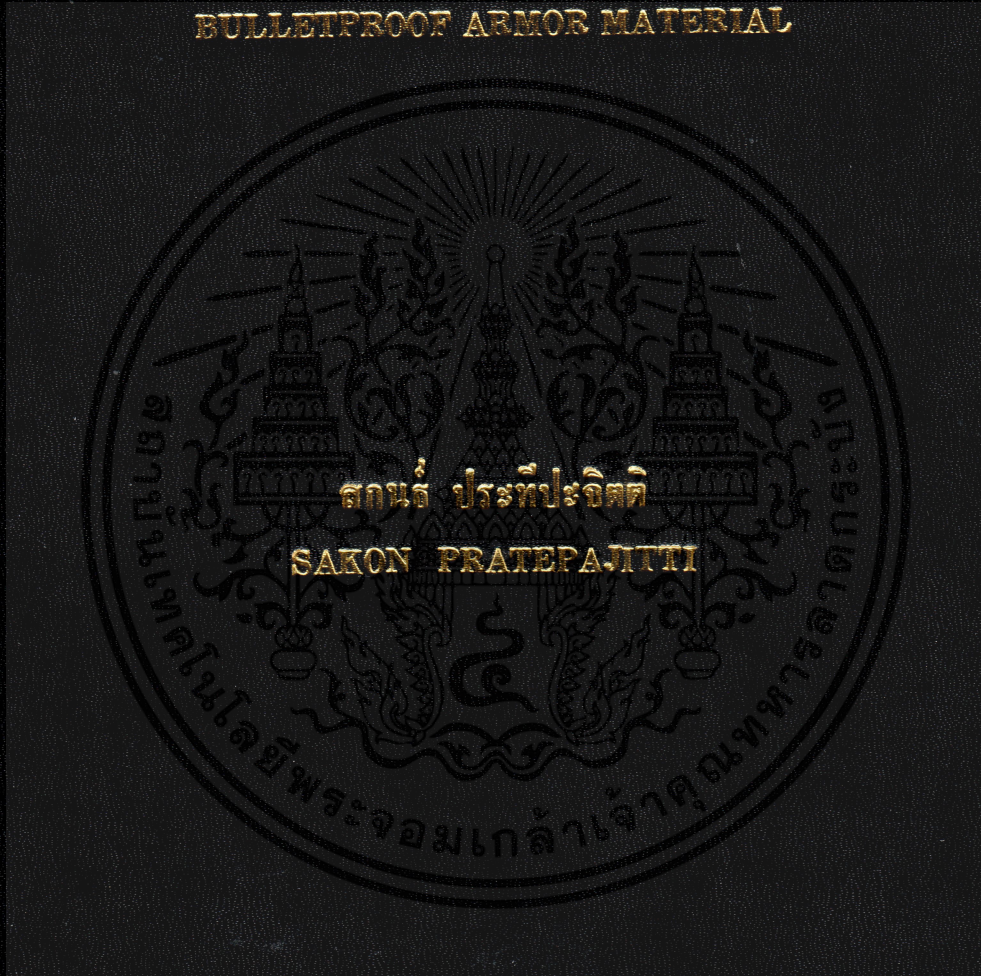


การทดสอบการกระแทกของวัสดุประกอบรูปร่างหนึ่งที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย
เป็นชั้น ๆ ที่ฉาบ เพื่อใช้เป็นวัสดุทำเสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืน

THE IMPACT TESTING OF HONEYCOMB CORE SANDWICH
CONSTRUCTION WITH FIBER-LAMINATED FACING FOR MAKING THE
BULLETPROOF ARMOR MATERIAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-751-5

การทดสอบการกระแทกของวัสดุประกอบรูปร่างที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย
เป็นชั้น ๆ ที่ผิว เพื่อใช้เป็นวัสดุทำเสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืน

THE IMPACT TESTING OF HONEYCOMB CORE SANDWICH
CONSTRUCTION WITH FIBER-LAMINATED FACING FOR MAKING THE
BULLETPROOF ARMOR MATERIAL



เลขที่.....
เลขทะเบียน... 43296
เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา พ.ศ.2545 นี้เองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-751-5

**THE IMPACT TESTING OF HONEYCOMB CORE SANDWICH
CONSTRUCTION WITH FIBER-LAMINATED FACING FOR MAKING THE
BULLETPROOF ARMOR MATERIAL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้เป็น **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา **2002** รอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-751-5



COPYRIGHT 2002 งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES อื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทดสอบการกระแทกของวัสดุประกอบรูปร่างผิ่ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นชั้น ๆ ที่ผิว เพื่อใช้เป็นวัสดุทำเสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืน
THE IMPACT TESTING OF HONEYCOMB CORE SANDWICH CONSTRUCTION WITH FIBER-LAMINATED FACING FOR MAKING THE BULLETPROOF ARMOR MATERIAL

ชื่อนักศึกษา

นายสมนธ์ ประทีปะจิตติ

รหัสประจำตัว

41062011

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

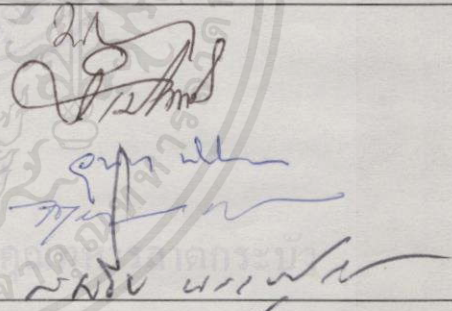
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.สมชาย

นรเศรษฐ์ โสภณ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	
ผศ.จำลอง	ปราบแก้ว	
ดร.อนุรัตน์	พิณโสภณ	
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
รศ.สมชาย	นรเศรษฐ์ โสภณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 เมษายน 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัสสุ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ในการนำไปใช้

วันที่..... 19เดือน..... พฤษภาคม..... พ.ศ. 2545.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทดสอบการกระแทกของวัสดุประกอบรูปร่างผิ่ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นชั้น ๆ ที่ผิว เพื่อใช้เป็นวัสดุทำเสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืน

นักศึกษา

นาย สกนธ์ ประทีปะจิตติ

รหัสประจำตัว

41062011

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้คุมวิทยานิพนธ์

รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการศึกษาเรื่องการวิเคราะห์การกระแทกที่เกิดจากแรงปะทะของกระสุนปืน บนวัสดุประกอบรูปร่างผิ่อลูมิเนียมขนาด 6.35 และ 9.525 มม. แกนสูง 15.875 มม.ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นชั้นๆที่ผิว ด้วยวิธีการทดลอง ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงด้านบนจะใช้ใยแก้ว/อีพอกซี $v_f = 45\%$ โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 แบบคือ แบบเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง และแบบเส้นใยถัก ที่ขนาดความหนา 11 มม. ส่วนแผ่นประกบด้านบนและด้านล่างจะใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 1 มม. โดยใช้โปรแกรม Finite Element Analysis เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์เพื่อดูพฤติกรรมในการขูดตัวของเซลล์รูปร่างผิ่ โดยจากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่าเซลล์รูปร่างผิ่ขนาด 9.525 มม.ที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีแบบเส้นใยถัก จะมีการต้านทานการเจาะทะลุและดูดซับพลังงานและกระจายแรงปะทะของกระสุนปืนขนาด .38 และขนาด 9 มม. ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Impact Testing of Honeycomb Core Sandwich Construction with Fiber-Laminated Facing for Making the Bulletproof Armor Material
Student	Mr. Sakon Pratepajitti
Student ID.	41062011
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Somchai Norasethasophon

ABSTRACT

This paper presents the analysis of impact brought about by bullets towards the aluminum honeycomb-core sandwich construction of 6.35 and 9.525 mm cell size and 15.875 mm in height, with two types of fiberglass/epoxy 11 mm thick laminated facing , namely Randomly Oriented Discontinuous Fiber and Woven Fiber composite by experiment. The upper and lower facing consists of 1 mm thick aluminum sheet. Finite Element Analysis program is adopted to determine the deflections of honeycomb core. As a result of the tests and analysis, it is evident that 3/8 inch cell size with Woven Fiber Composite laminated facing is more satisfactorily resistant penetration and more efficiently absorbs energy produced by .38 and 9 mm bullets.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านข้อมูล และการคำนวณจาก รองศาสตราจารย์ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ ที่ได้ให้คำแนะนำและ ถ่ายทอดความรู้ในเรื่องการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้แก่ผู้วิจัยขณะศึกษาในระดับปริญญาโท และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจแก้บทความในการ ส่งตีพิมพ์ในวารสาร และท่านอาจารย์คุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ร้อยเอก นที ประทีปะจิตติ คุณ นรรัตน์ ทองทา และคุณ ออด ที่ได้เอื้อเพื่อ อาวุธปืน และได้ช่วยทดสอบยิงวัสดุทดสอบจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ขอขอบคุณ คุณสงวน กิจการ รัฐบุตร ผู้จัดการโรงงาน บริษัทอัสคัลไทยมารีน จำกัด ที่ได้เอื้อเพื่อให้วัสดุรูปรวงผึ้งที่ใช้ในการ ทดสอบ และขอขอบคุณ คุณนิวัฒน์ คุณปัญญา คุณกิตติพงศ์ และเพื่อนๆ ที่ๆปริญญาโททุกท่านที่ได้ แลกเปลี่ยนความรู้ และเสนอข้อคิดเห็นที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษา ของผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอกแก่ผู้มีพระคุณ ทุกๆท่าน

สกันท์ ประทีปะจิตติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 วัสดุที่เป็นเส้นใย.....	4
2.3 วัสดุประสาน.....	7
2.4 รูปแบบของวัสดุประกอบ.....	8
2.4.1 ลามิน่าในทิศทางเดียว.....	8
2.4.2 เส้นใยถัก.....	9
2.4.3 ลามิเนท.....	9
2.4.4 เส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง.....	10
2.5 งานและพลังงานภายใต้ภาระโหลดเดียว.....	10
2.6 เสื่อเกราะกันกระสุน.....	14
2.6.1 ระดับการป้องกัน.....	14
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามไปทำดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 ความแข็งแรงของวัสดุประกอบในทิศทางเดียว และการลามีเนท.....	22
3.2.1 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในวัสดุประกอบ.....	23
3.2.2 วัสดุประเภททรานสเวอร์ลีไอโซทรอปิก.....	25
3.2.3 วัสดุประเภทไอโซทรอปิก.....	26
3.2.4 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรม.....	26
3.2.5 การแปลงระบอบแกนสำหรับลามิเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่วาง แนวทำมุมต่างๆกัน.....	29
3.2.6 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมสำหรับเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุก ทิศทาง.....	31
3.2.7 สัดส่วนปริมาตรของเส้นใย.....	32
3.3 การกระแตกในวัสดุประกอบ.....	33
3.4 โครงสร้างแบบแซนด์วิช.....	35
บทที่ 4 การทดสอบการกระแตกบนวัสดุประกอบ.....	38
4.1 หลักการและวิธีการทดสอบ.....	38
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	39
4.3 การเตรียมวัสดุทดสอบ.....	39
4.4 การทดสอบการกระแตก.....	42
4.4.1 การทดสอบเพื่อหาขนาดความหนาหรือจำนวนชั้นของการลามีเนท.....	42
4.4.2 การทดสอบเพื่อหาระยะฝั่งตัวของกระสุน เพื่อใช้ในการประมาณค่าโหด	42
4.4.3 การทดสอบการกระแตกบนวัสดุประกอบ โครงสร้างแบบแซนด์วิช.....	43
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการประมาณค่าการดูดซับพลังงาน จากการกระแตกของวัสดุประกอบ.....	49
5.1 บทนำ.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการประมาณค่าการดูดซับพลังงาน
จากการกระแตกของวัสดุประกอบ.....

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ขั้นตอนในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA).....	50
5.3 ข้อมูลต่างๆที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และการคำนวณ.....	52
5.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล.....	55
5.4.1 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์การยุบตัวของเซลล์รวงผึ้ง.....	55
5.4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์.....	60
5.4.3 การประมาณค่าการดูดซับพลังงานของวัตถุประกอบโครงสร้างแบบ แซนดี้วิช.....	64
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	70
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยและเมทริกซ์.....	6
2.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยในทิศทางเดียว.....	7
2.3 ระดับของการป้องกันกระสุนแต่ละขนาด ของเสื้อเกราะกันกระสุน.....	16
2.4 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะยวบตัวของเสื้อเกราะกระสุน(model IMW2) โดย International Armor Corporation.....	17
3.1 คุณสมบัติของวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมที่แกนกลางทำจากอลูมิเนียมแผ่นบาง.....	36
4.1 พลังงานปะทะของกระสุน.....	43
4.2 โทลด์เนื่องจากแรงต้านของกระสุน ในเนื้อวัสดุทดสอบ.....	43
4.3 แสดงระยะยวบตัวของแผ่นประกบด้านล่างเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยม.....	47
5.1 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมของวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมอลูมิเนียม.....	53
5.2 เปรียบเทียบระหว่างระยะยวบตัวของเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมกับการจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัสดุ ประกอบแบบเส้นใยถัก โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (9 มม. Woven 9.525).....	56
5.3 แสดงระยะยวบตัวและพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านล่าง.....	68
5.4 แสดงการดูดซับพลังงานของวัสดุทดสอบ.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลามิน่าในทิศทางเดียว.....	9
2.2 เส้นใยถักชนิด Plain Weave.....	9
2.3 แสดงลักษณะการลามินเท.....	10
2.4 แสดงเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง.....	10
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหนดกับระยะยึดตัว.....	11
2.6 แสดงพลังงานที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ได้กราฟ P-x.....	11
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหนดกับระยะยึดตัวในช่วงอีลาสติก.....	12
2.8 โหนดเนื่องจากการกระแทกของคานที่มีการรองรับแบบ Simple Support.....	13
2.9 การทดสอบยิงเพื่อดูการยุบตัวของเสื่อเกราะ.....	15
2.10 การทดสอบผลิตภัณฑ์เสื่อเกราะกันกระสุนที่ได้จากเส้นใยไหม.....	19
2.11 ผลิตภัณฑ์เสื่อเกราะกันกระสุนที่ได้จากเส้นใยไหม.....	19
3.1 การแบ่งประเภทของวัสดุประกอบ.....	21
3.2 วัสดุประเภทรานสเตอร์สตีไอโซทรอปิก.....	23
3.3 แสดงมุมระหว่างทิศทางหลักของเส้นใยกับแกน x.....	29
3.4 ลักษณะการฝังตัวของกระสุนในวัสดุทดสอบ.....	34
3.5 โครงสร้างแบบแซนดวิช.....	35
3.6 แสดงลักษณะแกนกลางแบบต่างๆ.....	36
3.7 Expansion Process.....	37
3.8 Corrugation process.....	37
4.1 ลักษณะการประกอบกันของวัสดุทดสอบ โครงสร้างแบบแซนดวิชที่ใช้ทดสอบ.....	38
4.2 โหนดที่กระทำบนวัสดุที่มีการรองรับแบบ Simple support และวัสดุหนุนที่ผิวด้านล่างในวัสดุทดสอบ.....	39
4.3 เส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
4.4 กาวอีพอกซีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวัสดุทดสอบ.....	40
4.5 วัสดุปรวงผึ้งที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
4.6 วัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซี ที่ใช้ในการทดสอบ.....	41
4.7 แสดงระยะห่างในการยิงทดสอบ.....	42
4.8 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยถัก เนื่องจากกระสุนขนาด .38.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยถัก เนื่องจากกระสุนขนาด 9 มม.	45
4.10 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง เนื่องจาก กระสุนขนาด .38	45
4.11 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (9 มม. Woven 9.525).....	45
4.12 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (9 มม. Woven 6.35).....	46
4.13 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Woven 9.525).....	46
4.14 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Woven 6.35).....	46
4.15 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Random 9.525).....	47
4.16 การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Random 6.35).....	47
5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEA.....	50
5.2 ขั้นตอนการเตรียมการวิเคราะห์.....	51
5.3 ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์.....	52
5.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
5.5 ระบบพิกัดแกนของเอลิเมนต์.....	54
5.6 โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับวัตถุประกอบชนิดเส้นใยถัก.....	55
5.7 แสดงการลู่เข้า (convergence) ของระยะยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่งที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ โดยมีการจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัตถุประกอบเป็นแบบ $[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$	56
5.8 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Woven 9.525).....	57
5.9 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Woven 6.35).....	57
5.10 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (9 มม. Woven 9.525).....	58
5.11 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (9 มม. Woven 6.35).....	58
5.12 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Random 9.525).....	59
5.13 การวิเคราะห์การยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Random 6.35).....	59
5.14 แสดงผลเปรียบเทียบการยวบตัวของเซลลัวร์วงฝิ่งระหว่างการทดสอบกับการวิเคราะห์ทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
5.15 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลลัวร์วงฝิ่ง (.38 Woven 9.525).....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.16 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Woven 6.35).....	61
5.17 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (9 มม. Woven 9.525).....	62
5.18 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (9 มม. Woven 6.35).....	62
5.19 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 9.525).....	63
5.20 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะยวบตัวตาม แนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 6.35).....	63
5.21 แสดงการลู่เข้า (convergence) ของค่าพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์ รวงผึ้ง ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ($[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$).....	64
5.22 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Woven 9.525).....	65
5.23 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Woven 6.35).....	65
5.24 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (9 มม. Woven 9.525).....	66
5.25 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (9 มม. Woven 6.35).....	66
5.26 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 9.525).....	67
5.27 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 6.35).....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้อัตราเสี่ยงต่อชีวิตของเจ้าหน้าที่ตำรวจหรือเจ้าหน้าที่รักษากฎหมายของหน่วยงานต่างๆ ระหว่างการปฏิบัติหน้าที่มีมากมาย คืออาชญากรรมต่างๆ ก็พุ่งสูงจนน่าตกใจรวมทั้งคดียาเสพติดที่นับวันจะเพิ่มความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นการป้องกันตัวเองเบื้องต้นเพื่อสงวนรักษาชีวิตทรัพยากรบุคคลอันมีค่าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เสื้อเกราะกันกระสุนจึงจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญยิ่งที่บรรดาเจ้าหน้าที่ต้องเรียนรู้และใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

