้งแต่สององค์ประกอบขึ้นไป” ซึ่งองค์ประกอบที่มาผสมกันเหล่านั้นจะไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยวัสดุประกอบที่ได้เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ซึ่งโดยทั่วไปและจะมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุต้นทางที่นำมาผสมกัน

วัตถุประสงค์ของการทำวัสดุประกอบเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุที่มีสมบัติรวมเหนือกว่าสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ หรือเป็นไปตามต้องการ โดยไม่สามารถหาได้จากการใช้องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเพียงองค์ประกอบเดียว องค์ประกอบในวัสดุประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ประโยชน์ของวัสดุประกอบสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการบิน กีฬา ก่อสร้าง เคมีและอื่นๆ

2.2 เมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง (Matrices and Reinforcements)

2.2.1 เมทริกซ์ (Matrices)

เมทริกซ์คือวัสดุหรือองค์ประกอบของวัสดุประกอบที่มีเฟสต่อเนื่อง โดยทั่วไปสำหรับวัสดุประกอบแล้วจะมีปริมาณมากกว่าส่วนเสริมแรง แต่ก็ไม่เสมอไป เมทริกซ์ทำหน้าที่ทั้งเป็นที่อยู่ ปกป้องและยึดเหนี่ยวส่วนเสริมแรงรวมทั้งถ่ายทอดภาระจากภายนอกที่กระทำไปยังส่วนเสริมแรงซึ่งส่วนใหญ่รับภาระได้มากกว่าส่วนของเมทริกซ์ วัสดุที่ใช้ทำเมทริกซ์ เช่น พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิก และคาร์บอน เป็นต้น สำหรับกลุ่มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเมทริกซ์ประกอบด้วยทั้ง เทอร์โมเซต (thermosets) เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) และยาง (rubbers) ซึ่งข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่ละกลุ่มของเมทริกซ์ข้างต้นสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลายๆ ชนิดเช่น

2.2.1.1 กลุ่มเทอร์โมเซต ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ พอลิไอไมด์ และฟีนอลิก เป็นต้น ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมเซต

2.2.1.2 กลุ่มเทอร์โมพลาสติกได้แก่ อคริลิก ไนลอน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน และพอลิอีเธอร์อีเธอร์คีโตน เป็นต้น

2.2.1.3 กลุ่มยาง ได้แก่ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ยางบิวทาไดอิน สไตรีน ไอโซพรีน และ ไนโตรลหรือยางเอ็นบีอาร์ ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของอะครีโลไนโตรล และบิวทาไดอิน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบช่วงของสมบัติระหว่างเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก [1]

Properties	Thermosets	Thermoplastics
Young's modulus (GPa)	1.3-6.0	1.0-4.8
Tensile strength (MPa)	20-180	40-190
Flexural toughness $k_{lc} (MPa.m^{\frac{1}{2}})$	0.5-1.0	1.5-6.0
$G_{lc} (kJ / m^{\frac{1}{2}})$	0.02-0.2	0.7-6.5
Maximum service temperature (°C)	50-450	25-230

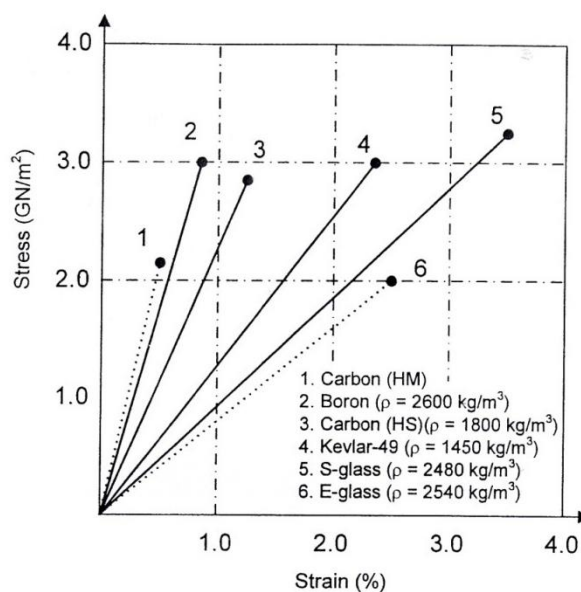
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตต่างๆ [1]

Properties	Epoxy	Polyester	Phenolics	Polyamides
Density (Mg / m^3)	1.1-1.4	1.1-1.5	1.3	1.2-1.9
Young's modulus (GPa)	2.1-6.0	1.3-4.5	4.4	3-3.1
Tensile strength (MPa)	35-90	45-85	50-60	80-190
Flexural toughness $k_{lc} (MPa.m^{\frac{1}{2}})$	0.6-1.0	0.5	-	-
$G_{lc} (kJ / m^{\frac{1}{2}})$	0.02	-	-	0.3-0.39
Thermal expansion ($(10^{-6} K^{-1})$)	55-110	100-200	45-110	14-90
Glass trans. Temp. (°C)	120-190	-	-	-

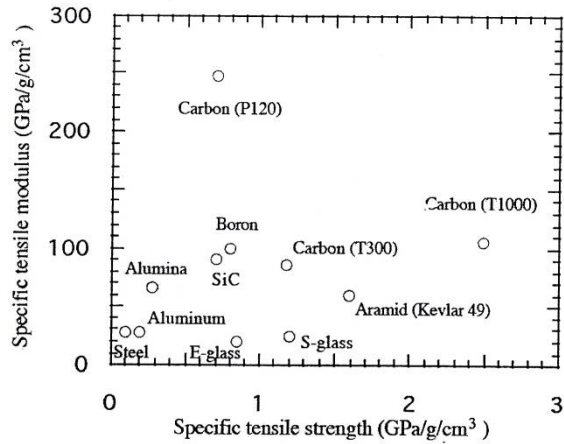
2.2.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcements)

เป็นวัสดุหรือตัวเติมที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเมทริกซ์ เช่น ความแข็ง (hardness) ความแข็งแรง (strength) และความแข็งเกร็ง (stiffness) ให้เพิ่มขึ้นซึ่งบางครั้งเรียกวัสดุหรือตัวเติมนี้ว่าตัวเสริมประสิทธิภาพหรือเสริมแรง (reinforcement) ถ้าบรรลู่วัตถุประสงค์ข้างต้น ซึ่งเป็นได้ทั้งสารเคมีที่มีอนุภาคที่เล็กมากและเส้นใยเสริมแรงต่างๆ แต่บางกรณีพบว่าสัดส่วนที่เติมลงในเมทริกซ์น้อยกว่าส่วนของเมทริกซ์ มักเรียกกันทั่วไปว่า ตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพหรือไม่เสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต โลหะที่เติมลงในเมทริกซ์ของเซรามิก ตลอดจนยางที่เติมในพลาสติก เป็นต้น

ในด้านการใช้งานแล้ววัสดุประกอบที่สำคัญที่สุดได้แก่วัสดุประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยที่ใช้มีหลากหลายชนิดดังตัวอย่างของเส้นใยและสมบัติแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 จุดมุ่งหมายของการทำวัสดุประกอบประเภทนี้เพื่อให้ความแข็งแรงและแข็งเกร็งสูงในน้ำหนักอันจำกัด โดยมักแสดงในรูปของความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และความแข็งเกร็งหรือมอดูลัสจำเพาะ (specific stiffness or modulus) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดังนั้นวัสดุประกอบที่มีความแข็งแรงและแข็งเกร็งจำเพาะสูงสามารถทำจากเมทริกซ์และเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาได้ อย่างไรก็ตามความยาวของเส้นใยและการจัดเรียงตัวเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติของวัสดุประกอบเช่นกัน



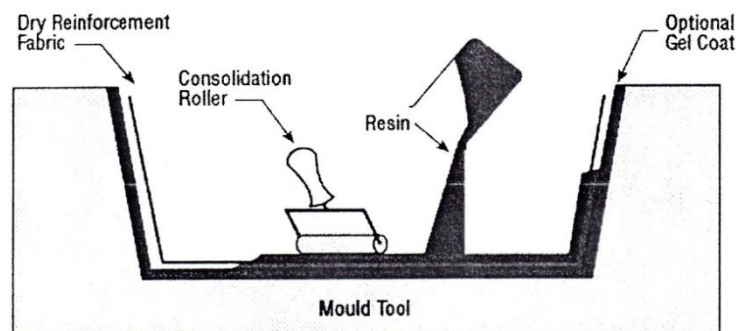
ภาพที่ 2.1 เปรียบเทียบเส้นใยเสริมแรงชนิดต่างๆ [1]



ภาพที่ 2.2 ความแข็งแรงและความแข็งเกร็งจำเพาะของวัสดุที่ทำจากเส้นใยชนิดต่างๆ [1]

2.3 การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือ (Hand Lay-up Molding)

เป็นการบวนการขึ้นรูปที่ทำได้ง่าย ต้นทุนถูกแต่เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและแรงงานมาก สามารถทำได้โดยการวางส่วนเสริมแรง (โดยทั่วไปเป็นเส้นใย) ลงในแม่พิมพ์และทาทับด้วยเรซินพร้อมกับใช้ลูกกลิ้งรีดให้เรซินซึมผ่านลงในช่องว่างของตัวเสริมแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 การขึ้นรูปสามารถทำซ้ำๆ หลายๆ ชั้นเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ ในการทำวัสดุประกอบใช้สำหรับอากาศยานมักใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูปเบื้องต้นก่อนใช้เครื่องอัดความดันและความร้อน หรือห้องบ่มอัดความดัน (autoclave) ต่อไป วิธีการนี้ยังมีข้อดีในเรื่องการจัดเรียงเส้นใยที่ทำได้ง่าย ตลอดถึงทำชิ้นงานที่รูปทรงซับซ้อนได้ แต่ส่วนใหญ่มักจะใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุคอมพอสิตทั่วไป เช่น เรือไฟเบอร์กลาสและอ่างอาบน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือและตัวอย่างชิ้นงาน [1]

2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูป

2.3.1.1 เตรียมแม่แบบ โดยการล้างทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำหรือผ้าเช็ดทำความสะอาดก็ได้ แล้วปล่อยให้แห้ง

2.3.1.2 ขัดผิวหน้าด้วยขี้ผึ้งขัดผิว เพื่อให้ผิวหน้ามันเรียบ

2.3.1.3 ทาและขัดขี้ผึ้ง เพื่อให้ผิวหน้าเรียบและมันยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เป็นตัวถอดแบบขั้นต้นด้วย

2.3.1.4 ทาหรือพ่นสีผิวหน้าเจลโค้ตแล้วทิ้งให้แข็งตัว

2.3.1.5 วางผืนใยแก้วทับลงไป

2.3.1.6 ใช้แปรงหรือลูกกลิ้งจุ่มโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ทาหรือกลิ้งไปบนผืนใยแก้วให้ทั่ว ทิ้งให้โพลีเอสเตอร์เรซินแข็งตัวจึงตัดขอบ แล้วใช้ผ้าทรายลูบผิวด้านหยาบให้เรียบ

2.3.1.7 หากต้องการให้ชิ้นงานมีความหนาและมีความแข็งแรงมากขึ้น ให้วางผืนใยแก้วทับลงไปอีกและทาหรือกลิ้งโพลีเอสเตอร์เรซินจนทั่ว สลับกันจนได้ความหนาที่ต้องการแล้ว ปล่อยให้แห้งให้แข็งตัว

2.3.1.8 ตัดขอบใยแก้วที่ขึ้นออกมาจากแม่แบบ

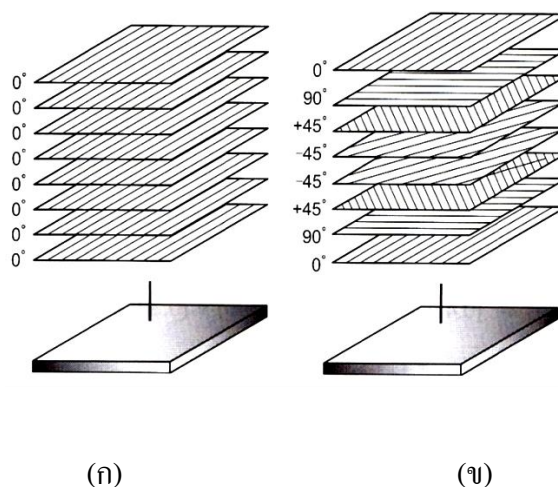
2.3.1.9 เมื่อชิ้นงานแข็งตัวได้ที่แล้วจึงถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยใช้ลิ้มไม้ น้ำอัด หรือลมอัด

2.3.1.10 ขัดตกแต่งขอบชิ้นงานให้เรียบ แล้วนำไปประกอบหรือต่อเติมชิ้นส่วนอื่นๆ

2.4 การจัดเรียงตัวของเส้นใย [2]

การเรียงตัวของเส้นใยภายในเมทริกซ์นั้นทำได้หลายวิธีด้วยกัน กรณีเส้นใยที่มีขนาดสั้น และเรียงตัวในเมทริกซ์ไม่เป็นระเบียบ จะทำให้ค่าอัตราส่วนของความยาวต่อความโตต่ำ แต่การผลิตของวัสดุจะทำได้ง่าย โดยเฉพาะขั้นตอนการใส่เส้นใยลงในเมทริกซ์ อีกทั้งการกระจายตัวของความแข็งแรงก็จะมีอย่างสม่ำเสมอตลอดในเนื้อของวัสดุผสมด้วย

เส้นใยที่ยาวต่อเนื่องและเรียงตัวกันในทิศทางเดียวจะให้คุณสมบัติการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทุกด้าน หากเราต้องการวัสดุที่ต้องการรับแรงหลายๆทิศทาง เราสามารถทำได้โดยจัดเรียงทิศทางของเส้นใยที่มีมุมแตกต่างกัน โดยใช้ใยที่มีความยาวต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 (ก) การเรียงตัวกันของเส้นใยในทิศทางเดียว (ข) การเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันเพื่อกระจายความแข็งแรงให้กับทุกๆด้าน [2]

2.5 กลศาสตร์ของวัสดุประกอบ (Mechanics of Composites)

2.5.1 สัดส่วนน้ำหนักและสัดส่วนปริมาตร (Weight and Volume Fractions)

สมบัติโดยรวมส่วนใหญ่ของวัสดุประกอบเกี่ยวข้องกับทั้งสมบัติและปริมาณของแต่ละองค์ประกอบที่ประกอบขึ้นเป็นวัสดุประกอบนั้น สำหรับสัดส่วนน้ำหนัก (Weight fraction, w_p) นั้นทั่วไปใช้ประโยชน์ในการเตรียมปริมาณสาร ในการขึ้นรูปแต่สำหรับสัดส่วนปริมาตร (volume fraction, v_p) มักใช้ในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบมากกว่าการใช้สัดส่วนน้ำหนัก และสัดส่วนปริมาตรสัมพันธ์กับน้ำหนัก (W) และปริมาตร (V) ของแต่ละองค์ประกอบ เมื่อ c แทนวัสดุประกอบ f แทนส่วนเสริมแรง และ m แทนเมทริกซ์ ดังนี้

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} \quad \text{และ} \quad w_m = \frac{W_m}{W_c} \quad (2.1)$$