การชุบตัวของเสื้อเกราะหลังจากเกิดการปะทะของกระสุนยังคงเป็นปัญหาที่น่าสนใจอยู่ เช่นเดียวกับเสื้อเกราะกันกระสุนแบบต่างๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันทั่วไป กล่าวคือแม้ว่าเสื้อเกราะกันกระสุนนั้นจะสามารถยับยั้งกระสุนไม่ให้เจาะทะลุลงเข้าสู่ร่างกายผู้สวมใส่ได้ แต่ก็ไม่สามารถป้องกันอาการบาดเจ็บอันเกิดจากแรงกระแทกมหาศาลของกระสุนซึ่งอาจจะเกิดเพียงแค่อรอยถลอกฟกช้ำไปจนถึงขั้นกระดูกแตกหักได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของการชุบตัวที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการปะทะของกระสุน และได้ทำการศึกษาทดลองใช้วัสดุประกอบรูปร่างผืนที่มีการเสริมแรงที่ผิว นำมาทำการพัฒนาเป็นอุปกรณ์เสริมบริเวณหน้าอกของเสื้อเกราะที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับเสื้อเกราะชนิดต่างๆ ได้ และทำการทดสอบเพื่อให้ได้ซึ่งการชุบตัวของวัสดุอันเนื่องมาจากแรงปะทะของกระสุน ในส่วนของผิวด้านหลังให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผิวที่เสริมแรงบนวัสดุประกอบนี้จะทดลองใช้วัสดุที่มีราคาถูกแต่มีความแข็งแรงสูงและสามารถผลิตได้ภายในประเทศ นั่นคือเส้นใยแก้ว โดยนำมาวางเรียงซ้อนทำมุมกันและใช้อีพอกซีเป็นตัวประสาน โดยผิวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนี้จะเป็นตัวต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน และในส่วนของวัสดุประกอบรูปร่างผืนจะทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานและกระจายแรงปะทะที่เหลือตกค้างจากแรงที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดไปเป็นแรงที่มีความสม่ำเสมอบนพื้นผิวด้านหลังเพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดอาการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการชุบตัวเฉพาะจุด

สำหรับในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีนั้น จะใช้โปรแกรม Ansys ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทาง Finite Element Analysis มาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาถึงการชุบตัวของวัสดุประกอบรูปร่างผืนที่เกิดจากการปะทะของกระสุนปืน
- 1.2.2 ทำการทดสอบหาขนาดของวัสดุเสริมแรงที่ผิว ที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ดี

1.2.3 ทำการประมาณค่าพลังงานที่ถูกดูดซับโดยวัสดุทดสอบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 พิจารณาเส้นใยแก้วชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง ให้เป็นวัสดุประเภทไอโซทรอปิก
- 1.3.2 พิจารณาเส้นใยแก้วชนิดถักให้เป็นวัสดุประเภททรานสเวอร์สตีไอโซทรอปิก
- 1.3.3 พิจารณาให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของกระสุนกับระยะฝั่งตัวของกระสุนเป็นแบบเชิงเส้น
- 1.3.4 ไม่คิดผลกระทบที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทดสอบและการเปลี่ยนรูปของหัวกระสุนที่มาปะทะ อันเนื่องมาจากผลทางไดนามิกส์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ใช้ ใยแก้ว/อีพอกซี $v_f = 45\%$ เป็นวัสดุเสริมแรงที่ผิว
- 1.4.2 ใยแก้วที่ใช้ในการทดสอบมีสองแบบคือ
 - 1.4.2.1 เส้นใยแก้วชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง
 - 1.4.2.2 เส้นใยแก้วชนิดถัก
- 1.4.3 การจัดเรียงมุมในแต่ละชั้นของใยแก้ว/อีพอกซี ประเภท เส้นใยถักจะเป็นแบบ $[(0/90/\pm 45)_7/0/90]$ ใยแก้ว/อีพอกซีทั้งสองชนิดจะมีความหนาเท่ากันคือ 11 มม.
- 1.4.4 เซลล์ร่วงผึ้งที่ใช้ในการทดสอบ มีขนาดเซลล์ เท่ากับ 6.35 และ 9.525 มิลลิเมตร และมีแกนสูง 15.875 มิลลิเมตร
- 1.4.5 แผ่นอลูมิเนียมที่ประกบด้านบนและด้านล่างของเซลล์ร่วงผึ้งมีความหนา 1 มิลลิเมตร
- 1.4.6 วัสดุประกอบที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด $254 * 304.8$ มม.²
- 1.4.7 ใช้กระสุนขนาด .38 และขนาด 9 มม. ในการทดสอบ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาหาข้อมูลของเส้นใยแก้วและวัสดุร่วงผึ้งเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบ

เอกสารนี้เป็น 1.5.2 ทำการทดสอบยิงวัสดุทดสอบเพื่อหาขนาดของวัสดุเสริมแรงที่ผิวที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนดังที่ได้กำหนดไว้แล้วข้างต้น ครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5.3 ทำการวัดระยะฝั่งตัวของกระสุนในวัสดุทดสอบเพื่อใช้ในการประมาณค่าโหดของกระสุนจากไดนามิกส์ โหดไปเป็นสถิตย์โหด
- 1.5.4 ทำการทดสอบยิงวัสดุทดสอบเพื่อหาระยะขูดตัวของเซลล์ร่วงฝั่ง
- 1.5.5 ทำการประมาณค่าพลังงานความเครียด (Strain Energy) ของแผ่นประกบด้านล่างเซลล์ร่วงฝั่งโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.5.6 ทำการประมาณค่าพลังงานที่ถูกดูดซับโดยวัสดุทดสอบ โดยการเปรียบเทียบค่าพลังงานของกระสุนที่ใส่เข้าไปเทียบกับค่าพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านล่างเซลล์ร่วงฝั่ง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1.6.1 เพื่อเป็นก้าวแรกในการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำเกราะกันกระสุนที่สามารถดูดซับพลังงานจากการปะทะได้ดี
- 1.6.2 ได้รู้ถึงพฤติกรรมในการขูดตัวของวัสดุปรวฝั่งหลังจากรับ โหดปะทะ (Impact Load)
- 1.6.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาถึงการรับ โหดปะทะที่มีค่าสูงๆในวัสดุประกอบชนิดนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันวัสดุประกอบมีบทบาทสำคัญอย่างมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ที่ต้องการความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่นในงานอุตสาหกรรมทางด้านอากาศยานโดยใช้วัสดุประกอบนี้ในการทำโครงหรือตัวถังของเครื่องบิน , เครื่องบินรบ และเฮลิคอปเตอร์หรือในชิปนาวุธต่างๆ ตลอดจนใช้เป็นโครงสร้างของดาวเทียม หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่ต้องการความแข็งแรงสูงและต้องการน้ำหนักเบา ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ในการทำวัสดุประกอบส่วนใหญ่จะเป็นพวกเส้นใย (fiber) วางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แล้วนำมายึดติดกันโดยใช้เรซินเป็นตัวประสาน (matrix) ซึ่งเรซินที่เป็นตัวประสานนั้นมักจะเป็น โพลีเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรืออีพอกซีเป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นข้อดีของวัสดุประกอบและได้นำมาประยุกต์ใช้ในการทำเกราะกันกระสุน

2.2 วัสดุที่เป็นเส้นใย (FIBER MATERIALS)

ที่เป็นเส้นใยได้จำแนกออกเป็นหลายชนิดเช่น เส้นใยแก้ว , เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยกราไฟท์ , เส้นใยเคฟลาร์ , เส้นใยโบรอน , เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และเส้นใยอลูมินาหรืออลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งลักษณะทั่วไปของเส้นใยดังกล่าวนี้อาจกล่าวได้โดยย่อ ดังนี้

เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยชนิดนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรกคือ E-Glass หรือเส้นใยที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการเสริมแรงสำหรับวัสดุประกอบ ชนิดที่สองคือ S-Glass ซึ่งใยแก้วชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงดึง และค่าอีลาสติกโมดูลัสมากกว่าชนิดแรก 30 % และ 20 % ตามลำดับ แต่เส้นใยชนิด S-Glass นี้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันนักเนื่องจากมันมีราคาแพงกว่า โดยปกติแล้ว S-Glass จะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ แต่ในขณะที่เดียวกันก็มีค่าโมดูลัสต่ำกว่าเส้นใยอื่นๆ ซึ่งวัสดุประกอบ ใยแก้ว/อีพอกซี และ ใยแก้ว/โพลีเอสเตอร์ เป็นที่นิยมใช้ในการทำส่วนของเครื่องบิน

เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยกราไฟท์ (Carbon or Graphite fibers) วัสดุประกอบ กราไฟท์/อีพอกซี หรือ คาร์บอน/อีพอกซี ซึ่งในปัจจุบันได้ใช้ทางด้านเกี่ยวกับโครงสร้างของอากาศยาน เส้นใยชนิดนี้จะมีค่าโมดูลัสและค่าความแข็งแรงสูงแต่ก็มีราคาสูงตามไปด้วย

เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar or Aramid fibers) ซึ่งโดยแรกเริ่มเส้นใยตัวนี้ (Kevlar 29) ได้พัฒนามาใช้ในอุตสาหกรรมยางเรเดียล แต่ในขณะนี้ได้มีการพัฒนาต่อมาจนถึงรุ่น (Kevlar129) ซึ่งจะมีค่าโมดูลัสที่สูงกว่าและเส้นใยรุ่นใหม่ก็ยังใช้อย่างกว้างขวางสำหรับทำวัสดุประกอบที่ใช้ในงานโครงสร้าง และยังใช้เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำเสื้อเกราะกันกระสุนในปัจจุบันอีกด้วย ความหนาแน่นของเส้นใยเคฟลาร์นี้จะประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นใยแก้ว และถือได้ว่าเส้นใยชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงจำเพาะสูงที่สุดในบรรดาเส้นใยที่มีใช้ในปัจจุบัน เส้นใยชนิดนี้ยังมีความเหนียวและมีความต้านทานการกระแทกที่ดีเยี่ยม แต่ข้อเสียคือมีราคาแพงและหาซื้อได้ยาก

เส้นใยโบรอน (Boron fibers) เส้นใยชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของเซรามิก และถือได้ว่าเส้นใยชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางโคที่ที่สุดในบรรดาเส้นใยทั้งหมด (ประมาณ 0.05-0.2 มิลลิเมตร) เส้นใยโบรอนนี้จะมีค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งแรงขึ้นมากกว่าเส้นใยกราฟไฟท์ แต่มันก็มีค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นตามไปด้วย และข้อเสียอีกอันหนึ่งของเส้นใยชนิดนี้คือ มีความเปราะมาก วัสดุประกอบ โบรอน/อีพอกซี และ โบรอน/ออลูมิเนียม นี้ส่วนมากจะใช้เกี่ยวกับโครงสร้างของอากาศยาน แต่ด้วยข้อจำกัดในเรื่องของราคา ซึ่งมันมีราคาสูงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก

เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เส้นใยชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานในการรวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ได้ดี และสามารถใช้งานได้ในที่ๆมีอุณหภูมิสูงๆได้ดี โดยที่อุณหภูมินั้นความแข็งแรงและความแข็งแรงขึ้นของ SiC จะมีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยโบรอนและเส้นใยชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของเซรามิกด้วย

เส้นใยอลูมินา (Alumina fibers) เส้นใยชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มพวกเซรามิกเช่นเดียวกัน ซึ่งข้อดีของมันคือความแข็งแรงจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงในขณะที่ใช้งานในที่ๆมีอุณหภูมิสูงๆ

เส้นใยที่จะใช้ในการทำวัสดุประกอบนั้นมีมากมายหลายชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านโครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นพวกใยแก้วเนื่องจากมีราคาถูกที่สุดในบรรดาวัสดุที่เป็นเส้นใยทั้งหมด และใยแก้วนี้ยังมีค่าความแข็งแรงสูงใกล้เคียงกับเส้นใยชนิดอื่นๆและยังหาซื้อได้ง่ายด้วย ส่วนคุณสมบัติอันอื่นที่จะเป็นรองก็เห็นจะมีเพียงค่าโมดูลัส โดยที่วัสดุประเภทเส้นใยแก้ว จะมีค่าโมดูลัสต่ำที่สุดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เส้นใยแก้วนี้จะมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้น้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วเส้นใยแก้วก็ยังคงน่าสนใจที่จะนำมาพิจารณาใช้งานเป็นอันดับแรกๆ ซึ่งคุณสมบัติของเส้นใยและคุณสมบัติของวัสดุประกอบชนิดต่างๆจะแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของเส้นใยและเมทริกซ์ [1]

Material	Density ρ , g/cm ³ (lb/in ³)	Modulus E_L , Gpa (Msi)	Poisson's Ratio ν_L	Strength σ_L^u , Mpa(ksi)	Specific Stiffness (E/ρ) / $(E/\rho)_{AL}$	Specific Strength (σ^u/ρ) / $(\sigma^u/\rho)_{AL}$	Thermal Expansion Coefficient α_L , $\mu/^\circ C(\mu/^\circ F)$
METALS							
Steel	7.8(0.284)	200(29)	0.32	1724(250)	1.0	1.2	12.8(7.1)
Aluminum	2.7(0.097)	69(10)	0.33	483(70)	1.0	1.0	23.4(13.0)
Titanium	4.5(0.163)	91(13.2)	0.36	758(110)	0.95	1.2	8.8(4.9)
FIBERS (Axial Properties)							
AS4	1.8(0.065)	235(34)	0.20	3599(522)	5.1	11.1	-0.8(-0.44)
T300	1.76(0.064)	231(33)	0.20	3654(530)	5.1	11.5	-0.5(-0.3)
P100S	2.15(0.078)	724(105)	0.20	2199(319)	13.2	5.5	-1.4(-0.78)
IM8	1.8(0.065)	310(45)	0.20	5171(750)	6.7	16.1	-
Boron	2.6(0.094)	385(55.8)	0.21	3799(551)	5.8	8.3	8.3(4.6)
Kevlar49	1.44(0.052)	124(18)	0.34	3620(525)	3.6	13.9	-2.0(-1.1)
SCS-6	3.3(0.119)	400(58.0)	0.25	3496(507)	5.1	6.1	5.0(2.77)
Nicalon	2.55(0.092)	180(28)	0.25	2000(290)	2.8	4.4	4.0(2.2)
Alumina	3.95(0.143)	379(55)	0.25	1585(230)	3.7	1.9	7.5(4.2)
S-2 Glass	2.46(0.090)	86.8(12.6)	0.23	4585(665)	1.4	10.4	1.6(0.9)
E-Glass[4]	2.54(0.092)	72(10.5)	0.22	3448(500)	1.05	7.5	5.4(3.0)
Sapphire	3.97(0.143)	435(63)	0.28	3600(522)	4.3	5.1	8.8(4.9)
MATRIX MATERIALS							
Epoxy[4]	1.2(0.044)	4.6(0.67)	0.36	58.6(8.5)	0.08	0.4	63(35)
Polyimide	1.46(0.053)	3.5(0.5)	0.35	103(15)	0.03	0.4	36(20)
Copper	8.9(0.32)	117(17)	0.33	400(58)	0.5	0.3	17(9.4)
Silicon carbide	3.2(0.116)	400(58)	0.25	310(45)	4.9	0.5	4.8(2.67)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยในทิศทางเดียว [2]

Property	Glass/epoxy E-glass	Glass/epoxy S-glass	Boron/epoxy B4/5505	Boron/epoxy, B5.6/5505	Aramid /epoxy Kevlar 49	Standard graphite/epoxy T300/5208
Density(kg/m ³)	1800	2000	1890	2030	1360	1600
Fiber volume fraction	0.45	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7
Strength Property						
Longitudinal tension (Mpa)	1062	1280	1260	1380	1400	1500
Longitudinal compression (Mpa)	610	690	2500	1600	235	1500
Transverse tension (Mpa)	31	49	61	56	12	40
Transverse compression (Mpa)	118	158	202	125	53	246
In-plane shear (Mpa)	72	69	67	62	34	68
Elastic constants						
Longitudinal modulus (GPa)	38.6	43	204	201	76	181
Transverse modulus (Gpa)	8.27	8.9	18.5	21.7	5.5	10.3
Shear modulus (Gpa)	4.14	4.5	5.59	5.4	2.3	7.17
Major Poisson's ratio ν_{12}	0.26	0.27	0.23	0.17	0.34	0.28
ν_{23} [12]	0.52					
Failure strain (%)						
Longitudinal tension	2.8	2.9	0.62	0.7	1.8	0.83
Longitudinal compression	1.6		1.2		0.31	0.83
Transverse tension	0.4	0.6	0.33	0.3	0.22	0.39
Transverse compression	1.4		1.1		0.96	2.39
In-plane shear	1.7		1.2		1.5	0.95

2.3 วัสดุประสาน (MATRIX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หน้าที่สำคัญของวัสดุประสานคือ ใช้ในการประสานและยึดเส้นใยเข้าด้วยกัน , ให้เป็นตัว
ป้องกันเส้นใย และถ่ายเทความเค้นระหว่างเส้นใย โดยทั่วไปแล้ววัสดุประสานจะมีคุณสมบัติที่ต่ำ
กว่าเส้นใยทั้งในด้านของความหนาแน่น , ความแข็งแรง และความแข็งขึ้น เมื่อประสานเส้นใยเข้า

ด้วยกันด้วยวัตถุประสงค์แล้ว จะได้โครงสร้างซึ่งมีความแข็งแรงและมีความแข็งขึ้นสูงมาก แต่มีความหนาแน่นต่ำ

วัสดุประสานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทเทอร์โมพลาสติกโพลิเมอร์ (Thermoplastics) ซึ่งประเภทนี้สามารถที่จะทำให้อ่อนตัวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้โดยการให้ความร้อนและความดัน เทอร์โมพลาสติกโพลิเมอร์ที่ใช้สำหรับวัสดุประกอบนั้นประกอบด้วย polypropylene , polyvinyl chloride , nylon , polyurethane , poly-ether-ether ketone (PEEK) , polyphenylene sulfide (PPS) และ polysulfone (PS) ข้อดีของวัสดุประสานประเภทนี้คือในเรื่องของความเหนียว , มีราคาต่ำกว่าในการผลิต และยังสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิสูงๆ ได้ถึง 225°C

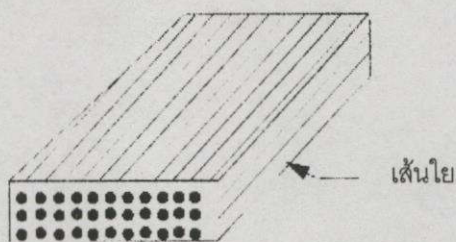
ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ เทอร์โมเซตโพลิเมอร์ (Thermosets) ประเภทนี้จะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวได้โดยการให้ความร้อน วัสดุที่เป็นตัวประสานชนิดนี้ส่วนใหญ่จะเป็นพวก polyesters , อีพอกซี , polyimides ซึ่ง polyester นั้นส่วนใหญ่จะใช้กับเส้นใยแก้ว และมันยังมีราคาที่ไม่แพงนัก , มีน้ำหนักที่เบา , ก่อนข้างจะต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี และใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิสูงถึง 100°C อีพอกซีนั้นจะมีราคาแพงกว่า แต่ก็มีความต้านทานความชื้นได้ดีกว่า มีการหดตัวที่น้อยกว่าขณะที่กำลังแข็งตัว และสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ 175°C ส่วน polyimides นั้นจะมีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่สูงกว่าคือประมาณ 300°C ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุประสานบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.4 รูปแบบของวัสดุประกอบ

2.4.1 ลามิน่าในทิศทางเดียว (UNIDIRECTIONAL LAMINA)

ลามิน่าในทิศทางเดียวนั้นแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานของวัสดุประกอบที่มีเส้นใยต่อเนื่อง ลามิน่าอาจจะประกอบด้วยวัสดุที่มีชั้นหนึ่งชั้นหรือมากกว่านั้น แต่เส้นใยทั้งหมดต้องมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ความแข็งแรงและความแข็งขึ้นในทิศทางตามแนวเส้นใยจะมีค่ามากกว่าในทิศทางตามขวางของเส้นใย และมันก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสาน และคุณภาพของการยึดติดกันของเส้นใยกับตัวประสาน คุณสมบัติของลามิน่าในทิศทางเดียวจะเป็นแบบออร์โททรอปิก ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันในทุกทิศทางหลักของวัสดุ(ขนานและตั้งฉากกับเส้นใย) และสำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติในระนาบขวาง(ตั้งฉากกับเส้นใย)เป็นไอโซทรอปิก เราจะเรียกวัสดุชนิดนี้ว่าทรานสเวอร์สไอโซทรอปิก

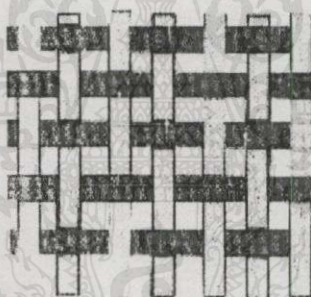
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลามิเน่าในทิศทางเดียว[1]

2.4.2 เส้นใยถัก (WOVEN FABRICS)

เส้นใยที่มีความอ่อนตัว เช่น เส้นใยแก้ว , เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคฟลาร์ สามารถที่จะนำมาถักเป็นเส้นใยถักได้ และสามารถที่จะประสานเข้าด้วยกันได้โดยใช้วัสดุประสานเป็นตัวประสาน ซึ่งรูปแบบของการถักที่ใช้อย่างแพร่หลายแสดงในรูปที่ 2.2 เส้นใยถักนั้นโดยธรรมชาติแล้วจะมีคุณสมบัติที่ดีในระนาบตามขวาง (in-plane transverse) มากกว่าลามิเน่าในทิศทางเดียว

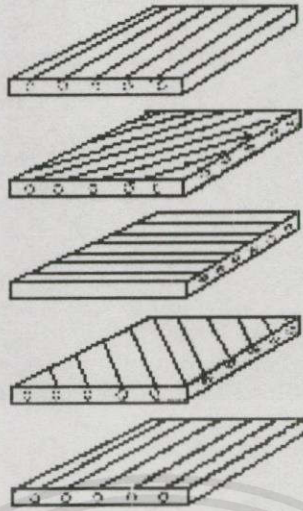


รูปที่ 2.2 เส้นใยถักชนิด Plain Weave [1]

2.4.3 ลามิเนท (LAMINATES)

ลามิเนทคือการเอาลามิเน่าในทิศทางเดียว หรือ เส้นใยถักมาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยในแต่ละชั้นจะมีแนวหรือทิศทางของเส้นใยต่างๆกัน คุณสมบัติของลามิเนทนั้นจะผันแปรกับทิศทาง , ความหนา และการจัดเรียงชั้นในแต่ละชั้น ลามิเนทโดยทั่วไปแล้วจะประสานติดกันด้วยวัสดุประสานเช่นเดียวกับที่ใช้ในลามิเน่า การทำลามิเนทนั้นมีวัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการจัดทิศทางของเส้นใยในลามิเนทให้มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งตรงตามวัตถุประสงค์ของการรับแรงของโครงสร้าง ซึ่งลักษณะการลามิเนทจะแสดงในรูปที่ 2.3

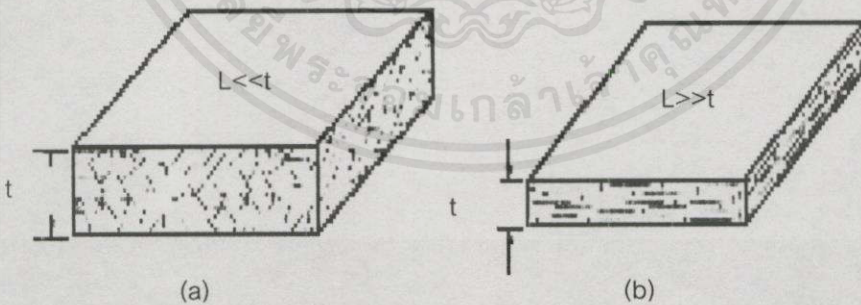
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการลามิเนต [3]

2.4.4 เส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง

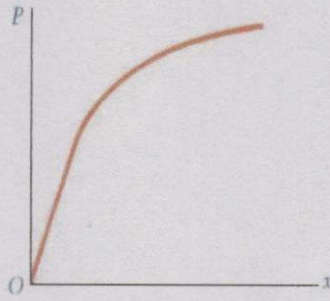
เส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง (Random oriented discontinuous fibers) จะแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่กระจายแบบ 3 มิติ และแบบที่กระจายแบบ 2 มิติ กล่าวคือ ถ้าความยาวของเส้นใยน้อยกว่าส่วนความหนาจะพิจารณาให้เป็นแบบ 3 มิติ แต่ถ้าความยาวของเส้นใยมากกว่าส่วนความหนาจะพิจารณาให้เป็นแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั้งสองแบบนี้จะพิจารณาให้เป็นวัสดุชนิดไอโซทรอปิก



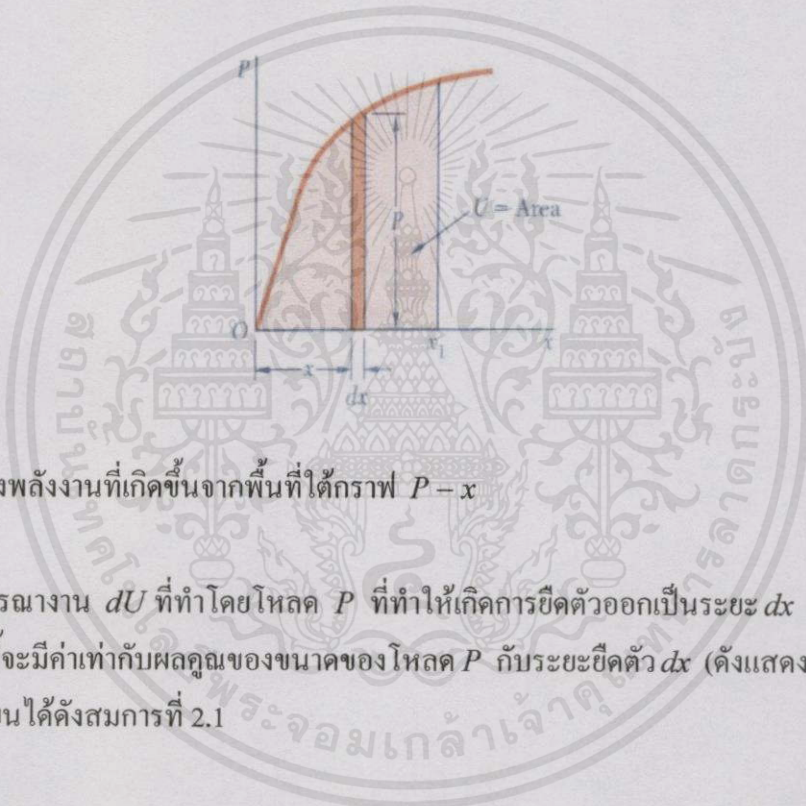
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง (a) แบบ 3 มิติ (b) แบบ 2 มิติ [4]

2.5 งานและพลังงานภายใต้ภาระโหดเดี่ยว [5]

เอกสารนี้เป็น จากหลักการของพลังงานความเครียด โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์โหดคตามแนวแกน (P) กับค่าระยะการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุ (x) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (กล่าวคือเมื่อโหดมีการเพิ่มขึ้นระยะการเปลี่ยนรูปก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย)



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลด กับ ระยะยืดตัว



รูปที่ 2.6 แสดงพลังงานที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ใต้กราฟ $P-x$

พิจารณางาน dU ที่ทำโดยโหลด P ที่ทำให้เกิดการยืดตัวออกเป็นระยะ dx เราจะได้ว่างานที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเท่ากับผลคูณของขนาดของโหลด P กับระยะยืดตัว dx (ดังแสดงในรูปที่ 2.6) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$dU = Pdx \quad (2.1)$$

ดังนั้นจากรูปที่ 2.6 งาน (U) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะแสดงอยู่ในรูป

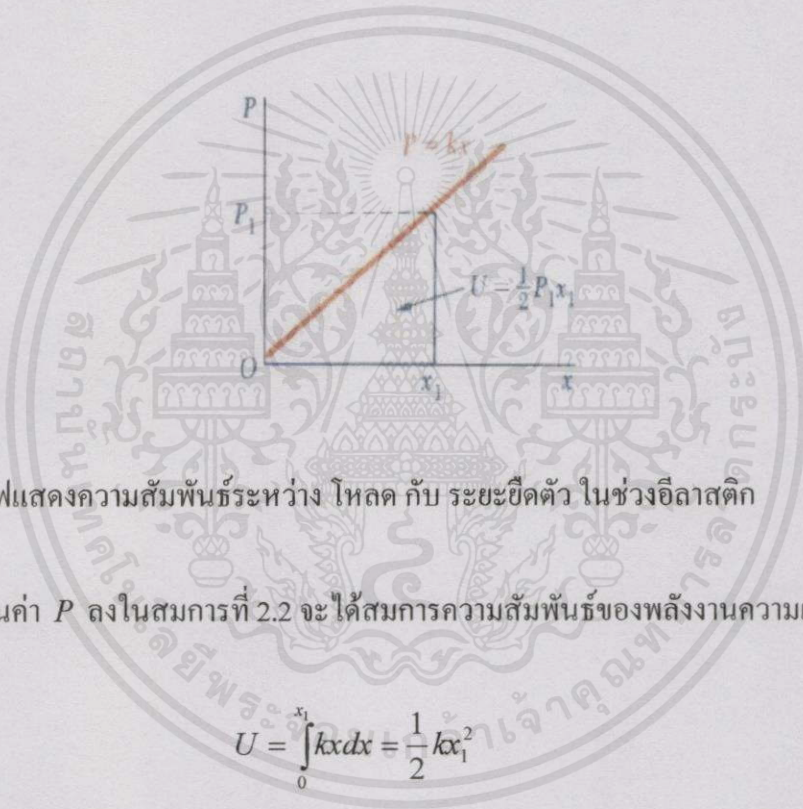
$$U = \int_0^{x_1} Pdx \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากสมการที่ 2.2 จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า $x=0$ และ $x=1$ หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ คือพลังงานความเครียด (Strain Energy) ที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปไป ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.3

$$\text{Strain energy} = U = \int_0^{x_1} P dx \quad (2.3)$$

ในกรณีของการเปลี่ยนรูปที่เป็นเชิงเส้น และเป็นแบบอีลาสติก กราฟที่แสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงของสมการ $P = kx$ (ในรูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โหลด กับ ระยะยืดตัว ในช่วงอีลาสติก

แทนค่า P ลงในสมการที่ 2.2 จะได้สมการความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียด คือ

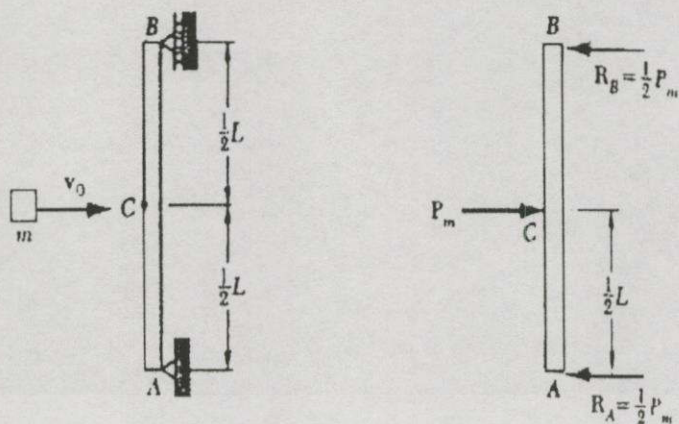
$$U = \int_0^{x_1} kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 \quad (2.4)$$

หรือ

$$U = \frac{1}{2} P_1 x_1 \quad (2.5)$$

ซึ่ง P_1 คือค่าของโหลดที่สอดคล้องกับค่าระยะการเปลี่ยนรูป x_1

แนวความคิดของพลังงานความเครียดนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการหาค่าของผลกระทบของโหลดที่เกิดจากการกระแทกบน โครงสร้าง หรือ บนชิ้นส่วนของเครื่องจักร



รูปที่ 2.8 โหลดเนื่องจากการกระทบของคานที่มีการรองรับแบบ Simple support

พิจารณา วัตถุมวล m ที่มีความเร็ว v_0 ซึ่งเคลื่อนที่ไปกระทบที่บริเวณกึ่งกลางของคาน สี่เหลี่ยม (ที่จุด C) โดยมีการรองรับแบบ Simple support ที่จุด A และ B ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสมมติให้ไม่มีการกระจายของพลังงานในขณะที่เกิดการกระทบ เราจะพบว่า ค่าพลังงานความเครียดสูงสุด (U_m) ที่เกิดขึ้นกับคานจะมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นของวัตถุก่อนที่จะเกิดการกระทบ ซึ่งแสดงได้เป็น

$$U_m = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (2.6)$$

ซึ่งเราสามารถที่จะแสดงค่า U_m ให้เป็นงานที่สมมูลกับโหลดสถิตย์ในแนวระดับที่กระทำอย่างช้าๆที่จุด C ของคาน ได้เป็น

$$U_m = \frac{1}{2} P_m x_m \quad (2.7)$$

โดยที่ x_m คือการกระจัดของจุด C ที่สอดคล้องกับโหลดสถิตย์ P_m ซึ่งในกรณีนี้ ค่า x_m สามารถหาได้จากการขุดตัวของคาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$x_m = \frac{P_m L^3}{48EI} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า x_m จากสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.7 เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$U_m = \frac{1}{2} \frac{P_m^2 L^3}{48EI} \quad (2.9)$$

แทนค่า U_m จากสมการที่ 2.6 ลงในสมการที่ 2.9 ได้เป็น

$$\frac{1}{2} mv_0^2 = \frac{1}{2} \frac{P_m^2 L^3}{48EI} \quad (2.10)$$

จะได้ค่า P_m ซึ่งเป็น โหลดสถิตย์ ที่สอดคล้องกับโหลดที่เกิดจากการกระแทก คือ

$$P_m = \sqrt{\frac{48mv_0^2 EI}{L^3}} \quad (2.11)$$

และจากสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.11 จะได้ค่าระยะการกระจัดสูงสุดคือ

$$x_m = \frac{L^3}{48EI} \sqrt{\frac{48mv_0^2 EI}{L^3}} = \sqrt{\frac{mv_0^2 L^3}{48EI}} \quad (2.12)$$

2.6 เสื่อเกราะกันกระสุน

ชนิดหรือระดับป้องกันอันตรายจากกระสุนปืนของเกราะอ่อนจะแบ่งตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดโดยใช้มาตรฐาน เอ็นไอเจ หมายเลข 010103 ซึ่งจะต้องป้องกันส่วนหน้าอกและลำตัวจากกระสุนปืนได้ เสื่อเกราะจะต้องผลิตให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด เมื่อนำไปทดสอบ เสื่อเกราะแต่ละตัวจะต้องทนอำนาจทะลุทะลวงของกระสุนและความเสียหายที่เกิดขึ้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานทุกจุด

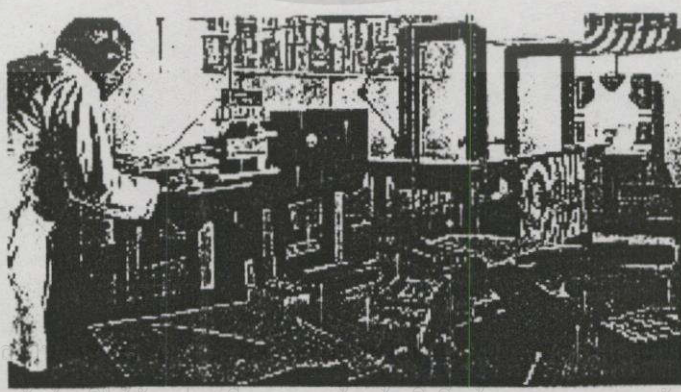
2.6.1 ระดับการป้องกัน

ระดับการป้องกันของตัวเสื่อเกราะนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรมากมายจากกระสุนปืน เช่น ขนาดของกระสุน , น้ำหนักหัวกระสุน , ส่วนผสมของโลหะที่หล่อหัวกระสุน , รูปทรงหัวกระสุน , ความเร็วเวลาเข้าปะทะ และมุมที่หัวกระสุนวิ่งปะทะ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลกับความแข็งแรงของเสื่อเกราะได้ ดังนั้นมาตรฐานการวัดของ เอ็นไอเจ ได้กำหนดแน่นอนเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ของกระสุนที่เสื่อเกราะสามารถทนได้ ส่วนมากจะเป็นกระสุนที่พบเห็นใช้งานกันอยู่ทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ถึงแม้ว่าจะเลือกเสื้อเกราะได้ตามความต้องการแล้ว แต่อีกอย่างหนึ่งที่ต้องไม่ลืมคือ ตัวเสื้อเกราะแม้จะยับยั้งกระสุนไม่ให้เจาะทะลุลงเข้าสู่ร่างกายผู้สวมใส่ได้ แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการบาดเจ็บอันเกิดจากแรงกระแทกมหาศาลของกระสุน ซึ่งอาจจะเกิดเป็นแคร์รอยดลอกฟกช้ำ ไปจนถึงขั้นกระดูกแตกหักได้