และ

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad \text{และ} \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (2.2)$$

จะได้ว่า

$$w_f + w_m = 1 \quad (2.3)$$

และ

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.4)$$

โดยที่	w_f	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเส้นใย
	w_m	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเมทริกซ์
	V_f	คือ สัดส่วนปริมาตรของเส้นใย
	V_m	คือ สัดส่วนปริมาตรของเมทริกซ์
	W_f	คือ น้ำหนักของเส้นใย
	W_c	คือ น้ำหนักของวัสดุประกอบ
	w_m	คือ น้ำหนักของเมทริกซ์
	V_f	คือ ปริมาตรของเส้นใย
	V_c	คือ ปริมาตรของวัสดุประกอบ
	V_m	คือ ปริมาตรของเมทริกซ์

สัดส่วนน้ำหนักและสัดส่วนปริมาตรสามารถโยงความสัมพันธ์ด้วยความหนาแน่นจาก

$$W_c = W_f + W_m \quad (2.5)$$

และ

$$W = \rho V \quad (2.6)$$

ดังนั้น

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.7)$$

$$\rho_c = \rho_f \left(\frac{V_f}{V_c} \right) + \rho_m \left(\frac{V_m}{V_c} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_c คือ ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ
 ρ_f คือ ความหนาแน่นของเส้นใย
 ρ_m คือ ความหนาแน่นของเมทริกซ์

และจาก

$$V_c = V_f + V_m \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) จะได้

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (2.11)$$

หรือ

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.4) และ (2.12) จะได้ว่า

$$V_f = \frac{w_f \rho_c}{\rho_f} s \quad (2.13)$$

และ

$$V_m = \frac{w_m \rho_c}{\rho_m} \quad (2.14)$$

2.5.2 กลศาสตร์จุลภาคของวัสดุประกอบ (Micromechanics of Composite Materials)

2.5.2.1 กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรงของวัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Micromechanics For Fiber Reinforced Composites)

ในเบื้องต้นนี้จะวิเคราะห์ถึงกลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุประกอบที่ประกอบขึ้นจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยวางในทิศใดทิศหนึ่งเพียงทิศเดียว (unidirectional Composites) เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ขั้นสูงของวัสดุประกอบที่มีการจัดเรียงเส้นใยในหลายทิศทางและหลายๆชั้น (laminated Composites) ต่อไป

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรงตามแนวแกนเส้นใย (Micromechanics for longitudinal stiffness) แบบจำลองการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 2.5 สมมติให้เมทริกซ์และเส้นใยสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกันแบบสมบูรณ์ (Perfect Bonding) โดยไม่มีการลื่นไถลของผิวสัมผัสแยกจากกันเมื่อ P_c คือแรงที่กระทำกับหน้าตัด σ คือความเค้น และ A คือพื้นที่หน้าตัด จากแบบจำลองข้างต้นความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุประกอบ ความเครียดในเส้นใย และความเครียดในเมทริกซ์มีค่าเท่ากัน จากแบบจำลองข้างต้นเขียนความสัมพันธ์ได้

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (2.15)$$

โดยที่

ϵ_c คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุประกอบ

ϵ_f คือ ความเครียดในเส้นใย

ϵ_m คือ ความเครียดในเมทริกซ์

ภาระที่กระทำต่อเส้นใยและภาระที่กระทำต่อเมทริกซ์ดังแสดงในสมการที่ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ

$$P_f = \sigma_f A_f \quad (2.16)$$

$$P_m = \sigma_m A_m \quad (2.17)$$

โดยที่ P_f คือ ภาระที่กระทำต่อเส้นใย
 P_m คือ ภาระที่กระทำต่อเมทริกซ์
 P_c คือ ภาระที่กระทำต่อวัสดุประกอบ

ส่วนภาระที่กระทำต่อวัสดุประกอบ เขียนได้เป็น

$$P_c = \sigma_c A_c \quad (2.18)$$

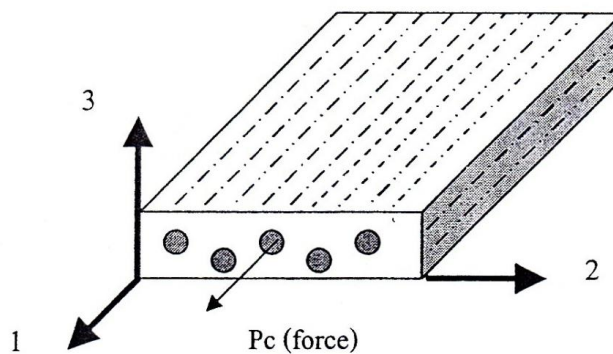
เมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล

$$P_c = P_f + P_m \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.20)$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_f A_f}{A_c} + \frac{\sigma_m A_m}{A_c} \quad (2.21)$$



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวแกนของเส้นใย [2]

สำหรับเส้นใยความยาวเท่ากันและวางในแนวเดียวกันสัดส่วนพื้นที่ของเส้นใยเท่ากับสัดส่วนของปริมาตรดังนั้น

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} \text{ และ } V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.22)$$

จะได้ว่า

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.23)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) และ E_c คือมอดุลัสของวัสดุประกอบตามแนวแกนเส้นใย ส่วน E_f คือ มอดุลัสของเส้นใยตามแนวแกน และ E_m คือมอดุลัสของเมทริกซ์จะได้

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c, \sigma_f = E_f \epsilon_f, \sigma_m = E_m \epsilon_m \quad (2.24)$$

นำสมการ (2.24) แทนใน (2.23) จะได้ว่า

$$E_c \epsilon_c = E_f \epsilon_f V_f + E_m \epsilon_m V_m \quad (2.25)$$

เมื่อ $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$ ดังนั้น

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.26)$$

ซึ่งสมการ (2.26) อยู่ในรูปเดียวกับสมการของผสมดังที่กล่าวมาแล้วและเมื่อวัสดุประกอบมีองค์ประกอบของเส้นใยและเมทริกซ์มากกว่าอย่างละหนึ่งองค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้เป็น

$$E_c = \sum_i E_f V_f + \sum_j E_m V_m \quad (2.27)$$

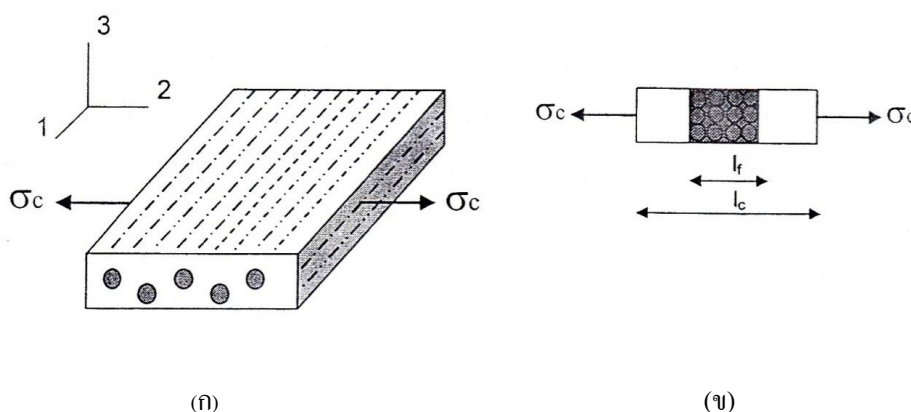
หมายเหตุ: สำหรับสมการ (2.27) จะใช้ได้ดีกับการทำนายผลจากการทดสอบสมบัติการดึงที่เส้นใยที่ยึดตัวเมื่อมีภาระกระทำ แต่ในกรณีการอัดแล้วก่อให้เกิดการยุบตัวของเส้นใย (misalignment) ส่งผลให้การทำนายคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงมาก

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งเกร็งตามแนวขวางแกนเส้นใย (Micromechanics for transverse stiffness) เมื่อพิจารณาถึงแรงหรือความเค้น σ_c ที่กระทำต่อวัสดุประกอบในแนวขวางกับแกนเส้นใยดังแบบจำลองแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) ซึ่งเขียนส่วนหน้าตัดแทนใหม่ด้วยแบบจำลอง ดังรูป 2.6 (ข) จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสัดส่วนความยาวของหน้าตัดเป็นค่าเดียวกับสัดส่วนปริมาตร $\left(\frac{l_f}{l_c} = \frac{v_f}{v_c}\right)$ ในกรณีนี้แรงหรือความเค้นมีค่าคงที่ตลอดความยาวของหน้าตัด ส่วนการยึดตัวตามแนวขวางเขียนได้เป็น

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.28)$$

โดยที่ δ_c คือ การยึดตัวตามแนวขวางของวัสดุประกอบ
 δ_f คือ การยึดตัวตามแนวขวางเส้นใย
 δ_m คือ การยึดตัวตามแนวขวางเมทริกซ์

$$\epsilon_c l_c = \epsilon_f l_f + \epsilon_m l_m \quad (2.29)$$



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวขวางกับแกนของเส้นใย [2]

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \frac{l_f}{l_c} + \varepsilon_m \frac{l_m}{l_c} \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$V_f = \frac{l_f}{l_c} \text{ และ } V_m = \frac{l_m}{l_c} \quad (2.31)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (2.32)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น $\sigma = E\varepsilon$ ดังนั้น

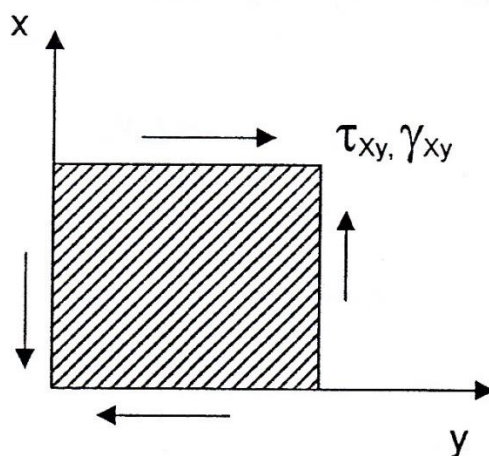
$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m \quad (2.33)$$

เมื่อ $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$ ดังนั้น

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.34)$$

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งเกร็งการเฉือน (Micromechanics for shear stiffness) ในทำนองเดียวกับการหามอดูลัสตามแนวขวาง การหามอดูลัสเฉือนสามารถใช้โมเดลแสดงในภาพที่ 2.7 และสมการสำหรับมอดูลัสเฉือน ดังแสดงในสมการที่ (2.35) จะเห็นได้ว่า G_{12} ขึ้นกับ G_m เป็นหลัก (เช่นเดียวกับ E_{22} ที่ขึ้นอยู่กับ E_m นั่นเอง) ในทางปฏิบัติแล้วค่า G_f อาจหาจากการคำนวณด้วยค่า E_f และ V_f

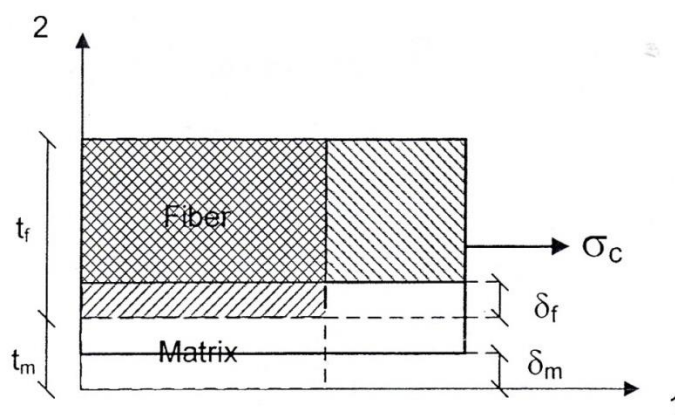
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.35)$$



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับการเฉือน [2]

2.5.2.2 ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν)

ในการทำงานเกี่ยวกับการหามอดูลัสตามแนวแกนของเส้นใย การหาอัตราส่วนปัวซองสามารถใช้โมเดลดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับหาอัตราส่วนปัวซอง [2]

จากแบบจำลองดังรูปจะได้ว่า

$$\delta_f = t_f (\epsilon_{22})_f = -t_f \nu_f \epsilon_f \quad (2.36)$$

$$\delta_m = t_m (\epsilon_{22})_m = -t_m \nu_m \epsilon_m \quad (2.37)$$

$$\delta_c = t_c (\epsilon_{22})_c = -t_c v_c \epsilon_c \quad (2.38)$$

จาก $\delta_c = \delta_f = \delta_m$ และ $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$

ดังนั้น

$$t_c V_{12} = t_f V_f + t_m V_m \quad (2.39)$$

$$V_{12} = \frac{t_f}{t_c} V_f + \frac{t_m}{t_c} V_m \quad (2.40)$$

เนื่องจาก $\frac{t_f}{t_c} = v_f$ และ $\frac{t_m}{t_c} = v_m$

ดังนั้น

$$V_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (2.41)$$

2.6 มาตรฐานสากลในการทดสอบรถยนต์ [3]

ในการศึกษาการเสียหายของโครงสร้างยานยนต์นั้น ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างจริงจังและแพร่หลายในต่างประเทศ โดยมีมาตรฐานการทดสอบการชนแบบต่างๆ หรือแม้แต่ในการทดสอบการชนจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ในประเทศอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังได้มีการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบรถยนต์ไว้หลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานด้านความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (Federal Motor Vehicle Safety Standard, FMVSS) มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่ (New Car Assessment Program, NCAP) และมาตรฐานด้านความปลอดภัยบนทางด่วน (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างยานยนต์ภายใต้การชนกระแทกนั้นมีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดแต่ละมาตรฐานดังนี้

2.6.1 มาตรฐานความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (FMVSS)

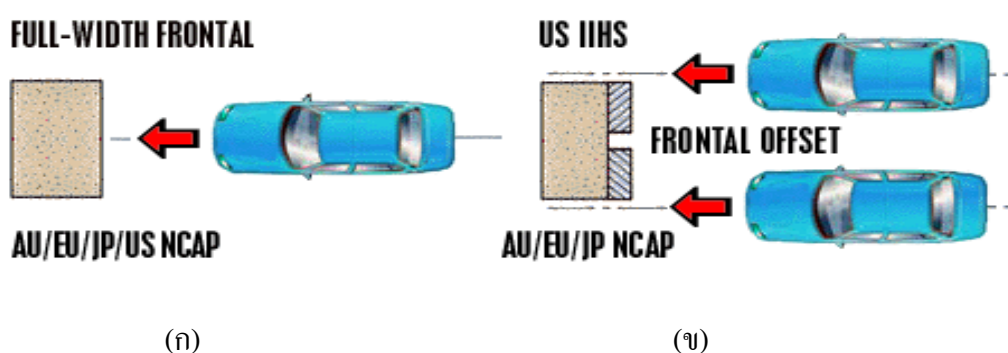
เป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยทางรถยนต์และเริ่มมีใช้ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบระบบต่างๆ ของรถยนต์และเริ่มใช้ครั้งแรกในปี 1968 โดยมาตรฐานที่ใช้มีหลายประเภท ตัวอย่างเช่น มาตรฐานที่ 116 (Motor Vehicle Brake Fluids) ซึ่งเป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับระบบเบรกในรถยนต์ โดยมาตรฐานที่มีการใช้ครั้งแรกคือ มาตรฐานที่ 209 ซึ่งกล่าวถึงความปลอดภัยในการใช้เข็มขัดนิรภัยกับผู้โดยสารทั้งรถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก และรถยนต์โดยสาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานการทดสอบแบบอื่นๆ อีกหลายข้อที่ไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งเน้นเรื่องของคุณภาพความปลอดภัยเป็นหลัก