โดยทั่วไปแล้วเสื้อเกราะกันกระสุนจะใช้เส้นใยพิเศษในการทำ เช่น เส้นใยสังเคราะห์ เคฟลาร์ เส้นใยสังเคราะห์พิเศษเหล่านี้จะช่วยต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนไม่ให้พุ่งทะลุไปทำอันตรายแก่ผู้สวมใส่ ขณะเดียวกันก็ต้องรับกระจายแรงปะทะของกระสุนไปยังบริเวณอื่นทันทีและซึมซับแรงไว้ทั้งหมด จนกระทั่งหัวกระสุนไม่มีพลังงานเหลือพอที่จะเป็นอันตราย หัวกระสุนก็จะบานค้างติดอยู่ภายในบริเวณเกราะอ่อน บางทีพลังงานที่วิ่งเข้าปะทะอาจมีมากเกินไปจนเกินขีดความสามารถของเสื้อเกราะจะรับได้ ผู้ใช้งานก็อาจเกิดอันตรายจนถึงแก่ชีวิตเนื่องจากแรงปะทะแม้จะไม่มีบาดแผลภายนอกเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดมาตรฐานเอาไว้ โดยมีการยินยอมให้มีการยุบตัวเต็มที่หลังจากเกิดการปะทะของหัวกระสุนได้ไม่เกิน 44 มม. หรือ 1.73 นิ้ว [6] ถ้าเกินกว่านี้จะถึงขั้นทำอันตรายกับอวัยวะสำคัญภายในได้ โดยทั่วไปเสื้อเกราะแทบทุกแบบจะมีช่องสำหรับใส่วัสดุเสริมป้องกันเพิ่มเติมบริเวณหน้าอก หรืออาจจะเลยไปจนถึงช่วงท้องของผู้สวมใส่ วัสดุที่เสริมอาจเป็นแผ่นเหล็กเหนียวกันกระสุน แผ่นเซรามิกสังเคราะห์ (อลูมิเนียมออกไซด์) มาใช้ในการเสริมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันเพิ่มไปอีกชั้น ซึ่งผลการทดสอบเพื่อหาระยะยุบตัวของเสื้อเกราะกระสุน โดย International Armor Corporation ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

การทดสอบหาระยะยุบตัวของเสื้อเกราะทำได้โดย เอาเสื้อเกราะอ่อนสวมทับบนหุ่นดินเหนียวแล้วนำกระสุนชนิดสูงสุดที่กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าตามแต่ละระดับมายิง แล้วทำการถอดวัดผลรอยยุบตัวบนดินเหนียว ซึ่งต้องไม่เกิน 44 มิลลิเมตร การทดสอบยังแสดงในรูปที่ 2.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา... จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.9 การทดสอบยิงเพื่อดูการยุบตัวของเสื้อเกราะ [6]

ตารางที่ 2.3 ระดับของการป้องกันกระสุนแต่ละขนาด ของเสื้อเกราะกันกระสุน [6]

ชนิด	กระสุน	น้ำหนัก	ลำกล้อง/นิ้ว	ความเร็ว ft/s
ระดับ 1	.22 LR	40	6	1050
นน. 9 ออนซ์/ft ² +/-2%	.25 ACP FMC	50	2	810
	.32 ACP ตะกั่ว	88	3	680
	.380 ACP JHP	88	4	990
	.38 Spl ตะกั่ว	158	6	850
	.38 Spl SWC	158	6	850
	12 เกจ เบอร์ 4	-	8	-
	ระดับ 2 เอ	.22 Mag ทองแดง	40	6.5
นน. 15.5 ออนซ์/ft ² +/-2%	.38 Spl SJHP +P	125	6	1028
	.38 Spl ตะกั่ว + P	158	6	1090
	.38 Spl JHP +P	110	6	1235
	.357 Mag JSP	158	4	1250
	.357 Mag ตะกั่ว	158	4	1250
	.357 Mag SWC	158	4	1253
	.41 Mag ตะกั่ว	210	8 3/8	1080
	.45 ACP MC	230	5	810
	9 mm. JSP	95	4	1250
	9 mm. JSP	100	4	1250
	9 mm. JHP	115	4	1160
	9 mm. FMJ	124	4	1090
	12 เกจ 00 บีท	-	18	-
	ระดับ 2	.41 Mag SP	210	4
นน. 18 ออนซ์/ft ² +/-2%	.44 Mag SJSP	240	4	1180
	.44 Mag ตะกั่ว	240	4	1200
	.357 Mag JHP	125	4	1450
	.357 Mag JSP	110	4	1550
	.357 Mag JSP	158	6	1445
	.357 Mag ตะกั่ว	158	8 3/8	1410
	9 mm. FMJ	124	5	1175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิด	กระสุน	น้ำหนัก	ลำกล้อง/นิ้ว	ความเร็ว ft/s
ระดับ 3 เอ	.44 Mag SWC	240	6	1400
นน. 20.5 ออนซ์/ft ² +/-2%	9 mm. FMJ	124	9.5	1400
ระดับ 3	7.62 mm. FMJ	150	-	2750
ระดับ 4	.30-06 mm. AP	166	-	2850

หมายเหตุ

1. FMC , FMJ = หัวหุ้มเปลือกแข็ง
2. JHP = หัวรูหุ้มเปลือกแข็ง
3. SWC = หัวกึ่งตัดแบบยิงเป้า
4. SJHP = หัวรูหุ้มเปลือกแข็งกึ่งตัด
5. JSP = หัวหุ้มเปลือกแข็งปลายเปิด
6. AP = หัวเจาะเกราะ
7. MC = หัวหุ้มเปลือกแข็ง
8. SP = หัวอ่อน

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะขยุบตัวของเสื้อเกราะกระสุน (model IMW2) โดย
International Armor Corporation

Test Sample		Ballistic Threat (a)		Results	
Serial Number	Tested	Weight (lbs)	Caliber Shots (b)	Velocity (ft/s) Max. Min.	Deformation (mm) (c)
207-front	wet	2.36	.357 Mag	1437 1410	38
207-back	wet	3.00	.357 Mag	1438 1411	36
206-front	dry	2.36	.357 Mag	1437 1421	39
206-back	dry	3.02	.357 Mag	1440 1412	37
205-front	wet	2.35	9 mm	1239 1177	31
205-back	wet	3.02	9 mm	1236 1202	28
203-front	dry	2.36	9 mm	1231 1221	33
203-back	dry	3.02	9 mm	1239 1198	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(a) NIJ-STD-0101.03 , Level 2 วัตถุประสงค์เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) All ammunition handloaded by H.P. White Laboratory , Inc.

(c) Deformation of clay backing. Maximum allowable: 44 mm

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จินตมัย สุวรรณประทีป [7] ได้เสนอบทความทางวิชาการในเรื่องคอมโพสิตในยานยนต์ทางทหาร เพื่อให้ทดแทนโครงสร้างและเกราะที่ผลิตจากโลหะ โดยได้ยกเอางานวิจัยและพัฒนาของ CAV-ATD (Composite Armored Vehicle – Advanced Technology) ของกองทัพสหรัฐอเมริกาเป็นตัวอย่าง ซึ่งคอมโพสิตที่ใช้ในยานยนต์หุ้มเกราะนี้ได้ใช้อีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและฟีนอกลิกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และจากผลการทดสอบพบว่ามีข้อดีหลายประการในการใช้คอมโพสิต เพื่อทดแทนโครงสร้างโลหะแบบเดิม ไม่ว่าจะเป็นน้ำหนักที่เบาขึ้นถึง 35 % และยังคงตรวจจับได้ยากขึ้นอีกด้วย

สุจิระ ขอจิตต์เมตต์ ร่วมกับ สมประสงค์ ภาษาประสงค์ และ อภิชาติ สนธิสมบัติ [8] ได้ทำการศึกษาและประดิษฐ์เสื้อเกราะกันกระสุนโดยใช้เส้นใยไหมมาใช้ในการตัดเย็บ ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนในเสื้อเกราะกันกระสุนในเสื้อเกราะระดับที่ 1 ได้ดี โดยลักษณะการทดสอบและผลิตภัณฑ์เสื้อเกราะกันกระสุนที่ได้จากเส้นใยไหม แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และ 2.11



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.10 การทดสอบผลิตภัณฑ์เสื้อเกราะกันกระสุนที่ได้จากเส้นใยไหม [8] ครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 2.10 (ต่อ)

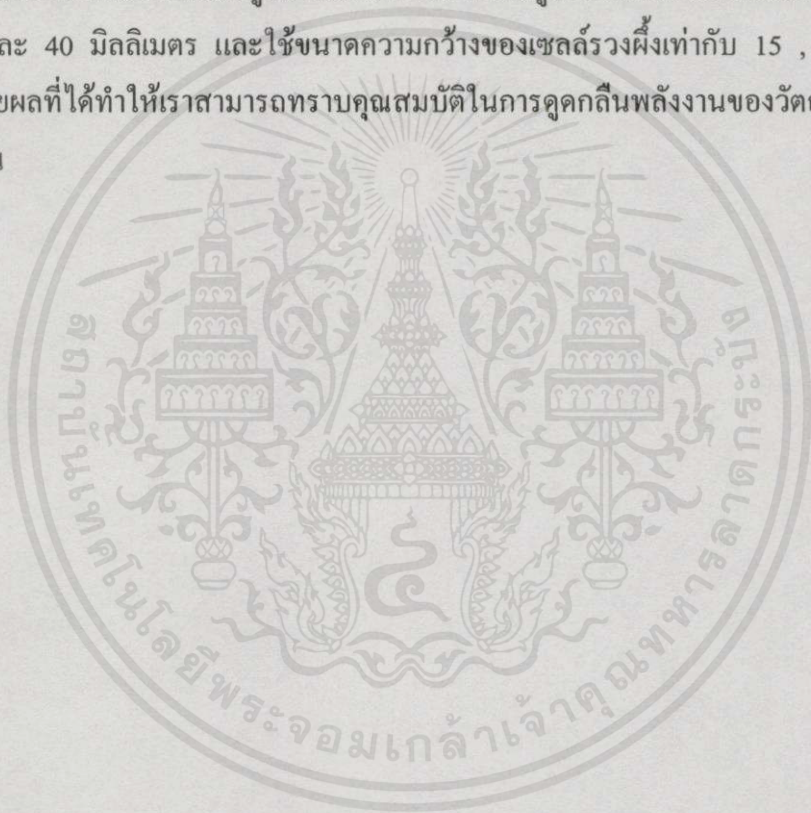


รูปที่ 2.11 ผลิตภัณฑ์เสื่อกระดานกระสุนที่ได้จากเส้นใยไหม [8]

สนธิพีร์ เอมมณี ร่วมกับ เอกชัย คล้ายวงษ์วาลย์ [9] ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลของแผ่นชานดู่ภายใต้ภาระดัด โดยมีแกนกลางเป็นวัสดุรูปรวงผึ้ง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่ง , ความแข็งแรงดัด และผลกระทบเนื่องจากความหนาของผิวหนังที่เปลี่ยนไปต่อคุณสมบัติทางกล ภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ การกระทำแบบ 3 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง โดยแผ่นทดสอบเป็นแผ่นชานดู่ ซึ่งประกอบด้วยไม้อ่างไม้ 3 ชั้น อัดแน่นให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ แผ่นอลูมิเนียมที่ถูกใช้เป็นแผ่นประกบกับแกนที่เป็นรวงผึ้งอลูมิเนียมขนาดเซลล์ 3/8 นิ้ว แกนสูง

7/16 นิ้ว ซึ่งพบว่าในช่วงแรกการกระทบระยะขยุบของคานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นเหมือนกับวัสดุทั่วไปในช่วงยืดหยุ่น แต่แผ่นแซนดวิชจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุทั่วไปมาก และจากการทดสอบเปลี่ยนค่าความหนาของผิวหน้า สามารถหาความหนาที่ทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของคานต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงสุด เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบอย่างเหมาะสมตามความต้องการทางวิศวกรรม

ฐานิภูฏิมนาม และ ณัฐภูมิ มัจพันธ์ [10] ได้ศึกษาถึงการวิเคราะห์การโค้งงอ และการดुकกลืนพลังงานของวัสดุประกอบรูปร่าง ซึ่งการทดลองได้กำหนดให้วัสดุซึ่งมีพลังงานตกลงมา กระแทกวัสดุประกอบที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ความสูงของเซลล์รูปร่างที่ใช้ทดสอบคือ 25 , 30 , 35 และ 40 มิลลิเมตร และใช้ขนาดความกว้างของเซลล์รูปร่างเท่ากับ 15 , 20 และ 25 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ทำให้เราสามารถทราบคุณสมบัติในการดुकกลืนพลังงานของวัสดุประกอบรูปร่างได้ดีขึ้น

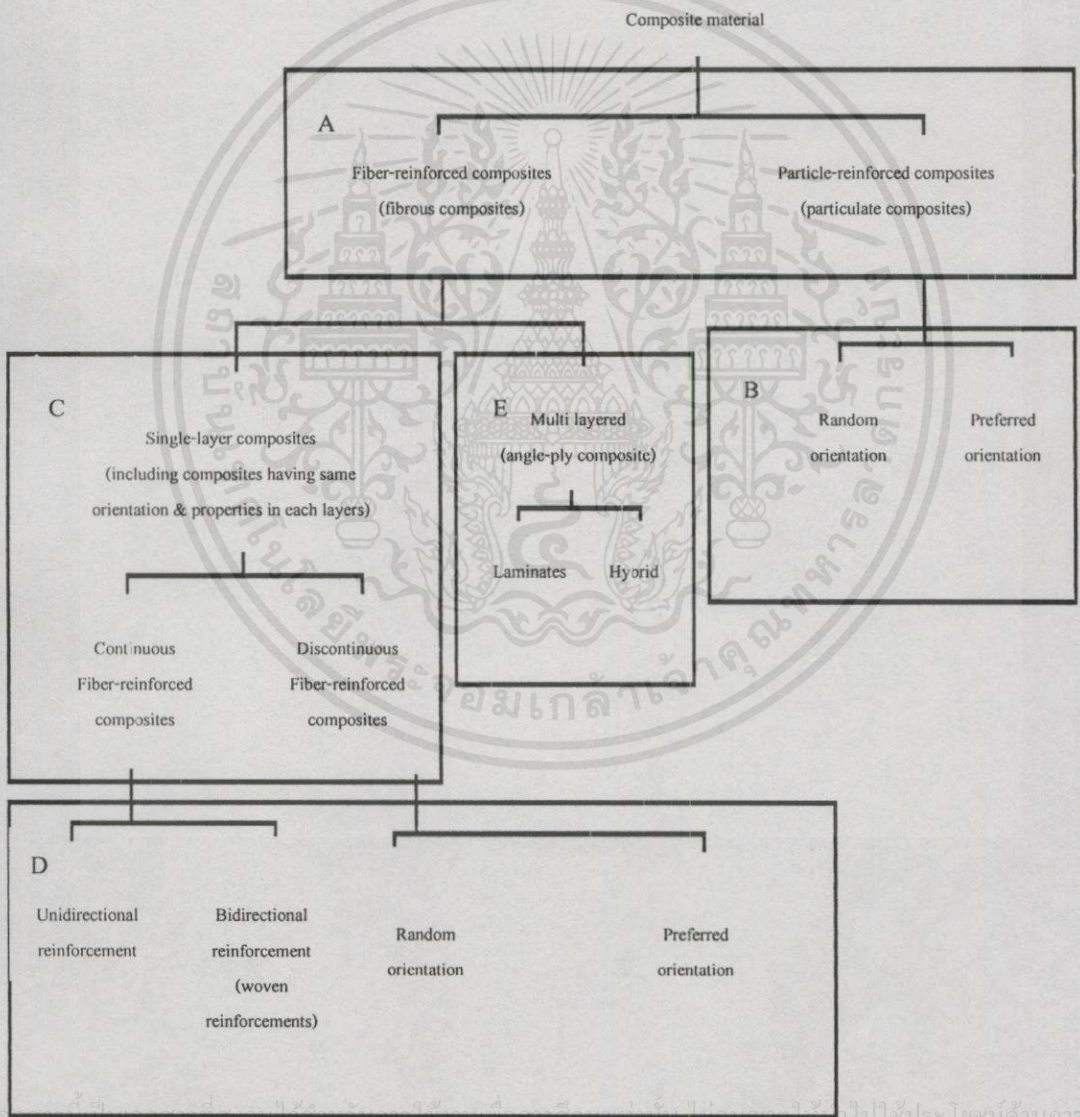


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 บทนำ

วัสดุประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยวัสดุต่างชนิดกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ ที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการในการประยุกต์ใช้งาน วัสดุประกอบที่จะกล่าวถึงนี้จะกล่าวเฉพาะวัสดุประกอบในมาตราส่วนมหภาค (Macroscopic scale) โดยสามารถจำแนกประเภทของวัสดุประกอบได้ตามบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การแบ่งประเภทของวัสดุประกอบ [11]

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจะเป็นฟังก์ชันของรูปร่างและมิติของวัสดุเสริมแรง ซึ่งโดยปกติเราจะอธิบายถึงการเสริมแรงของวัสดุประกอบ ให้อยู่ในรูปของวัสดุประกอบที่เกิดจากการประกอบขึ้นจากเส้นใย (fibrous composite materials) หรือ วัสดุประกอบซึ่งประกอบขึ้นจากอนุภาค (particulate composite materials) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 บล็อก A

การเสริมแรงของวัสดุประกอบซึ่งประกอบขึ้นจากอนุภาคนี้อาจจะมีมิติที่เท่ากันในทุกทิศทาง โดยรูปร่างของอนุภาคที่เสริมแรงอาจจะเป็น รูปทรงกลม , รูปลูกบาศก์ , แผ่นแบนเล็กๆ หรือ ในรูปทรงอื่นๆ การจัดเรียงตัวของอนุภาคอาจจะเป็นแบบกระจายในทุกทิศทาง (random) หรือมีตำแหน่งทิศทางที่แน่นอน ดังรูปที่ 3.1 บล็อก B

การเสริมแรงของวัสดุประกอบที่ประกอบจากเส้นใยจะมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ จะมีค่าอัตราส่วนของความยาวต่อภาคตัดขวางมีค่ามาก ๆ ซึ่งอัตราส่วนนี้จะเรียกว่าอัตราส่วนรูปร่าง (aspect ratio) ในวัสดุประกอบชั้นเดียวที่ประกอบจากเส้นใยที่ยาวๆ จะมีค่าอัตราส่วนรูปร่างที่สูงๆ หรือที่เรียกกันว่า วัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ต่อเนื่อง (continuous fiber-reinforced composites) ในขณะที่วัสดุประกอบที่ประกอบด้วยเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber composites) นั้นจะทำได้จากเส้นใยสั้นๆ ที่มีค่าอัตราส่วนรูปร่างต่ำๆ (ดังรูป 3.1 บล็อก C) โดยที่ทิศทางของเส้นใยสั้นๆนี้อาจจะเป็นแบบกระจายในทุกทิศทาง หรือ อาจเป็นแบบมีตำแหน่งทิศทางที่แน่นอน ส่วนวัสดุประกอบชนิดเส้นใยต่อเนื่องนั้นก็แบ่งออกเป็น 2 แบบเช่นกัน คือ แบบที่มีการเสริมแรงในทิศทางเดียว (unidirectional reinforcement) และแบบที่มีการเสริมแรงใน 2 ทิศทางหรือแบบเส้นใยถัก (woven reinforcements) ดังรูป 3.1 บล็อก D

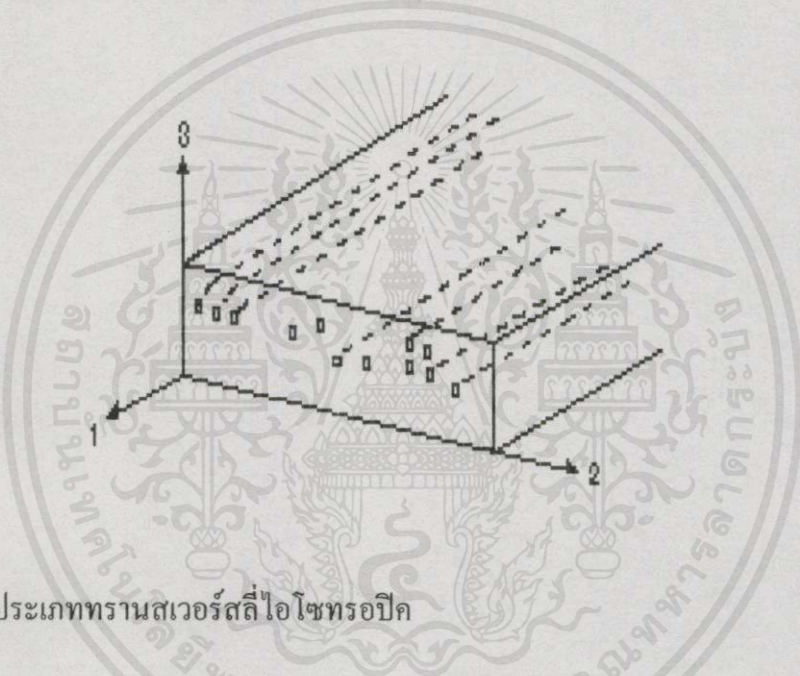
วัสดุประกอบซึ่งประกอบด้วยชั้นเป็นชั้นๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ วัสดุประกอบลามิเนต (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.4.3) และวัสดุประกอบแบบผสม ซึ่งวัสดุประกอบแบบผสมจะเป็นการใช้เส้นใยต่างชนิดนำมาผสมรวมกัน โดยเส้นใยนี้อาจผสมรวมกันภายในชั้นเดียวกัน หรือใช้เส้นใยต่างชนิดกันในแต่ละชั้นของการลามิเนต ซึ่งวัสดุประกอบชนิดนี้จะเป็นการออกแบบโดยเอาคุณสมบัติที่แตกต่างกันของเส้นใยนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่นการผสมกันของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนรวมเข้าด้วยกัน โดยใช้ตัวประสาน ซึ่งมีผลทำให้วัสดุประกอบนี้มีคุณสมบัติเด่นของเส้นใยในแต่ละแบบ โดยได้ข้อดีจากเส้นใยแก้วในเรื่องของราคาที่ไม่แพง และได้ข้อดีของคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมในเรื่องของความแข็งแรงที่ได้จากเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น

3.2 ความแข็งแรงของวัสดุประกอบในทิศทางเดียว และการลามิเนต

ในการคำนวณหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ จะมีความง่ายขึ้นมากถ้าพิจารณาวัสดุประกอบให้มีตำแหน่งทิศทางของเส้นใยเพียง 1 ทิศทางหรือวัสดุประกอบในทิศทางเดียว วัสดุประกอบชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงแตกต่างกันในตำแหน่งทิศทางที่ต่างกัน พฤติ

กรรมนี้จะแตกต่างจากวัสดุที่เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่เป็นอีลาสติกเหมือนกันในทุกทิศทาง

วัสดุประกอบในทิศทางเดียวที่มีการกระจายของเส้นใยดังรูปที่ 3.2 ส่วนใหญ่มักจะพิจารณาให้ภาคตัดที่ตั้งฉากกับเส้นใยมีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก ซึ่งเราจะเรียกวัดถูประกอบเหล่านี้ว่าเป็นวัสดุประเภททรานสเวอร์สตีไอโซทรอปิก (transversely isotropic) และถ้าคุณสมบัติของวัสดุประกอบในทิศทางตามยาว (ทิศทาง 1) แตกต่างจากอีก 2 ทิศทางที่เหลือมากๆ เราจะเรียกวัดลูชนิดนี้ว่าเป็นวัสดุประเภทออร์ทอทรอปิก (orthotropic) โดยจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้ง 3 แนวแกน และยังมีระนาบสมมาตรของคุณสมบัติของวัสดุ 3 ระนาบตั้งฉากกัน ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุชนิดนี้จะเปลี่ยนไปตามทิศทางต่างๆ ในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 3.2 วัสดุประเภททรานสเวอร์สตีไอโซทรอปิก

3.2.1 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในวัสดุประกอบ

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุประกอบในทิศทางเดียวสามารถที่จะหาได้จากคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทางนั้นๆ ของวัสดุ โดยจากความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงได้เป็น

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (3.1)$$

ซึ่ง σ_i คือ องค์ประกอบความเค้น (stress components)

C_{ij} คือ เมทริกซ์ความแข็งขึ้น (stiffness matrix)

ε_j คือ องค์ประกอบความเครียด (strain components)

สามารถเขียนสัญลักษณ์ข้อกำหนดขึ้นเปรียบเทียบกับเทนเซอร์ (tensor) ของความเค้น และความเครียด 3 มิติ ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \sigma_{11} & \varepsilon_1 &= \varepsilon_{11} \\
 \sigma_2 &= \sigma_{22} & \varepsilon_2 &= \varepsilon_{22} \\
 \sigma_3 &= \sigma_{33} & \varepsilon_3 &= \varepsilon_{33} \\
 \sigma_4 &= \sigma_{23} & \varepsilon_4 &= 2\varepsilon_{23} = \gamma_{23} \\
 \sigma_5 &= \sigma_{31} & \varepsilon_5 &= 2\varepsilon_{31} = \gamma_{31} \\
 \sigma_6 &= \sigma_{12} & \varepsilon_6 &= 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

โดยที่ γ_{ij} คือ องค์ประกอบความเครียดเฉือนทางวิศวกรรม (engineering shear strains) และสามารถเขียนสมการของความเครียด ให้อยู่ในเทอมของการกระจัด (u, v, w) ในทิศทางแกน x, y และ z ได้เป็น

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \tag{3.3}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} \quad ; \quad \gamma_{13} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \tag{3.4}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \quad ; \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{3.5}$$

และสามารถเขียนสมการสมดุล (equilibrium equations) ของพิกัดแกน x - y - z ได้เป็น

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \tag{3.7}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \tag{3.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ความแข็งขึ้น C_{ij} (สมการที่ 3.1) ในวัตถุประกอบจะเป็นแบบสมมาตร หรือ $C_{ij} = C_{ji}$ ดังนั้นค่าคงที่จะลดลงจาก 36 ค่า ลงเหลือ 21 ค่า และสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.1 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (3.10)$$

โดยที่

$$S_{ij} = C_{ij}^{-1} \quad (3.11)$$

ซึ่ง S_{ij} คือ คอมไพลเอนซ์เมทริกซ์ (compliance matrix) ที่เกิดจากการเขียนสมการความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดกลับกัน เนื่องจากเมทริกซ์ความแข็งขึ้น C_{ij} เป็นเมทริกซ์สมมาตร ดังนั้น คอมไพลเอนซ์เมทริกซ์ ก็เป็นเมทริกซ์สมมาตรด้วย

3.2.2 วัตถุประเภททรานสเวอร์ลีไอโซทรอปิก

จากรูปที่ 3.2 เมื่อพิจารณาให้ภาคตัดที่ตั้งฉากกับเส้นใยหรือระนาบ 2-3 มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิก เราจะได้ความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ความแข็งขึ้นเป็น

$$\begin{aligned} C_{22} &= C_{33} & C_{12} &= C_{13} & C_{55} &= C_{66} \\ C_{44} &= (C_{22} - C_{23})/2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.12 จะสามารถลดค่าคงที่ของเมทริกซ์ความแข็งขึ้น ลงเหลือ 5 ค่า ซึ่งสามารถเขียนเมทริกซ์ความแข็งขึ้นใหม่ได้เป็น

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.2.3 วัสดุประเภทไอโซทรอปิก

วัสดุประเภทไอโซทรอปิกจะมีคุณสมบัติเท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ความแข็งขึ้นเป็น

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_{22} & C_{12} &= C_{23} \\ C_{66} &= (C_{22} - C_{23})/2 = (C_{11} - C_{12})/2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

ดังนั้นวัสดุประเภทไอโซทรอปิก จะมีค่าคงที่เหลือเพียง 2 ค่า และสามารถเขียนเมทริกซ์ความแข็งขึ้นได้เป็น

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.2.4 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรม

จากความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ความแข็งขึ้น C_{ij} และคอมไพแลนซ์เมทริกซ์ S_{ij} ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้ไม่สามารถที่จะวัดหรือหาได้โดยตรงจากห้องทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าคงที่ ที่สามารถหาหรือวัดได้โดยตรงในทางวิศวกรรม ซึ่งจะเรียกค่าคงที่เหล่านี้ว่า ค่าคงที่เชิงวิศวกรรม โดยอยู่ในรูปของดัชนีของยังหรือยังโมดูลัส (Young's moduli) , อัตราส่วนพัวซอง (Poisson's ratio) , ดัชนีการเฉือนหรือโมดูลัสเฉือน (shear moduli) , และค่าคงที่ ที่ใช้ในเชิงวิศวกรรมอื่นๆ ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้ได้มาจากการดึงวัตถุแกนเดียว (uniaxial tension test) หรือจากการทดสอบการเฉือน (pure shear) โดยการทดสอบวัสดุส่วนใหญ่จะ

ทราบค่าของแรงหรือความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ แล้วทำการวัดค่าการกระจัด (displacement) หรือ วัดหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น และเราสามารถที่จะเขียนสมการของความเครียดในเทอมของความเค้นและค่าคงที่เชิงวิศวกรรมของวัสดุประเภทออร์โททรอปิก ได้เป็น

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\nu_{21}}{E_2} \sigma_2 - \frac{\nu_{31}}{E_3} \sigma_3 \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_1 + \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\nu_{32}}{E_3} \sigma_3 \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \sigma_1 - \frac{\nu_{23}}{E_2} \sigma_2 + \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (3.18)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad (3.19)$$

$$\gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G_{13}} \quad (3.20)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (3.21)$$

โดยที่ค่า E_1 , E_2 และ E_3 คือค่ายังโมดูลัสในทิศทางพิคัดแกนทั้ง 3 ซึ่งค่า E_1 นั้นจะมีทิศทางตามแนวเส้นใย ส่วน E_2 และ E_3 จะเป็นค่าโมดูลัสในทิศทางตามแนวขวางของเส้นใย และ ν_{ij} คืออัตราส่วนพิวของ สำหรับความเครียดเฉือนตามแนวขวางในทิศทาง j ในขณะที่เกิดความเค้นในทิศทาง i (ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว $\nu_{ij} \neq \nu_{ji}$) หรือ

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (3.22)$$

และ G_{23} , G_{31} และ G_{12} คือค่าโมดูลัสเฉือนในระนาบ 2-3, 3-1 และ 1-2 ตามลำดับ (ซึ่ง $G_{ij} = G_{ji}$) เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.16 ถึงสมการที่ 3.21 เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของคอมโพเนนต์เมทริกซ์ในสมการที่ 3.10 (โดยกำหนดให้ค่าความเครียดเฉือนทางวิศวกรรม γ_{ij} มีค่าเท่ากับ $2\varepsilon_{ij}$) ได้เป็น

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} & ; & \quad S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_2} & ; & \quad S_{13} = \frac{-\nu_{31}}{E_3} \\ S_{21} &= \frac{-\nu_{12}}{E_1} & ; & \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} & ; & \quad S_{23} = \frac{-\nu_{32}}{E_3} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$S_{31} = \frac{-\nu_{13}}{E_1} & ; & \quad S_{32} = \frac{-\nu_{23}}{E_2} & ; & \quad S_{33} = \frac{1}{E_3}$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}} & ; & \quad S_{55} = \frac{1}{G_{13}} & ; & \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

เนื่องจากคอมโพเนนต์เมทริกซ์เป็นเมทริกซ์สมมาตร ($S_{ij} = S_{ji}$) ดังนั้นจะได้

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} & ; & \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} & ; & \quad \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (3.24)$$

สำหรับวัสดุประเภททรานสเวอร์สไอโซทรอปิก ค่า $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13}$, $G_{12} = G_{13}$ และ $G_{23} = E_2 / 2(1 + \nu_{23})$ และจากสมการที่ 3.10 , 3.11 , 3.23 และ 3.24 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นในเทอมของค่าคงที่เชิงวิศวกรรมของวัสดุประกอบประเภททรานสเวอร์สไอโซทรอปิกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

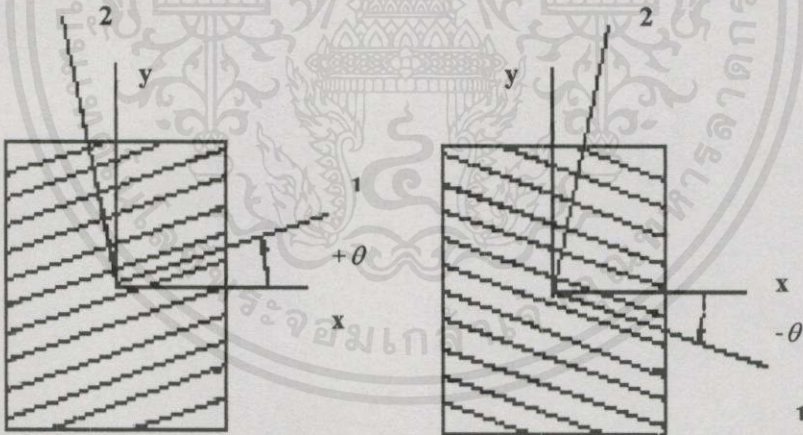
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์สงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึง G12 ของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

และสำหรับวัตถุประเภทไอโซทรอปิก สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{12} & -\nu_{12} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12} & \frac{1}{E_1} & -\nu_{12} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12} & -\nu_{12} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.2.5 การแปลงระบบแกนสำหรับลามีนาที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่วางแนวทำมุมต่างๆกัน

ในการวิเคราะห์การลามีเนทที่ประกอบด้วยชั้นของการลามีนาหลายๆชั้นวางเรียงทำมุมซึ่งกันและกัน จำเป็นที่จะต้องรู้ถึงความสัมพันธ์ของการแปลงระบบแกนของความเค้นและความเครียด ที่ไม่ได้มีทิศทางแกน x เป็นแนวเดียวกับเส้นใยในวัตถุประกอบ (ดังรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แสดงมุมระหว่างทิศทางหลักของเส้นใยกับแกน x

โดยที่รูปทั่วไปของสมการ การแปลงระบบแกนของความเครียดในเทอมของความเค้นบนระบบแกน x - y - z ของชิ้นส่วนของวัตถุประกอบจะแสดงอยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & 0 & 0 & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} & 0 & 0 & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{13} & \bar{S}_{23} & \bar{S}_{33} & 0 & 0 & \bar{S}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{44} & \bar{S}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{45} & \bar{S}_{55} & 0 \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{36} & 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

ซึ่ง \bar{S}_{ij} คือ คอมไพแอนซ์เมทริกซ์ที่แปลงรูป (transformed compliance matrix) โดยแสดงให้อยู่ในรูปของสมการได้เป็น

$$\bar{S}_{11} = m^4 S_{11} + m^2 n^2 (2S_{12} + S_{66}) + n^4 S_{22} \quad (3.28)$$

$$\bar{S}_{12} = n^2 m^2 (S_{11} + S_{22} - S_{66}) + (n^4 + m^4) S_{12} \quad (3.29)$$

$$\bar{S}_{13} = m^2 S_{13} + n^2 S_{23} \quad (3.30)$$

$$\bar{S}_{16} = nm[m^2(2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) + n^2(2S_{12} - 2S_{22} + S_{66})] \quad (3.31)$$

$$\bar{S}_{22} = n^4 S_{11} + m^2 n^2 (2S_{12} + S_{66}) + m^4 S_{22} \quad (3.32)$$

$$\bar{S}_{23} = n^2 S_{13} + m^2 S_{23} \quad (3.33)$$

$$\bar{S}_{26} = nm[n^2(2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) + m^2(2S_{12} - 2S_{22} + S_{66})] \quad (3.34)$$

$$\bar{S}_{33} = S_{33} \quad (3.35)$$

$$\bar{S}_{36} = 2mn(S_{13} - S_{23}) \quad (3.36)$$

$$\bar{S}_{44} = m^2 S_{44} + n^2 S_{55} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{S}_{45} = mn(S_{55} - S_{44}) \quad (3.38)$$

$$\bar{S}_{55} = n^2 S_{44} + m^2 S_{55} \quad (3.39)$$

$$\bar{S}_{66} = 4n^2 m^2 (S_{11} - 2S_{12} + S_{22}) + (n^2 - m^2)^2 S_{66} \quad (3.40)$$

ซึ่งค่า m และ n คือ $\cos\theta$ และ $\sin\theta$ ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับรูปที่ 3.3

สำหรับวัสดุประเภททรานสเวอร์ตีไอโซทรอปิก สมการคอมไพแอนซ์เมทริกซ์ที่แปลงรูปข้างต้น จะลดรูปลงโดยใช้ความสัมพันธ์คือ

$$S_{22} = S_{33} \quad ; \quad S_{12} = S_{13} \quad ; \quad S_{55} = S_{66} \quad ; \quad S_{44} = 2(S_{22} - S_{23}) \quad (3.41)$$

เทอมที่ไม่เป็นศูนย์ในสมการที่ 3.27 ที่ ij เท่ากับ 16, 26, 36 และ 45 จะหายไป ในวัสดุประเภทไอโซทรอปิก และ ทรานสเวอร์ตีไอโซทรอปิก

3.2.6 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมสำหรับเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง

วัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงจากเส้นใยชนิดนี้ จะมีความแข็งแรงหรือมีค่าความแข็งขึ้นน้อยกว่าวัสดุประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ต่อเนื่อง ซึ่งวัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทางนี้ จะไม่ค่อยนิยมใช้ในการทำโครงสร้างหลักที่มีความสำคัญ ถึงอย่างไรก็ตาม วัสดุประกอบชนิดนี้ก็มีคุณลักษณะหลายๆอย่างที่ที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เช่น สามารถที่จะใช้ทำชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนยุ่งยากได้ดี และกระบวนการในการผลิตยังทำได้รวดเร็วและมีราคาถูกกว่าวัสดุประกอบชนิดเส้นใยต่อเนื่อง

วัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุประเภทไอโซทรอปิก ขณะที่ วัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่อเนื่องในหนึ่งทิศทาง จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุที่เป็นแอนไอโซทรอปิก ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการคำนวณและออกแบบมากกว่า

ในการประมาณค่าเฉลี่ยยังโมดูลัส (\bar{E}) และค่าเฉลี่ยโมดูลัสเฉือน (\bar{G}) ของวัสดุประกอบชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง สามารถแสดงได้โดย [4]

$$\bar{E} = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \quad (3.42)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{8} E_1 + \frac{1}{4} E_2 \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถประมาณค่าอัตราส่วนพัวของ ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างยังโมดูลัสและโมดูลัสเฉือนได้เป็น

$$\tilde{\nu} = \frac{\tilde{E}}{2\tilde{G}} \quad (3.44)$$

3.2.7 สัดส่วนปริมาตรของเส้นใย (FIBER VOLUME FRACTION)

คุณสมบัติของวัสดุประกอบนั้นมีอิทธิพลโดยตรงกับสัดส่วนและคุณสมบัติของวัสดุประสานและเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงในวัสดุประกอบ โดยที่สัดส่วนของวัสดุประกอบนี้สามารถที่จะแสดงให้อยู่ในรูปของ สัดส่วนน้ำหนัก w (weight fraction) ซึ่งสัดส่วนนี้จะเป็นตัวควบคุมน้ำหนักของเส้นใยและน้ำหนักของตัวประสานในการประดิษฐ์วัสดุประกอบ หรืออยู่ในรูปของ สัดส่วนปริมาตร v (volume fraction) ที่ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในการคำนวณถึงคุณสมบัติของวัสดุประกอบ สัดส่วนทั้งสองนี้สามารถที่จะแสดงให้อยู่ในรูปของสมการที่สัมพันธ์กับน้ำหนัก (W) และปริมาตร (V) ได้เป็น

สัดส่วนน้ำหนัก :

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} \quad (3.45)$$

$$w_m = \frac{W_m}{W_c} \quad (3.46)$$

สัดส่วนปริมาตร :

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (3.47)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (3.48)$$

ซึ่งตัวห้อย m , f และ c แสดงถึง วัสดุประสาน, เส้นใย และวัสดุประกอบตามลำดับ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นให้แจ้งไปยังบริษัท
โดยที่
ไม่มีบริษัทใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_f + v_m = 1 \quad (3.49)$$

และ

$$w_f + w_m = 1 \quad (3.50)$$

โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการของความหนาแน่นของวัสดุประกอบได้เป็น

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (3.51)$$

และ

$$\rho_c = \frac{1}{(w_f / \rho_f) + (w_m / \rho_m)} \quad (3.52)$$

จากสมการที่ 3.51 และ 3.52 จะได้สมการของสัดส่วนน้ำหนักคือ

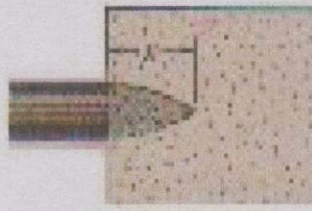
$$w_f = \frac{\rho_f \rho_m - \rho_f \rho_c}{\rho_c (\rho_m - \rho_f)} \quad (3.53)$$

3.3 การกระแทกในวัสดุประกอบ

พฤติกรรมที่เกิดจากการกระแทกของวัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนั้น จัดได้ว่าเป็นลักษณะปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนยุ่งยากมาก ในการทดสอบการกระแทกของวัสดุประกอบโดยปกติจะมีอยู่หลายวิธี [13] โดยส่วนใหญ่จะเป็นการวัดค่าของแรงเทียบกับเวลา หรือวัดหาพลังงานเทียบกับเวลานั้นๆ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่จะใช้ในช่วงที่มีความเร็วปะทะต่ำๆ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดสอบในงานวิจัยนี้ (โดยในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการกระแทกที่มีความเร็วปะทะสูงๆ หรือระดับพลังงานสูงๆ) ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดหรือเปลี่ยนจากการวิเคราะห์ในทางไดนามิกส์ ให้อยู่ในรูปของการวิเคราะห์ในทางสถิตย์เพื่อให้เกิดความง่ายขึ้นในการวิเคราะห์การกระแทก ซึ่งส่วนสำคัญนี้คือการประมาณค่าโหลดจากไดนามิกส์โหลดหรือโหลดที่เกิดจากการปะทะของวัสดุซึ่งมีมวลและมีความเร็ว ไปเป็นสถิตย์โหลด โดยจะใช้หลักการของงานหรือพลังงานมาใช้ในการวิเคราะห์

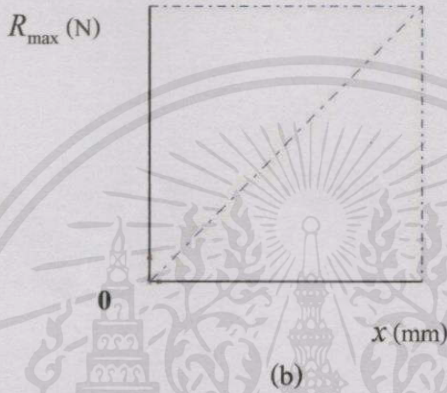
ในการประมาณค่าโหลดของกระสุนปืนจากไดนามิกส์โหลดไปเป็นสถิตย์โหลด สามารถพิจารณาได้จาก แรงต้านทาน (R) ต่อระยะ (x) ของลูกกระสุนปืนที่เจาะเข้าไปได้ลึกที่สุดในเรื่องวัสดุทดสอบ ซึ่งจะเป็นไปในลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยสมมติให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วัสดุทดสอบ
ใยแก้ว/อีพอกซี

(a)



รูปที่ 3.4 (a) ลักษณะการฝังตัวของกระสุนในวัสดุทดสอบ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทาน (R) กับระยะฝังตัวของกระสุน (x)

จากความสัมพันธ์ของพลังงานสามารถแสดงได้โดย

$$\text{พลังงานปะทะของกระสุน} = \text{พื้นที่ใต้กราฟ } R - x \quad (3.54)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.54 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$U = \frac{1}{2} x R_{\max} \quad (3.55)$$

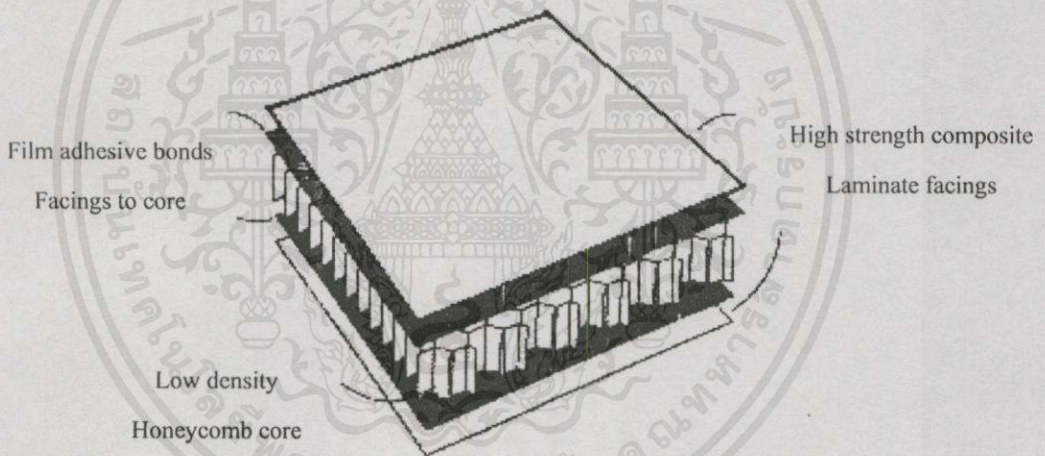
และจะได้ค่าแรงต้านของกระสุน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งาน $R_{\max} = \frac{2U}{x}$ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.56)

จากสมการที่ 3.56 จะได้ค่าแรงต้านของกระสุนในเนื้อวัสดุทดสอบ โดยจะพิจารณาให้มีค่าเท่ากับสปีดโพลิตที่ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ในทางสปีด ซึ่งจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาระยะขูดและหาค่าพลังงานความเครียด (strain energy) ของวัสดุทดสอบโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

3.4 โครงสร้างแบบแซนด์วิช (SANDWICH STRUCTURE)

โครงสร้างนี้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นแกน (core) ที่เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงและความแข็งขึ้นน้อย อยู่ตรงกลาง และถูกประกบด้วยแผ่นแบนที่ผิวหน้า (face sheet) ที่เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงประกบอยู่ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแผ่นที่ประกบที่บริเวณผิวทั้ง 2 ด้านนี้อาจจะเป็นวัสดุประกอบที่มีการเสริมแรงเป็นชั้นๆก็ได้ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่บริเวณผิวด้านนอก



รูปที่ 3.5 โครงสร้างแบบแซนด์วิช [4]

การจัดเรียงโครงสร้างแบบนี้ จะให้ค่าความแข็งขึ้นที่สูงและมีน้ำหนักเบา และหลักการพื้นฐานของโครงสร้างแซนด์วิชจะมีลักษณะเหมือนกับ I beam โดยส่วนที่ผิวหน้า (face sheet) จะรองรับโหลดตามแนวแกนและความเค้นคดตามขวางทั้งหมด ส่วนที่เป็นแกน (core) จะทำหน้าที่ต้านทานการเสีรูปร่างและรองรับแรงเฉือนในแนวตั้งฉากกับส่วนผิวหน้า และเป็นตัวกลางในการแยกให้ผิวหน้าทั้ง 2 ผิดูอยู่ห่างกัน เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ให้มีค่าสูงขึ้นมา ทำให้มีความแข็งแรงและต้านทานการคดได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้ทำผิวหน้าอย่างเดียว โดยวัสดุที่นิยมใช้ทำแกนได้แก่ โพลีเมอร์ , ยางสังเคราะห์ , ไม้อัด หรือ อลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งแกนกลางที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น แกนแบบตัน (foam core) , แกนแบบโครงถัก

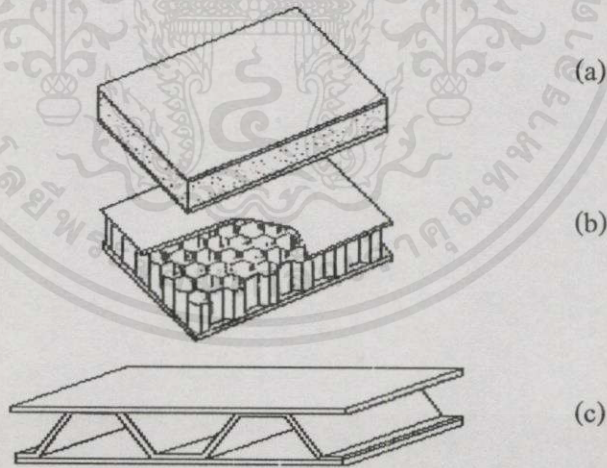
(corrugated core) และ แกนแบบรวงผึ้ง (honeycomb core) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรูปร่างที่แกนกลางทำด้วยอลูมิเนียมแผ่นบาง จะแสดงในตารางที่ 3.1

โครงสร้างแบบแซนด์วิชที่มีแกนแบบรวงผึ้งนั้นถือได้ว่าได้รับความนิยมนำมาใช้มากที่สุด โดยวัสดุที่ใช้ในการทำแกนรูปร่างส่วนใหญ่จะใช้อลูมิเนียมแผ่นบาง ซึ่งวิธีการผลิตแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 [14]

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุรูปร่างที่แกนกลางทำจากอลูมิเนียมแผ่นบาง [15]

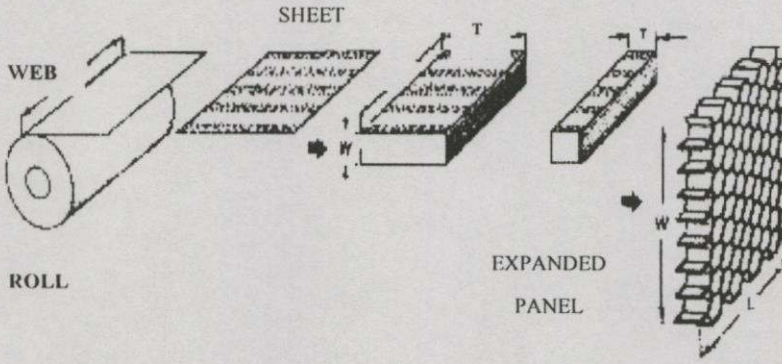
Hexcel Honeycomb Designation Material-Cell-Gage	Nominal Density pcf	Compressive			Crush Strength psi	Plate Shear			
		Bare Strength psi	Stabilized			"L" Direction		"W" Direction	
			Strength psi	Strength psi	Modulus ksi	Strength psi	Modulus ksi	Strength psi	Modulus ksi
		ACG-1/4-0.003	5.2	620	650	148	245	345	63
ACG-3/8-0.003	3.6	325	340	92	120	210	40	130	20
ACG-1/2-0.003	2.5	165	170	40	60	130	25	70	15
ACG-3/4-0.003	1.8	110	120	24	45	95	16	55	8
ACG-1-0.003	1.4	75	80	16	25	55	14	40	7

Test data obtained at 0.625 inch thickness.

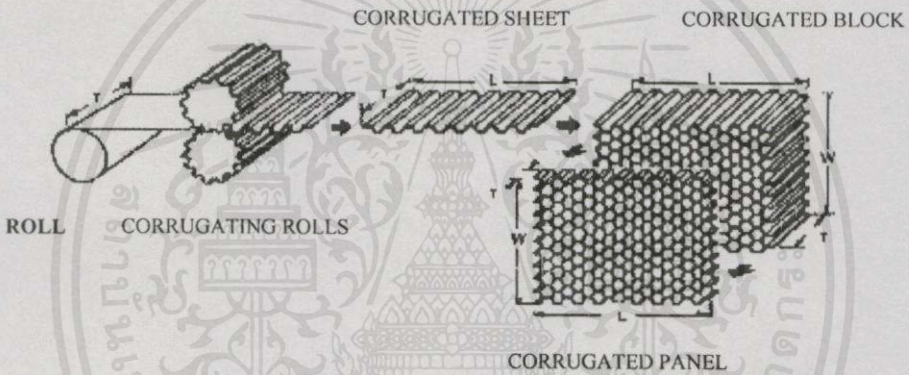


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะแกนกลางแบบต่างๆ (a) แกนแบบตัน (foam core) , (b) แกนแบบรวงผึ้ง (honeycomb core) , (c) แกนแบบโครงถัก (corrugated core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 Expansion Process



รูปที่ 3.8 Corrugation process

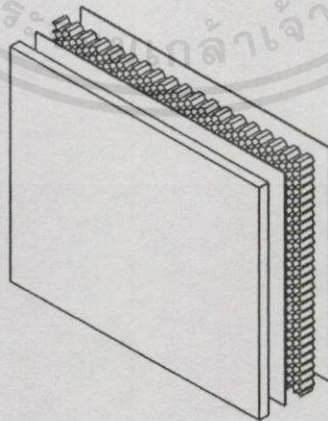
วิธี Expansion process ในรูปที่ 3.7 ทำได้โดย ทากาวสลับตำแหน่งกันในแต่ละชั้นของแผ่นแบบ แล้วนำมาดึงยึดออกให้เป็นรูปร่างผืน โดยที่ขนาดของเซลล์รูปร่างผืนจะถูกควบคุมโดยระยะห่างระหว่างแถบกาว ส่วนวิธี Corrugation process ในรูปที่ 3.8 นั้นทำได้โดยการพับแผ่นแบนให้เป็นรอยย่น (ครึ่งหนึ่งของรูปหกเหลี่ยม) แล้วนำมายึดติดเข้าด้วยกัน

ในการศึกษาถึงลักษณะและพฤติกรรมในการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะจุดขณะรับแรง หรือ การศึกษาถึงพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของเซลล์รูปร่างผืนในวัสดุโครงสร้างแบบแซนด์วิช ที่ผ่านมายังไม่ได้มีการกำหนดเป็นสูตรหรือทฤษฎีที่แน่นอน (ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเชิงทดลอง) ดังนั้นในการศึกษาวิเคราะห์นี้จะใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ถึงการยุบตัวเฉพาะจุดของเซลล์รูปร่างผืน รวมทั้งใช้ในการประมาณค่าพลังงานที่ถูกดูดซับ โดยวัสดุประกอบรูปร่างผืน

การทดสอบการกระแทกบนวัสดุประกอบ

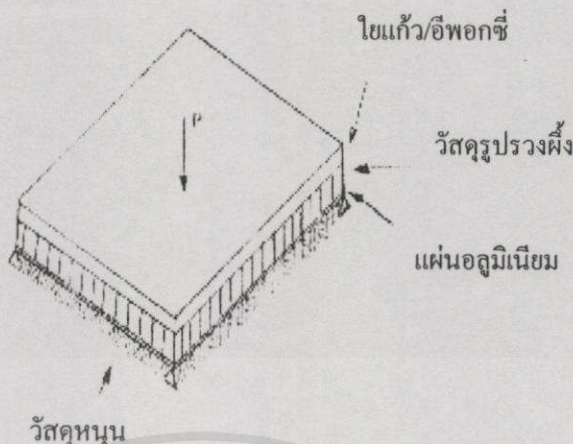
4.1 หลักการและวิธีการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการกระแทกบนวัสดุประกอบรูปร่างผืน การทดสอบการกระแทกนี้จะทำการทดสอบโดยการยิงวัสดุทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาดต่างๆตามที่กำหนดไว้ โดยในตอนแรกจะเป็นการทดสอบยิงวัสดุเพื่อหาขนาดความหนาหรือจำนวนชั้นของการลามิเนตที่เหมาะสมของวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซี ที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ดี เมื่อได้วัสดุประกอบที่ตรงตามความต้องการแล้วก็จะทำการวัดระยะฝั่งตัวของกระสุนในเนื้อวัสดุทดสอบเพื่อใช้ในการประมาณค่าสถิติโหลด ต่อจากนั้นก็ให้นำวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซีที่มีขนาดเหมาะสม มาประกอบเข้าด้วยกันเป็น โครงสร้างแบบแซนด์วิช(ใช้อีพอกซีเป็นตัวยึดติด)โดยใช้แกนกลางเป็นแกนรูปร่างผืนที่ทำจากอลูมิเนียมแผ่นบาง (ขนาดเซลล์เท่ากับ 9.525 และ 6.35 มิลลิเมตร) และมีแผ่นอลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตรประกบอยู่ด้านบนและด้านล่างเซลล์รูปร่างผืน (ดังรูปที่ 4.1) เมื่อได้วัสดุประกอบ โครงสร้างแบบแซนด์วิชแล้วก็จะทำการยิงทดสอบ โดยมีการรองรับแบบง่าย (simple support) ที่มุมทั้งสี่และมีวัสดุหนุนซึ่งเป็นคินเหนียวเป็นตัวรองรับ (ดังรูปที่ 4.2) เพื่อดูพฤติกรรมในการยุบตัวของเซลล์รูปร่างผืนและการยุบตัวของแผ่นประกบด้านล่างของเซลล์รูปร่างผืนรวมทั้งการยุบตัวของวัสดุหนุน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรยุบตัวตามมาตรฐานของเสื่อเกราะกันกระสุน และยังสามารถใช้ในการประมาณการดูดซับพลังงาน โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อไป



รูปที่ 4.1 ลักษณะการประกอบกันของวัสดุทดสอบ โครงสร้างแบบแซนด์วิชที่ใช้ทดสอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โหลดที่กระทำบนวัสดุที่มีการรองรับแบบ Simple support และวัสดุหนุนที่ผิวด้านล่างในวัสดุทดสอบ

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

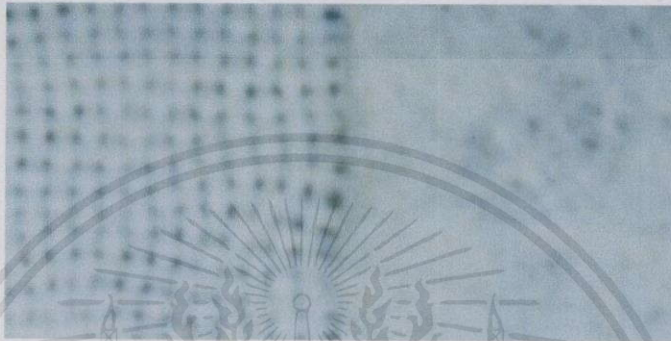
1. วัสดุประกอบโยแก้ว/อิพอกซี่ แบบเส้นใยถัก ($v_f = 45\%$) ขนาด 254×304.8 มม²
2. วัสดุประกอบโยแก้ว/อิพอกซี่ แบบเส้นใยไม่ถักเนื่องกระจายในทุกทิศทาง ($v_f = 45\%$) ขนาด 254×304.8 มม²
3. เซลล์รวงฝิ่งอลูมิเนียม ขนาดเซลล์ 9.525 และ 6.35 มม.หนา 15.875 มม.
4. วัสดุหนุนที่เป็นดินเหนียวขนาดความหนา 102 มม. (สอดคล้องกับมาตรฐาน NIJ-STD-0101.30 ของวัสดุหนุนที่ใช้ในการทำสื่อเกราะกันกระสุน)
5. แผ่นอลูมิเนียมหนา 1 มม. (ใช้สำหรับประกบด้านบน และ ด้านล่างเซลล์รวงฝิ่ง)
6. กาวอิพอกซี่
7. อวูรปิ่นขนาด .38 และ ขนาด 9 มม.