2.6.2 มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่ (NCAP)

มาตรฐานการประเมินและทดสอบรถยนต์ใหม่นี้มีใช้หลายประเทศ ในหลายทวีป เช่น ทวีปอเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่นและออสเตรเลีย โดยมีวิธีการทดสอบการชนในหลายลักษณะดังนี้

2.6.2.1 การทดสอบโดยการชนด้านหน้าแบบชนเต็ม (Full frontal crash) ในการทดสอบนี้จะใช้ความเร็วในการชน 64 km/h (40 mph) โดยให้รถยนต์พุ่งเข้าชนกำแพงแบบเต็มหน้า ด้วยความเร็วที่กำหนดเพื่อดูความสามารถในการต้านทานความเสียหายและลักษณะของการเสียหาย เพื่อวิเคราะห์ดูความแข็งแรงและเป็นข้อมูลในการผลิตต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก)

2.6.2.2 การทดสอบโดยการชนด้านหน้าแบบครึ่งหนึ่ง (Offset frontal crash) การทดสอบการชนแบบนี้จะใช้ความเร็วในการชน 56 km/h (35 mph) มีวิธีการทดสอบคือ ให้รถวิ่งชนกำแพงด้วยความเร็วตามกำหนดโดยจะชนเพียงซีกเดียวเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข)

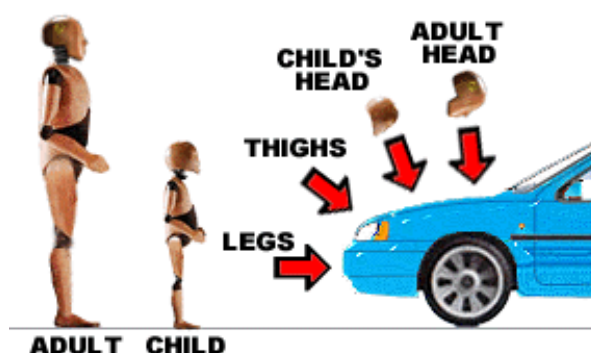


ภาพที่ 2.9 ลักษณะการทดสอบการชนด้านหน้าตามมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ใหม่

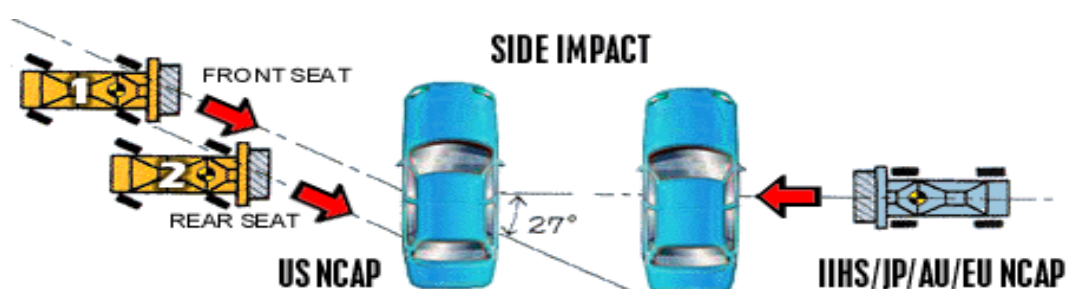
(ก) การทดสอบการชนแบบเต็ม (ข) การทดสอบการชนแบบครึ่ง [3]

2.6.2.3 การทดสอบโดยการชนคนเดินเท้า ในการทดสอบนี้ความเร็วที่ใช้ประมาณ 40 km/h (25 mph) เป็นการทดสอบการชนคนเดินเท้าโดยสร้างหุ่นจำลองจากนั้นให้รถวิ่งเข้าชนตามความเร็วที่กำหนดเพื่อสังเกตจุดที่จะเกิดอันตรายกับร่างกายในส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.10

2.6.2.4 การทดสอบโดยการชนด้านข้างมีวิธีการทดสอบคือให้รถวิ่งเข้าชนรถยนต์อีกคันหนึ่งด้วยความเร็ว 50 km/h (30 mph) ไปในทิศทางด้านข้างของรถทดสอบและในทิศทางมุมที่ต่างกันโดยรถคันที่ชนจะใช้เป็นลักษณะ Rigid Body ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 มาตรฐานการทดสอบการชนคนเดินเท้าของการทดสอบรถยนต์ใหม่ [3]



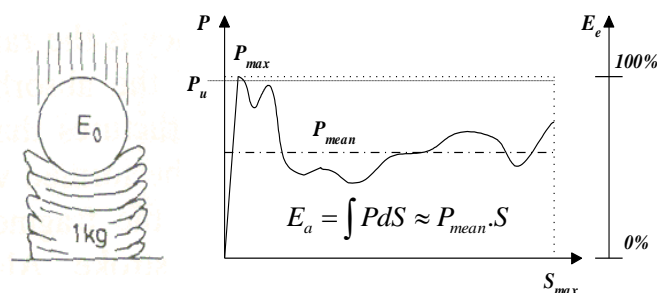
ภาพที่ 2.11 มาตรฐานการทดสอบการชนด้านข้างของการทดสอบรถยนต์ใหม่ [3]

2.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก [4]

2.7.1 ภาวะวิกฤติหรือภาวะเสียหาย

ภาวะวิกฤติ (Critical load or Collapse load), P_{cr} หมายถึง ภาวะครั้งแรกที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ ณ จุดนี้เป็นตำแหน่งที่เส้นกราฟใน ภาพที่ 2.12 เริ่มตกลงหลังจากที่กราฟขึ้นสูงสุดในช่วงแรก ซึ่งภาวะวิกฤตินี้มีความสำคัญมากกับการออกแบบเพื่อไม่ให้

ซึ่งงานเกิดการเสียหายก่อนช่วงเวลาที่เหมาะสม แต่ในบางครั้งภาระวิกฤติอาจจะมีค่าเท่ากับภาระสูงสุด (P_{max}) ก็ได้ ในกรณีของ ภาพที่ 2.12 นี้จะเห็นว่าภาระสูงสุดมีค่าเท่ากับภาระวิกฤติหรืออาจกล่าวได้ว่าค่าภาระวิกฤติก็คือ ค่าภาระที่สูงที่สุดครั้งแรกก่อนที่เส้นกราฟจะตกลงและหลังจากช่วงนี้อาจมีค่าภาระสูงสุดที่สูงกว่าจุดนี้ก็ได้



ภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว (Load - Displacement Curve) [4]

2.7.2 ภาระสูงสุด

ภาระสูงสุด (Maximum load), P_{max} หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟของค่าภาระและระยะยุบตัวตลอดช่วงเวลากการเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งค่าของภาระสูงสุดควรจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและไม่ต้องสูงมากจนเกินไปเพราะจะทำให้อัตราเร่งไม่คงที่ เช่น การลดความเร็วอย่างทันทีทันใด อาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ด้วย

2.7.3 ภาระเฉลี่ย

ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load), P_{mean} หมายถึง ค่าของภาระเฉลี่ยตลอดการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชนกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว โดยมักเปรียบเทียบกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน ซึ่งค่าภาระเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปแล้วค่าภาระเฉลี่ยควรมีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าพลังงานดูดซับที่สูงตามไปด้วย