4.3 การเตรียมวัสดุทดสอบ

วัสดุประกอบโยแก้ว/อิพอกซี่ ที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิดดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ค่าสัดส่วนของเส้นใย (v_f) ที่ใช้ในการทดสอบนี้เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่นิยมใช้โดยทั่วไปในวัสดุประกอบโยแก้ว/อิพอกซี่ เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ความแข็งแรงสูง และสามารถผลิตได้ง่าย โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งการคำนวณหาหน้าหนักของเส้นใยและหน้าหนักของตัวประสาน สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.45 , 3.46 , 3.50 , 3.51 และ 3.53 โดยที่กำหนดให้น้ำหนักโดยรวมของวัสดุประกอบ (เฉพาะโยแก้ว/อิพอกซี่) (W_c) มีค่าเท่ากับ 1500 กรัม (เป็นค่าเฉลี่ยของน้ำหนักของวัสดุ

ประกอบใยแก้ว/อิพอกซีที่ใช้ทดสอบ) และจากตารางที่ 2.1 จะได้ค่าความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว (ρ_f) และค่าความหนาแน่นของอิพอกซี (ρ_m) เท่ากับ 2.54 และ 1.2 g/cm³ ตามลำดับ แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการข้างต้น จะได้น้ำหนักของเส้นใยแก้วประมาณ 950 กรัม และน้ำหนักของอิพอกซีประมาณ 550 กรัม (สัดส่วนนี้จะทำให้ได้ค่า $v_f = 45\%$) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำ เช่น เส้นใยแก้วทั้งสองแบบ , กาวอิพอกซี และวัสดุรูปวงผึ้งที่ใช้ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 , 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ส่วนวัสดุประกอบใยแก้ว/อิพอกซีทั้งสองชนิดที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.6

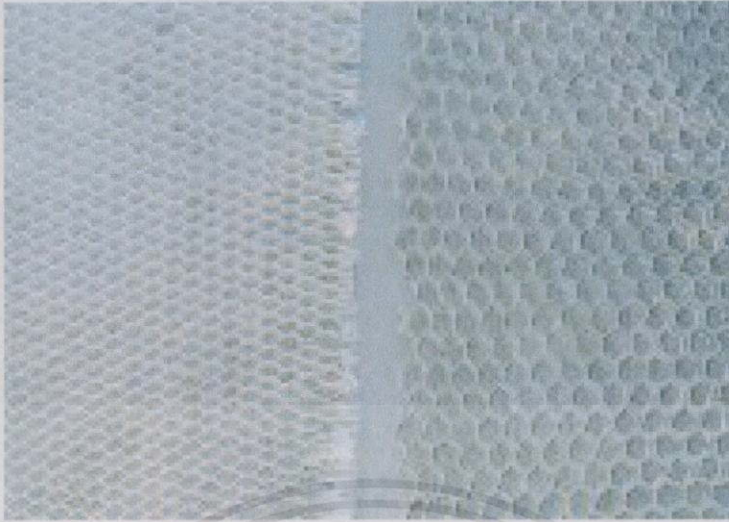


รูปที่ 4.3 (a) ใยแก้วชนิดเส้นใยถัก (b) ใยแก้วชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง



รูปที่ 4.4 กาวอิพอกซีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



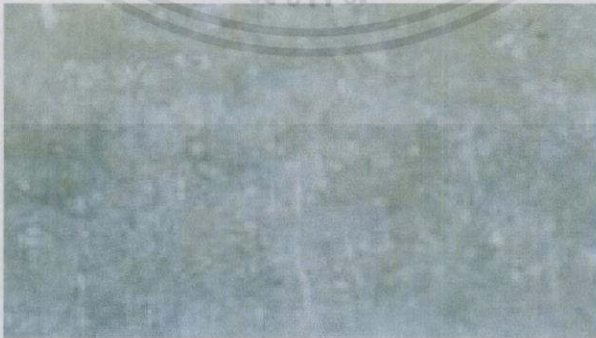
(a)

(b)

รูปที่ 4.5 วัสดุปรวงผิงหนา 15.875 มม. (a) ขนาดเซลล์ 6.35 มม. (b) ขนาดเซลล์ 9.525 มม.



(a)



(b)

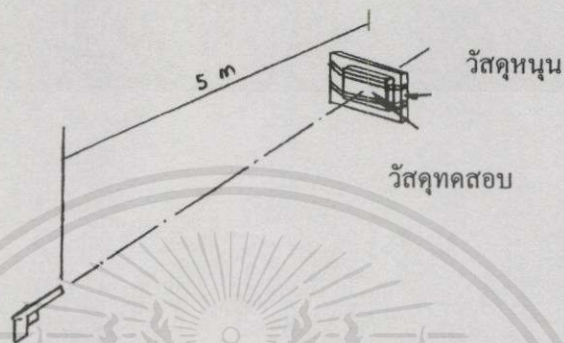
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.6 วัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซี (a) แบบเส้นใยถัก (b) แบบเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุก

ทิศทาง

4.4 การทดสอบการกระแทก

การทดสอบการกระแทกทุกแบบในงานวิจัยนี้ จะใช้ระยะในการยิงทดสอบเท่ากัน คือมีระยะยิงห่างจากวัสดุทดสอบ 5 เมตร (ตามมาตรฐาน NIJ-STD-0101.30 ที่ใช้ในการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุน) ดังรูปที่ 4.7 และวัสดุทดสอบที่ใช้ในแต่ละแบบจะมีจำนวนอย่างละ 5 ชิ้น ซึ่งค่าต่างๆที่ได้จะใช้ค่าเฉลี่ยในการคำนวณ



รูปที่ 4.7 แสดงระยะห่างในการยิงทดสอบ

4.4.1 การทดสอบเพื่อหาขนาดความหนาหรือจำนวนชั้นของการลามีเทท

การทดสอบทำได้โดยการยิงวัสดุทดสอบโยแกว้อ/อีพอกซ์ทั้งสองชนิด (โดยไม่มีวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมเป็นตัวรองรับ) ด้วยปืนขนาด .38 และขนาด 9 มม. เพื่อดูความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน โดยที่กระสุนขนาด .38 จะเป็นแบบหัวตะกั่วปลายมนและกระสุนขนาด 9 มม. จะเป็นแบบหัวหุ้มเปลือกแข็งซึ่งเป็นหัวกระสุนแบบที่ให้อำนาจการเจาะทะลุได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกระสุนขนาดเดียวกันในแบบอื่นๆ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า จำนวนชั้นของเส้นโยแกว้อชนิดถัก 15 ชั้น สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนทั้งสองชนิดได้ดี ในขณะที่ชั้นความหนาเดียวกันนี้ โยแกว้อชนิดเส้นโยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้เพียงกระสุนขนาด .38

4.4.2 การทดสอบเพื่อหาระยะฝังตัวของกระสุน เพื่อใช้ในการประมาณค่าโหด

จากการทดสอบข้างต้นพบว่าโยแกว้อชนิดถักสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ดีกว่า ดังนั้นในการวัดหาระยะฝังตัวของกระสุนจะวัดหาจากเส้นโยชนิดนี้ ซึ่งจากการวัดพบว่ากระสุนขนาด .38 สามารถฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุทดสอบได้ลึกที่สุด 4.5 มม. และกระสุนขนาด 9 มม. ฝังเข้าไปได้ลึกที่สุด 6.5 มม. โดยที่ค่าพลังงานปะทะของกระสุนปืนจะแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พลังงานปะทะของกระสุน

ขนาดกระสุน	พลังงานปะทะของกระสุน (Nm)
.38 [16]	271.2
9 มม. [17]	454.26

แทนค่าระยะห่างตัวของกระสุน และ พลังงานปะทะของกระสุนจากตารางที่ 4.1 ลงในสมการที่ 3.56 จะได้โหลดเนื่องจากแรงต้านของกระสุน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 โหลดเนื่องจากแรงต้านของกระสุนในเนื้อวัสดุทดสอบ

ขนาดกระสุน	โหลดเนื่องจากแรงต้านของกระสุน (KN)
.38	120.53
9 มม.	139.8

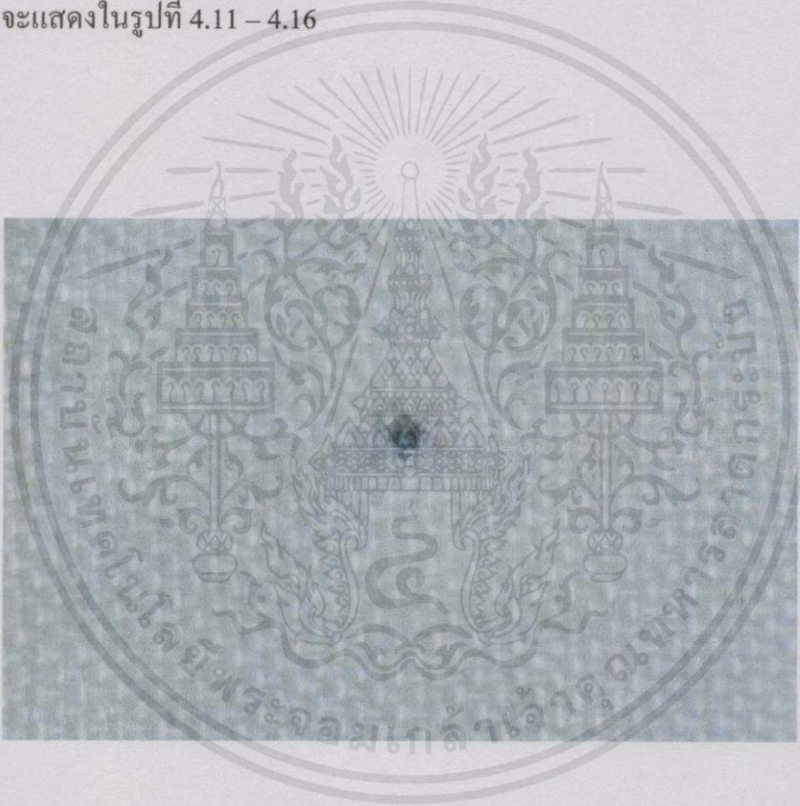
4.4.3 การทดสอบการกระแทกบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิช

ในการทดสอบจะใช้โหลดและวัสดุทดสอบแตกต่างกัน 6 แบบคือ

1. โหลดเนื่องจากกระสุนขนาด .38 ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถัก โดยมีขนาดเซลล์รวงผึ้งเท่ากับ 9.525 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น .38 Woven 9.525)
2. โหลดเนื่องจากกระสุนขนาด .38 ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถัก โดยมีขนาดเซลล์รวงผึ้งเท่ากับ 6.35 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น .38 Woven 6.35)
3. โหลดเนื่องจากกระสุนขนาด 9 มม. ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถัก โดยมีขนาดเซลล์รวงผึ้งเท่ากับ 9.525 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น 9 มม. Woven 9.525)
4. โหลดเนื่องจากกระสุนขนาด 9 มม. ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถัก โดยมีขนาดเซลล์รวงผึ้งเท่ากับ 6.35 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น .38 Woven 6.35)
5. โหลดเนื่องจากกระสุนขนาด .38 ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง โดยมีขนาดเซลล์รวงผึ้งเท่ากับ 9.525 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น .38 Random 9.525) ในทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

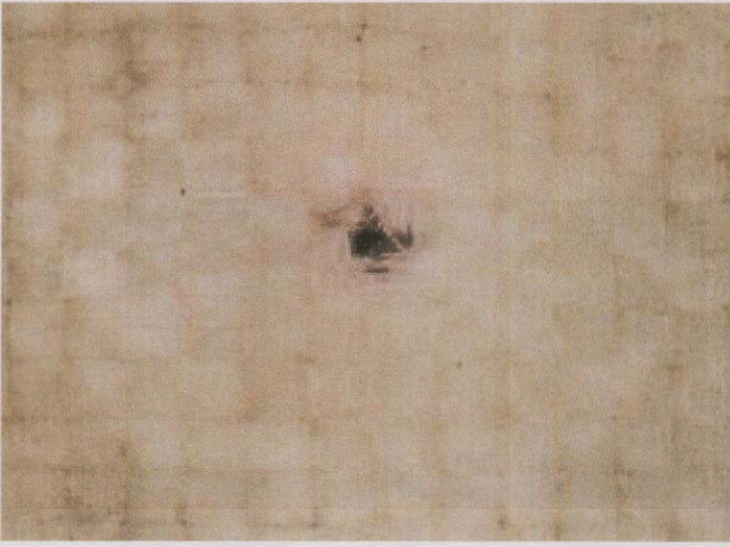
6. โหลตเนื่องจากกระสุนขนาด .38 ที่กระทำบนวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนด์วิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซ์ชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง โดยมีขนาดเซลล์รูวงรีเท่ากับ 6.35 มม. (หรือเขียนเป็นตัวย่อได้เป็น .38 Random 6.35)

จากการทดสอบโดยการยิงด้วยปืนขนาด .38 และขนาด 9 มม. สังเกตพบว่าขณะเกิดการปะทะไม่มีการสะท้อนกลับของวัสดุทดสอบ และระยะยุบตัวของวัสดุหนูนที่ฐานรองรับมีการยุบตัวเฉพาะจุดเท่ากับระยะยุบตัวของแผ่นประกบด้านล่างของเซลล์รูวงรี ซึ่งลักษณะรอยบาดแผลของกระสุนในวัสดุทดสอบใยแก้วทั้งสองประเภทจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.8-4.10 ภาคตัดของวัสดุทดสอบชนิดต่างๆหลังจากเกิดการปะทะของกระสุน โดยจะแสดงถึงลักษณะการยุบตัวของเซลล์รูวงรีและแผ่นประกบด้านล่าง รวมทั้งการเจาะทะลวงและการเปลี่ยนรูปของหัวกระสุนหลังจากเกิดการปะทะจะแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.16



รูปที่ 4.8 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยถัก เนื่องจากกระสุนขนาด .38

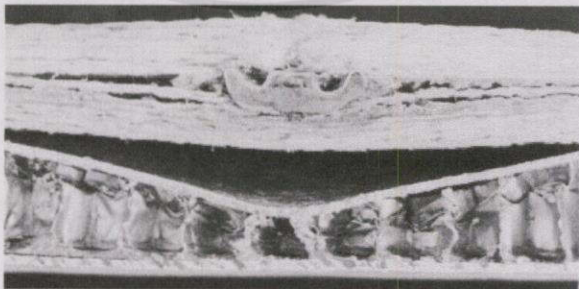
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



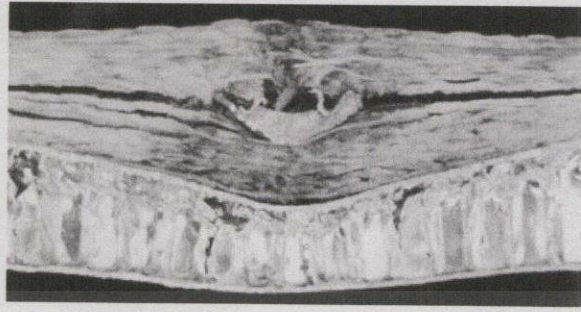
รูปที่ 4.9 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยถัก เนื่องจากกระสุนขนาด 9 มม.