2.7.4 พลังงานดูดซับ

พลังงานดูดซับ (Energy absorption), E_a หมายถึง ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการชนกระแทกหรือการยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระที่ใช้กับระยะยุบตัวที่ได้จากการชนกระแทกของชิ้นงานหรือโครงสร้าง จาก ภาพที่ 2.12 เป็นกราฟแสดง ค่าภาระที่ใช้และระยะยุบตัวจากตัวอย่างการทดสอบการชนของเหล็กชนิดหนึ่ง จากกราฟแสดงค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ คือ ค่าการดูดซับพลังงานจากการชนของชิ้นงาน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42)

$$E_a = \int PdS \quad (2.42)$$

โดยที่ E_a คือ พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้
 P คือ ภาระที่กระทำกับวัสดุชิ้นงาน
 dS คือ การเปลี่ยนแปลงระยะยวบตัวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.12 เนื่องจากเส้นกราฟของภาระและระยะการยวบตัวไม่คงที่สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่เกิดการชนกระแทก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงแนะนำให้ใช้การประมาณจากค่าภาระเฉลี่ยตามหลักของ mean - value theorem ในการหาค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุ จากการชนกระแทก ซึ่งหาค่าได้โดยใช้สมการที่ (2.43)

$$E_a = P_{mean} \cdot S \quad (2.43)$$

2.7.5 พลังงานดูดซับจำเพาะ

พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption) E_s หมายถึง ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างหนึ่งๆ เทียบกับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ในการหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะที่เกิดจากการชนกระแทกนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการชน ปกติทั่วไปชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้ตามความสามารถของตัวมันเอง เมื่อชิ้นงานเริ่มดูดซับพลังงานจากการชนกระแทก ตัวมันเองจะเริ่มยวบตัวหรือพับตัวจนกระทั่งไม่สามารถยวบตัวต่อได้อีก ลักษณะเช่นนี้หมายถึง วัสดุชิ้นงานนั้นได้ดูดซับพลังงานได้เต็มที่แล้ว ดังนั้นแรงที่เหลืออยู่ก็จะถูกส่งไปยังชิ้นส่วนที่เรากำลังต้องการปกป้องให้ความปลอดภัย เช่นร่างกายของมนุษย์ในห้องผู้โดยสาร ปกติแล้วเรามักพิจารณาการดูดซับพลังงานโดยเทียบกับมวลของตัวโครงสร้างเอง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานมีมวลมากเกินไปกล่าวคือ แม้ว่าชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้มาก แต่ถ้าชิ้นงานมีมวลที่มากเกินไปก็อาจไม่เหมาะสมกับโครงสร้างบางชนิด ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของรถยนต์หรือยานพาหนะอื่นๆ ซึ่งค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.44)

$$E_s = \frac{\int PdS}{mass} \approx \frac{P_{mean} \cdot S}{mass} \quad (2.44)$$

โดยที่ E_s คือ การดูดซับพลังงานจำเพาะ

P_{mean} คือ ภาระเฉลี่ย

S คือ ระยะที่วัสดุชิ้นงานยุบตัวได้จากเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

2.8 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5]

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่างๆกันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆของรูปร่างปัญหานั้น หรือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่าแทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมากต่างๆ ดังกล่าวซึ่งปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการคือ ทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์ แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ แสดงตัวอย่างของรูปร่างเมชและเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น ฉะนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานี้ประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ ก็คล้ายกับการนำเอาทุกๆเอลิเมนต์ มารวมกันเข้า ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะของปัญหาทั้งหมด จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงในสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหา

2.8.1 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

2.8.1.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)

- 1) การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
- 2) การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆต่อกัน โดยแต่เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด (Discretization)

2.8.1.2 การกำหนด shape function ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์

- 1) สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์
- 2) กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหนดและสภาวะขอบเขตให้กับ

ปัญหา

- 3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

2.8.1.3 ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase) การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าการ กระจัดที่โหนดต่างๆ

2.8.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post processing phase) การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติมเช่นเราอาจอยากจะทำกราฟค่าความเค้นหลัก เป็นต้น

2.8.2 โปรแกรม FEA ที่ใช้ในการศึกษา (ABAQUS) [3]

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทาง FEA ชื่อ ABAQUS เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัย ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจกับการใช้งานโปรแกรมนี้เสียก่อน โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมคำนวณที่อาศัยหลักการของ FEA ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล เป็นหนึ่งในโปรแกรมด้าน FEA ที่นิยมใช้งานทั้งในส่วนของงานวิจัย และภาคอุตสาหกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น ปัญหาด้านการชน การสั่นสะเทือน ความร้อน ของไหล และการเสียหายแบบต่างๆ เป็นต้น โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยส่วนหลักของโปรแกรมที่สำคัญดังนี้

2.8.2.1 ส่วนของการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อเตรียมการทดสอบ โดยสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบแรกโดยการใช้ ABAQUS/CAE ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับการเขียนรูปในโปรแกรมเขียนแบบหรืออาจจะเขียนจากโปรแกรมที่เกี่ยวกับทางด้านการเขียนแบบ (CAD) เช่น Solid Work ก็ได้ แล้วจึงดึงเข้ามาใช้ใน โปรแกรม ABAQUS/CAE แบบที่สองเขียนโดยการใช้คำสั่งในภาษาของโปรแกรม ABAQUS โดยจะเขียนในลักษณะเป็น Text File Format หรือเรียกว่า Input File ซึ่งไฟล์ที่ได้จะมีนามสกุลเป็น *.inp ตัวอย่างหน้าจอของ ABAQUS/CAE แสดงดังรูป (2.13)

ในส่วนนี้นอกจากจะต้องสร้างภาพของโครงสร้างให้มีขนาดและลักษณะเหมือนจริงแล้ว ยังต้องทำการใส่เงื่อนไขอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต ลักษณะของภาระที่กระทำ เงื่อนไขของผิวสัมผัส ชนิดของเอลิเมนต์ จำนวนของเอลิเมนต์ ชนิดของการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ต้องการเก็บ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรมจะมีผลต่อการคำนวณและผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆที่จำเป็น และทำการเปรียบเทียบ

โปรแกรมกับผลการทดลองเพื่อให้มั่นใจว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถใช้งานได้จริง



ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE

2.8.2.2 ส่วนของการคำนวณผล

ส่วนนี้คือขั้นตอนการประมวลผล โดยโปรแกรมจะนำข้อมูลและเงื่อนไขที่สร้างไว้ในแบบจำลองมาทำการคำนวณและประมวลผลตามวิธีการที่ได้เขียนไว้ในโปรแกรมส่วนแรก ในส่วนนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ วิธีแรกโดยใช้ ABAQUS/CAE วิธีที่สองโดยการใช้ ABAQUS/Command ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของตัวแปรต่างๆ

2.8.2.3 ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม

ส่วนของการแสดงผลคือส่วนที่โปรแกรมแสดงผลการคำนวณที่ได้ออกมา โดยอาจแสดงผลในรูปแบบของภาพขึ้นงานในลักษณะต่างๆ การกระจายตัวของตัวแปรที่ต้องการ หรือกราฟ เป็นต้น ในโปรแกรมนี้ส่วนที่ใช้แสดงผล คือ ABAQUS/Viewer โดยจะนำข้อมูลหรือผลที่ได้จากการประมวลผลในส่วน 2 เรียกว่าไฟล์ ODB มาเปิดแสดงผล เพื่อทำการบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ รวมถึงข้อมูลที่โปรแกรมทำบันทึกไว้ขณะทำการทดสอบ จากนั้นจะนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับต่อไป

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างส่วนหน้าของรถยนต์ มีความสำคัญในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบมีความสำคัญในการพัฒนา พลังงานที่ดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร คือ ชนิดของเส้นใย เมทริกซ์ การเรียงตัวของมุมไขว้เส้นใย รูปทรง และความเร็วในการทดสอบ โดยทั่วไปโลหะเช่นอะลูมิเนียม มีลักษณะการเสียหาย แบบพับ และ แบบงอ ซึ่งพลังงานที่กระจายจะถูกรวมทั้งหมดมาจุดเดียวในแนวแคบๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุประกอบซึ่งมี ลักษณะการเสียหาย แบบแตกเปราะเป็นชิ้นเล็ก ตลอดแนวแกนท่อนในลักษณะคงที่จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของแรงได้มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากวัสดุประกอบมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และมีความคงทน วัสดุประกอบจึงเป็นอีกทางเลือกเพื่อทดแทนวัสดุเดิม จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของลักษณะการเสริมแรง รูปทรง มุมไขว้ของเส้นใย อัตราการกด ที่นำไปสู่ความสามารถของการดูดซับพลังงานของท่อวัสดุประกอบ เช่น การศึกษาทดลองพฤติกรรมการเสียหายของโครงสร้างรถยนต์ ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และไม่คงที่ โครงสร้างหน้าตัด รูปทรงนาฬิกาทราย รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวย [6-10] และรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยขึ้นรูปจาก Fiber/vinyl ester ได้ศึกษา วิธีการเสียหายจากการสังเกต และใช้เครื่องขยายสเกล เพื่อหาคุณลักษณะการดูดซับพลังงาน เปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับทฤษฎี [11-14] การศึกษาคุณลักษณะการยุบตัวของท่อวัสดุประกอบได้พิจารณา ศึกษา ผลกระทบของโครงสร้างที่อัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง การเสริมแรงด้วยเส้นใย และ รูปแบบการเสียหายทางกลของวัสดุประกอบ [15] การศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศและไม่ใช้สูญญากาศ ในการดูดซับพลังงานของ glass/polyester พบว่าขึ้นงานรูปทรงกระบอก ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ มีค่าดูดซับพลังงานจำเพาะสูงขึ้นสองเท่า การศึกษาอิทธิพลของการดูดซับพลังงาน ของพื้นที่หน้าตัดภายใต้แรงกระทำในแนวแกน ได้พิจารณาศึกษาอิทธิพลของใยแก้วเสริมแรง และพบว่าหน้าตัดทรงกระบอกดูดซับพลังงานได้มากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม [16]

C. Milan et al. (1999) [17] ได้ทำการศึกษาการกดของข้อต่อที่เหมาะสมระหว่าง ท่อวัสดุประกอบและท่ออะลูมิเนียม โดย การทดลองและแบบจำลอง ข้อต่อนี้ถูกเชื่อมต่อกันหลายจุดจากโครงสร้างของแม่แรงหรือปั้นจั่น การคำนวณได้มีการวิเคราะห์แบบจำลอง ท่อได้ทำการทดสอบ โดยแรงกดระหว่างแผ่นระนาบสองแผ่น กดลงจนกระทั่งชิ้นงานเกิดความเสียหาย ความยาวของชิ้นงานที่ทำการทดสอบคือ 40 mm. การทดสอบชิ้นงาน โดยใช้เครื่องที่มีชื่อว่า Instron Universal Testing Machine ซึ่งมีแรงกระทำได้สูงสุดที่ 100 KN ภายใต้อัตราการยุบ คือ 0.1 m/s การหาคำตอบจากแบบจำลองโดยทำการออกแบบข้อต่อ แบบจำลองได้รวมถึงชนิดของเอลิเมนต์ ขนาดของเมท

ตลอดจนค่าอิตาสติก และค่าคุณสมบัติความแข็งของวัสดุ เป็นต้น จากผลการทดลอง พบว่าภาพกราฟภาระ-ระยะยวบตัว เป็นผลการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงที่กระทำจากแบบจำลองคือ 8% และค่าระยะยวบตัวที่คลาดเคลื่อนคือ 12%

Paolo Feraboli et al. (2009) [18] ได้ทำการศึกษาการดูดซับพลังงานจากการชนจากท่อวัสดุประกอบ รูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาเป็นท่อสี่เหลี่ยมผนังบาง โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่รูปร่างแตกต่างกันที่หน้าตัดทั้ง 5 แบบ โดยควบคุม ความหนา, อัตราส่วนผสม, กระบวนการขึ้นรูป และวิธีการทดสอบให้เหมือนกัน ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ศึกษามีส่วนผสมเป็น T700 / 2510 (carbon fiber / epoxy prepreg) ไฟเบอร์เป็นชนิดแผ่นทอ 12 ktow ขึ้นรูปโดยการ vacuum bag และการจัดเรียงชั้นไฟเบอร์ เป็น $[0/90]_{4s}$ ความหนาชิ้นงานเท่ากับ 1.65 mm และทดสอบโดยใช้ ความเร็วในการทดสอบ 50.8 mm / min กระทำกับชิ้นงานจนเสียหาย ผลการศึกษาพบว่า สำหรับอัตราส่วนผสม และ Lay-up ที่ศึกษามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับพลังงานที่บริเวณมุมของชิ้นงานสูง ขณะที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่เรียบ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับพลังงานต่ำ

S. Solaimurugan et al. (2007) [19] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของท่อทรงกระบอกวัสดุประกอบ โดยท่อวัสดุประกอบมีจำนวนชั้นของไฟเบอร์เป็น 4 และ 6 ชั้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ที่แตกต่างกันไป ชิ้นงานที่ใช้ทดลองทำจาก เส้นใยแก้วชนิด Woven roving (WRM) ความหนาแน่น 610 g/m² และ เส้นใยแก้วทิศทางเดียว (UD) ความหนาแน่น 750 g/m² ส่วนเรซินใช้ คือเรซินไอโซพาทาลิก เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูปชิ้นงาน และใช้ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุประกอบที่ใช้ทดลองโดยการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดลองจะขึ้นรูปด้วยมือ สลับชั้นกันระหว่าง $[WRM/(UD)_m/WRM]$ ตามที่กำหนดไว้คือ 4 และ 6 ชั้น ขนาดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับความหนา (D/t) ประมาณ 15 และ 25 ตามลำดับ ที่ปลายท่อลอบขอบทำมุม 30 ความเร็วคือ 2 mm/min ผลการศึกษาพบว่า จำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประกอบ มีผลทำให้แนวโน้มการดูดซับพลังงานสูงขึ้น

พิพัฒน์ ไฟศาลาณูมาศ (2550) [20] การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการผลิตกับค่าความต้านทานแรงกระแทกของถังไฟเบอร์กลาส โดยทำการออกแบบและผลิตถังไฟเบอร์กลาส ขนาด 750 ลิตร จำนวน 6 แบบ ที่ผลิตจากใยแมทร่วมกับใยแก้วชนิดเส้น จากนั้นนำถังที่ผลิตได้มาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ 2 แบบ โดยแยกตามแนวการตัด คือ ตัดตามแนวการพันเส้นใย และตัดขวางแนวการพันเส้นใย แล้วนำไปทำการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D256 06 ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของใยแมทในการผลิตถังไฟเบอร์กลาสนั้นทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น คือในรูปแบบที่ผลิตด้วยใยแมท 1, 2 และ 3 ชั้นแล้วพันด้วยใยเส้นแบบเรียงชิด 1 ชั้น ที่ตัดตามแนวการพันเส้นใย มีค่าความต้านทานแรงกระแทก เพิ่มขึ้นเป็น 79.86% และ 4.05%

ตามลำดับ และค่าที่ได้จากขั้นตอนทดสอบที่ตัดขวางแนวการพัน มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 66.55 % และ 44.35% ตามลำดับ ส่วนในรูปแบบที่ผลิตด้วยใยแมท 1, 2 และ 3 ชั้น แล้วพันด้วยใยเส้นแบบเรียงไขว้ 1 ชั้น ขั้นตอนทดสอบที่ตัดตามแนวการพันเส้นใย มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 4.91% และ 6.74% ตามลำดับ และค่าที่ได้จากขั้นตอนทดสอบที่ตัดขวางแนวการพัน มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 104.14% และ 6.58% ตามลำดับ รูปแบบการพัน แต่ละรูปแบบให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกแตกต่างกันไป คือ ในแนวที่ตัดตามการพันเส้นใยนั้นการพันแบบเรียงไขว้ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกดีกว่าการพันแบบเรียงชิด ส่วนในแนวที่ตัดขวางการพันเส้นใย การพันแบบเรียงชิดให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกดีกว่าการพันแบบเรียงไขว้

Jaehong Lee et al. (2007) [21] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของสะพานพลาสติกเสริมใยแก้ว เพื่อศึกษาการทดลองของสะพานพลาสติกเสริมใยแก้วภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS โดยให้มีการออกแบบโดยมีแบบการไขว้สองแบบคือ DBT [45/90/-45] และ LT [0/90] ส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ในพลาสติกเสริมใยแก้วภายในประกอบด้วย เส้นใยและโพลีเอสเตอร์เรซิน น้ำหนักของใยแก้วและน้ำหนักของโพลีเอสเตอร์เรซินคือ 60 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองสะพานโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ชนิดของการวิเคราะห์คือ แผ่นเปลือก 8 โหนด และใช้องค์ประกอบที่ 6 ต่อ 1 โหนด (S8R) สมมุติให้ชิ้นส่วนทั้งหมดติดกัน ผลจากการทดลองพบว่าตัวอย่างชิ้นงานของ LT มีความแข็งแรงกว่า DBT

สุรศักดิ์ สุวรรณแดง และคณะ (2550) [22] ได้ทำการศึกษาการแอ่นตัวแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างคานที่ทำจากวัสดุผสมจากพลาสติกกับจี้ลื้อยไม้ยางพารา เมื่อรับแรงกระทำแบบจุด โดยใช้โปรแกรม ABAQUS วัสดุผสมประเภทนี้ได้จากการผสมพลาสติกกับจี้ลื้อยไม้ยางพารา ผสมกันกับพลาสติกตัวอย่างที่ทดสอบ 3 ชนิด คือ พีวีซี พีอี และ พีพี ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัวของคานที่ทำจากวัสดุผสมที่มีสมบัติไม่เชิงเส้นถูกนำไปจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS ทั้งในกรณีการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งและแนวนอน และนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ วัสดุไม้แดงซึ่งนิยมใช้ในงานโครงสร้างปัจจุบันจะถูกนำมาศึกษาและใช้เปรียบเทียบกับวัสดุผสมด้วย ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าทั้งวัสดุไม้แดงและวัสดุผสมทั้ง 3 ประเภท ให้ค่าการแอ่นตัวที่สอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองและการทดสอบทั้งกรณีแอ่นตัวน้อยและแอ่นตัวมาก แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ABAQUS สามารถใช้จำลองการทดสอบและวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุผสมซึ่งมีสมบัติไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

M.Golzar et al. (2010) [23] ศึกษาการสร้างต้นแบบชิ้นส่วนวัสดุประกอบเพื่อประกบกับด้านข้างโครงสร้างรถยนต์ โดยศึกษาการสร้างวัสดุประกอบเพื่อประกบโครงสร้างเพื่อใช้แทนที่

เหล็ก บริเวณด้านข้างของโครงสร้างรถยนต์ ยี่ห้อ Samand Sarir แผ่นวัสดุประกอบได้มีการสร้างเรียงทับซ้อนกันของเส้นใยดังนี้ [0/90] และ [45/-45] เป็นมุมไขว้ของใยแก้ว การศึกษานี้ยังใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองแผ่นประกอบ โดยใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า ABAQUS ผลจากแบบจำลองแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วเรียงทับซ้อนกันที่ [0/90] สามารถดูดซับพลังงานดีกว่าสำหรับการป้องกันโครงสร้างของชิ้นส่วนวัสดุประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิม คือ 1.7 kg และเบากว่าเหล็กเดิมถึง 42%

S.M.R.Khalili et al. (2011) [24] ได้ศึกษาแบบจำลองจากการกระแทกด้วยความเร็วต่ำของแผ่นวัสดุประกอบและทรงกระบอกผนังบาง โดยได้ทำการศึกษาโครงสร้างแผ่นลามิเนตและท่อผนังบางภายใต้การกระแทกด้วยความเร็วต่ำ ในการสร้างแบบจำลองการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการหาผลเฉลยจาก ABAQUS/Explicit แผ่นระนาบและเปลือกใช้ชนิดของเมชคือ SC8R หรือ S4R 8 node จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า สำหรับแบบแผ่นบางและแบบเปลือกบาง S4R element มีความเหมาะสมและถูกต้องแม่นยำ แม้ว่าในกรณีที่ใช้ SC8R element ซึ่งสามารถใช้ได้และมีความถูกต้องมากกว่า ซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณของ CPU มากกว่า สอดคล้องกันกับผลของแบบจำลอง สำหรับแบบแผ่นหนาและแบบเปลือกหนาควรใช้ชนิด SC4R element

Chien-Hua Huang et al. (2003) [25] ได้ทำการศึกษาทดลองแบบจำลองของการกดแบบคงที่ของแผ่นวัสดุผสม โดยการทดสอบกดของแผ่นใยคาร์บอนเสริมแรงโดยกระทำแบบคงที่เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม ABAQUS การทดลองแบบแผ่น โดยคาร์บอนและอีพอกซีเรียงซ้อนทับกัน โดยเส้นใยคาร์บอนคือ Toho ETA 12000 และแผ่นพื้นหรือเรซินคือ ACD 8810 Epoxy ซึ่งทั้งสองเรียงทับซ้อนกันที่ [90/0] และ [45/-45] ตามลำดับ โดยทั้งสองจะไขว้ทั้งหมด 16 ชั้น เรียกว่า Cross-Ply และ Angle-Ply ตามลำดับ โดยในการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ อากาศจะถูกดูดออกโดยใช้ปั๊มดูดออก ที่ความดัน 5 atm และอุณหภูมิ 81.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 131.1 องศาเซลเซียส ที่ 90 m โดยจะมีแผ่นความกว้างคือ 16 cm ยาว 7 cm มีความหนา 0.228 cm การทดสอบขึ้นงานใช้เครื่องทดสอบของ MTS 180 corporation ซึ่งออกแบบให้ง่ายต่อการรองรับ โดยมีขอบแบบอิสระ หัวเหล็กกดมีเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 7.5 cm แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ในการคำนวณ แบบจำลองได้ใช้ C3D20R เอลิเมนต์ 20 โหนด ความละเอียดของเมทเอลิเมนต์จากขอบมายังจุดตรงกลาง เอลิเมนต์ที่มีอยู่ทั้งหมดคือ 1,664 เอลิเมนต์ และความหนามี 4 เอลิเมนต์ ชั้นของทั้ง 4 วัสดุถูกวางซ้อนกันในหนึ่งเอลิเมนต์ ซึ่งทั้งหมดคือ 16 เอลิเมนต์ ในการศึกษานี้ได้แนะนำในการตัดแปลงเฟลคเตอร์ในค่าความแข็ง ลักษณะการเสียหายของแผ่นภายใต้แรงกระทำการเปลี่ยน Stress-based Criteria ไปยัง Strain-based Criteria