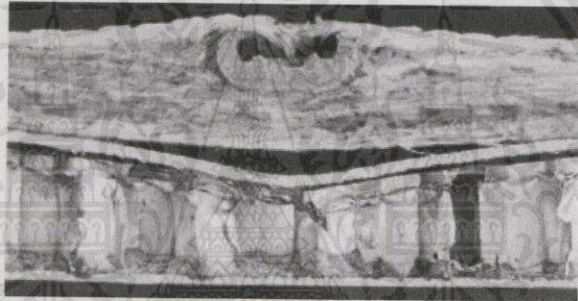
รูปที่ 4.10 ลักษณะรอยบาดแผลของวัสดุทดสอบชนิดเส้นใยไม่ถักเนื่องกระจายในทุกทิศทาง เนื่องจากกระสุนขนาด .38



รูปที่ 4.11 การยุบตัวของเซลล์รูวงผึ้ง (9 มม. Woven 9.525) ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การยวบตัวของเซลลั้วรงผึ่ง (9 มม. Woven 6.35)

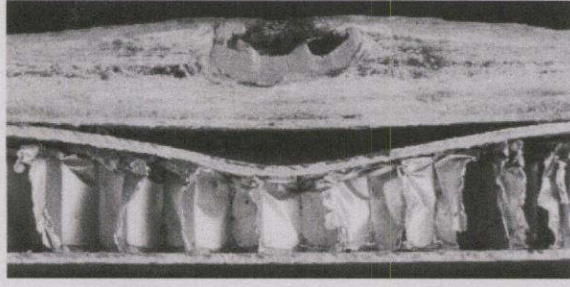


รูปที่ 4.13 การยวบตัวของเซลลั้วรงผึ่ง (.38 Woven 9.525)

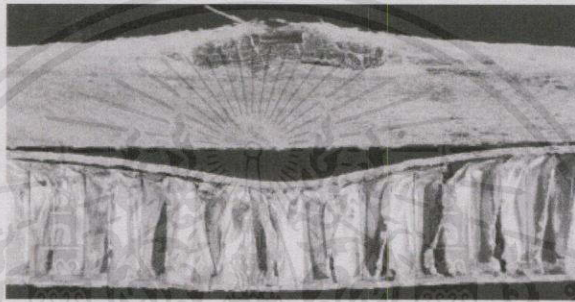


รูปที่ 4.14 การยวบตัวของเซลลั้วรงผึ่ง (.38 Woven 6.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 9.525)



รูปที่ 4.16 การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (.38 Random 6.35)

ตารางที่ 4.3 แสดงระยะขยับตัวของแผ่นประกบด้านต่างเซลล์รวงผึ้ง

ขนาดกระสุน	ชนิดของ ใยแก้ว/อีพอกซี	ขนาดเซลล์รวงผึ้ง (มม.)	ระยะขยับตัวของแผ่นประกบ ด้านต่างเซลล์รวงผึ้ง (มม.)
.38	Woven	9.525	0.44
.38	Woven	6.35	1.32
9 มม.	Woven	9.525	0.56
9 มม.	Woven	6.35	3.96
.38	Random	9.525	0.42
.38	Random	6.35	1.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 - 4.16 พบว่าการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งขนาดเซลล์เท่ากับ 9.525 มม. จะเกิดการยุบตัวมากกว่าเซลล์รวงผึ้งขนาด 6.35 มม. ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์รวงผึ้งขนาด 9.525 มม. มีค่าโมดูลัสต่ำกว่า จึงทำให้มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างได้น้อยกว่า โดยที่เซลล์รวงผึ้งขนาด 9.525 มม. จะเหลือพลังงานส่งผ่านไปยังแผ่นประกบด้านล่างน้อยกว่าเซลล์ขนาด 6.35 มม. ทำให้การยุบตัวของแผ่นประกบด้านล่างมีค่าน้อยกว่า และจากการสังเกตการเปลี่ยนรูปร่างของหัวกระสุนจะพบว่าในวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่ใช้เซลล์รวงผึ้งขนาด 6.35 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปของหัวกระสุนมากกว่าในวัตถุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่ใช้เซลล์รวงผึ้งขนาด 9.525 มม. เนื่องจากเซลล์รวงผึ้งขนาด 6.35 มม. จะมีความต้านทานในการยุบตัวสูงกว่าจึงทำให้เกิดแรงด้านในหัวกระสุนมากกว่าและมีผลทำให้การเปลี่ยนรูปของหัวกระสุนเกิดขึ้นมากกว่าตามไปด้วย และจากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าวัสดุที่ใช้ทดสอบทั้งหมดนี้จะให้ค่าการยุบตัวที่บริเวณผิวด้านหลังน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะยุบตัวตามมาตรฐานของเสื้อเกราะกันกระสุน(ระยะยุบตัวตามมาตรฐานของเสื้อเกราะกันกระสุนต้องไม่เกิน 44 มม.) ซึ่งระยะยุบตัวที่น้อยนี้จะมีผลทำให้มีการกระจายแรงที่บริเวณผิวด้านหลังได้ดีกว่า ช่วยลดอาการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการยุบตัวเฉพาะจุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีการดูดซับพลังงานจากการปะทะได้ดี(โดยดูได้จากการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้ง)เมื่อเทียบกับวัสดุเสริมและเสื้อเกราะกันกระสุนที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการ ประมาณค่าการดูดซับพลังงานจากการกระแทกของวัตถุประกอบ

5.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ การวิเคราะห์โดยวิธี Classical และ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่การวิเคราะห์โดยวิธี Classical หรือ Continuum เพื่อใช้ในการหาค่าความเค้นของวัสดุได้ถูกพัฒนาเป็นเวลายาวนาน เพื่อหาเทคนิคต่างๆที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการใช้งานในวัสดุจริงๆให้ได้มากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของการประยุกต์ใช้สมการของความสมดุล และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ในการที่จะหาสมการที่ใช้หาค่าการกระจัด (displacement) และความเค้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะต้องมีการตั้งสมมติฐานของปัญหาก่อนที่จะหาถึงผลลัพธ์ที่ได้ เช่น การพิจารณาให้ปัญหานั้นเป็นปัญหาแบบ 1 , 2 หรือ 3 มิติ หรือจะพิจารณาให้เป็นแบบคาน หรือเป็นแผ่นระนาบ เป็นต้น ซึ่งโดยมากเราจะพิจารณาให้เป็นไอโซทรอปิกเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ แต่ก็ยังมีปัญหาอีกมากมายที่การวิเคราะห์นั้นใช้สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่ไอโซทรอปิก สมการที่ใช้นั้นก็มีความยุ่งยากมากขึ้น โดยข้อจำกัดของวิธีวิเคราะห์แบบนี้ คือ ใช้ในวัสดุที่มีรูปทรงง่ายๆไม่ซับซ้อน ส่วนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่น่าิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ดังเช่น ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (เช่น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือความเค้นในชิ้นส่วนต่างๆของวัสดุ) , ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน , ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน , การไหลของๆไหล และการถ่ายเทมวล เป็นต้น การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆของวัสดุที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถหาได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนหรือโครงสร้างของวัสดุมากมายที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือบางบริเวณอาจมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน หรือ วัสดุที่ใช้ต่างชนิดกัน เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งการแก้ปัญหาคับวิธีนี้ ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นงาน ซึ่งเราเรียกชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (node) ของแต่ละเอลิเมนต์

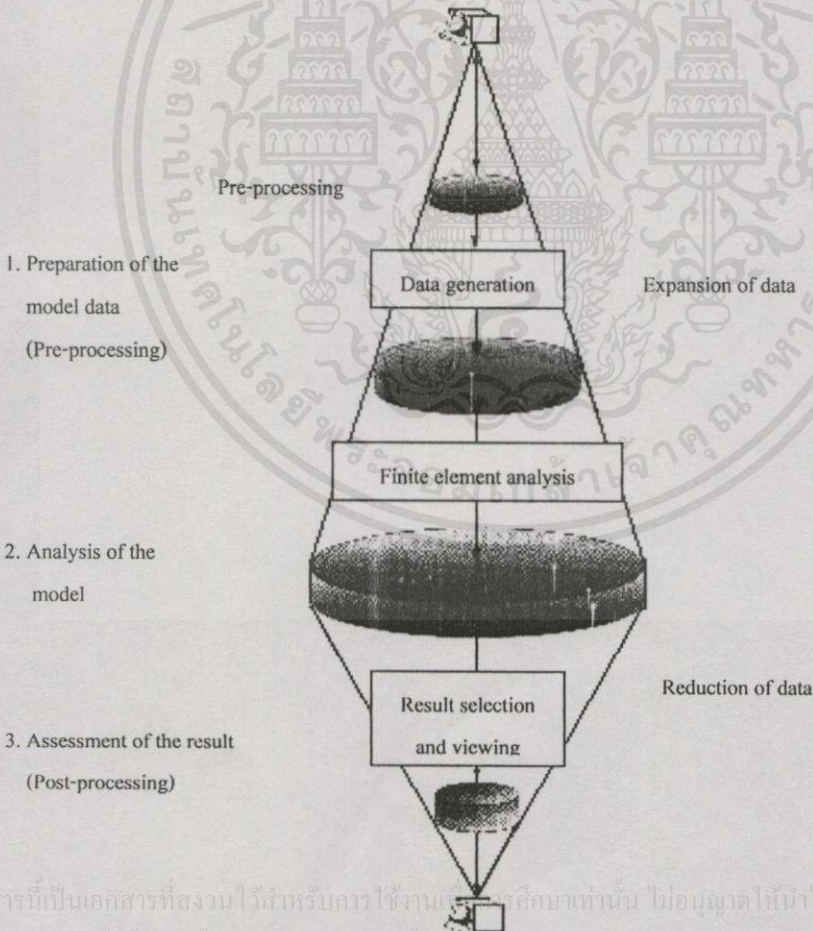
ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องมากน้อยแค่ไหนนั้น ขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ ประการแรก ขึ้นอยู่กับการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ว่ามีลักษณะความละเอียดใกล้เคียงกับรูปร่างของชิ้นงานหรือไม่ ประการที่สอง คือ การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการสุดท้าย คือ ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ว่ามีความละเอียดในการคำนวณมากน้อยเพียงใด

5.2 ขั้นตอนในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FEA มีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนคือ [18]

1. ขั้นตอนเตรียมข้อมูลของต้นแบบจำลอง (model data) ก่อนที่จะถูกกระทำ (pre-processing)
2. ขั้นตอนวิเคราะห์ต้นแบบจำลอง (analysis of the model)
3. ขั้นตอนพิจารณาผลที่เกิดขึ้นภายหลังการวิเคราะห์ (post-processing)

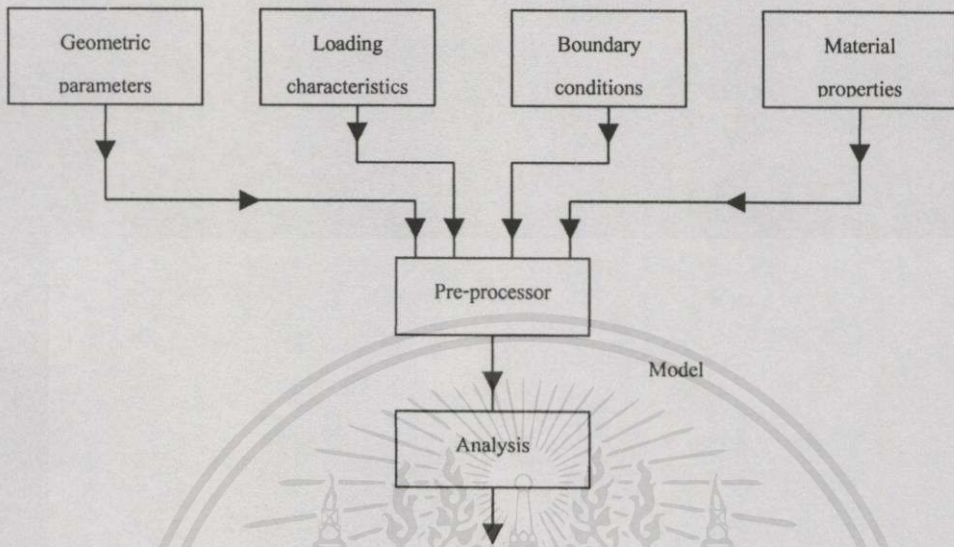
ลักษณะแผนภาพของขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEA

ในการเตรียมข้อมูลของต้นแบบ (pre-processing) จะเป็นการสร้างรูปภาพทรงเรขาคณิตของต้นแบบ จากนั้นจะทำการสร้างโครงข่าย (mesh) ของเอลิเมนต์ต่างๆ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมการวิเคราะห์จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2

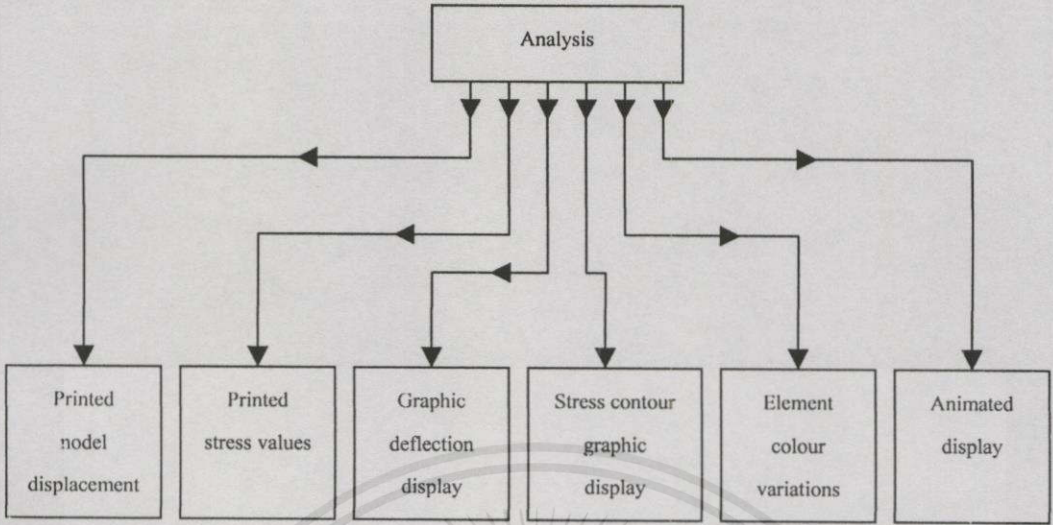


รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการเตรียมการวิเคราะห์ (pre-processing)

การป้อนข้อมูลต่างๆที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และการคำนวณในขั้นนี้ประกอบด้วย

1. ค่าตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตต้นแบบ (geometric parameters) เช่น ชนิดของเอลิเมนต์, ตำแหน่งของจุดต่อ (node), ความถี่ของโครงข่าย
2. ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของแรงที่มากระทำ (loading characteristics) เช่น ขนาด, ตำแหน่ง และทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ ความดัน, การเปลี่ยนแปลงความร้อน หรือ โหลดเนื่องจากอุณหภูมิ เป็นต้น
3. เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) เช่น ลักษณะการหมุนของแกน หรือการกำหนดค่าระดับอิสระในการเคลื่อนที่ (degree of freedom)
4. คุณสมบัติของวัสดุตัวต้นแบบ (material properties) เช่น ค่า ความหนาแน่นของวัสดุ, ยิงโมดูลัส, อัตราส่วนพัวซอง เป็นต้น

ขั้นตอนต่อไปโปรแกรมก็จะทำการวิเคราะห์ (analysis of the model) เพื่อหาคำตอบของปัญหา หลังจากทำการวิเคราะห์แล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการแสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้ (post-processing) โดยจะแสดงผลลัพธ์ผ่านจอภาพ หรืออาจจะพิมพ์หรือพล็อตผลออกมาดูก็ได้ ซึ่งลักษณะของผลที่ได้ อาจเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขหรือภาพกราฟิก ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ (post-processing)

5.3 ข้อมูลต่างๆที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และการคำนวณ

ลักษณะของโหนดและค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นลักษณะเดียวกับกับที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยจะพิจารณาให้วัตถุประกอบใยแก้ว/อีพอกซี ชนิดเส้นใยถักเป็นวัตถุประเภททรานสเวอร์ตีไอโซทรอปิก และพิจารณาให้วัตถุประกอบใยแก้ว/อีพอกซี ชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทางเป็นวัตถุประเภทไอโซทรอปิก ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมที่ต้องใส่ให้แก่โปรแกรมในส่วนของการเตรียมการวิเคราะห์ สำหรับวัตถุประเภททรานสเวอร์ตีไอโซทรอปิกหาได้จากตารางที่ 2.2 คือ

วัตถุประเภททรานสเวอร์ตีไอโซทรอปิก (วัสดุทดสอบใยแก้ว/อีพอกซี ชนิดเส้นใยถัก ความหนาทั้งหมดเท่ากับ 11 มม.)

โมดูลัสในทิศทาง x (E_x)	38.6 GPa
โมดูลัสในทิศทาง y (E_y)	8.27 GPa
อัตราส่วนปัวซอง (ν_{12})	0.26
อัตราส่วนปัวซอง (ν_{23})	0.52
โมดูลัสเฉือน (G_{xy})	4.14 GPa
โมดูลัสเฉือน (G_{yz})	2.72 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ส่วนค่าคงที่เชิงวิศวกรรมสำหรับวัตถุประโไอโซทรอปิกในที่นี้หาได้จากการแทนค่าคงที่เชิงวิศวกรรมจากตารางที่ 2.2 ลงในสมการที่ 3.42, 3.43 และ 3.44 จะได้เป็น

วัสดุประเภทไอโซทรอปิก (วัสดุทดสอบใยแก้ว/อีพอกซี ชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจาย
ในทุกทิศทาง หนา 11 มม.)

โมดูลัส (E)	19.64 GPa
โมดูลัสเฉือน (G)	6.893 GPa
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	0.413

โดยที่ค่าสติกซ์โพลดที่กระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางในทิศทาง $-z$ จะสอดคล้องกับแรงต้าน
ของกระสุน ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 4.2 คือ

โพลดเนื่องจากกระสุนขนาด .38	120.53 KN
โพลดเนื่องจากกระสุนขนาด 9 มม.	139.8 KN

และค่าคงที่เชิงวิศวกรรมของอลูมิเนียมแผ่นแบนที่ใช้เป็นตัวประกบด้านบนและด้านล่าง
เซลล์รวงผึ้ง รวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุรูปรวงผึ้งอลูมิเนียม (ตาราง ที่ 3.1) คือ

อลูมิเนียมแผ่น (ขนาดความหนาเท่ากับ 1 มม.)

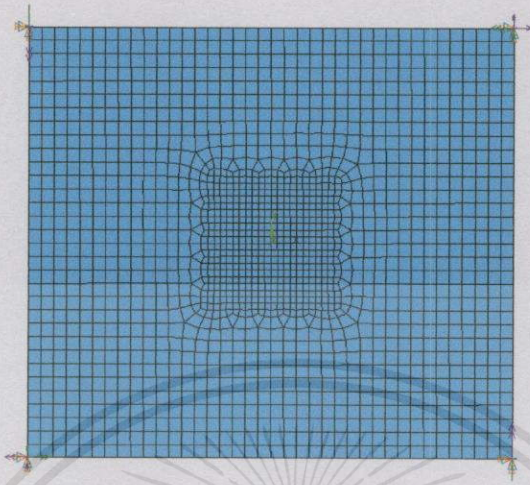
โมดูลัส (E_x)	70 GPa
โมดูลัสเฉือน (G_{xy})	26 GPa
ความเค้นจุดคราก (σ_{yield})	100 MPa
อัตราส่วนปัวซอง (ν_{12})	0.334

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมของวัสดุรูปรวงผึ้งอลูมิเนียม

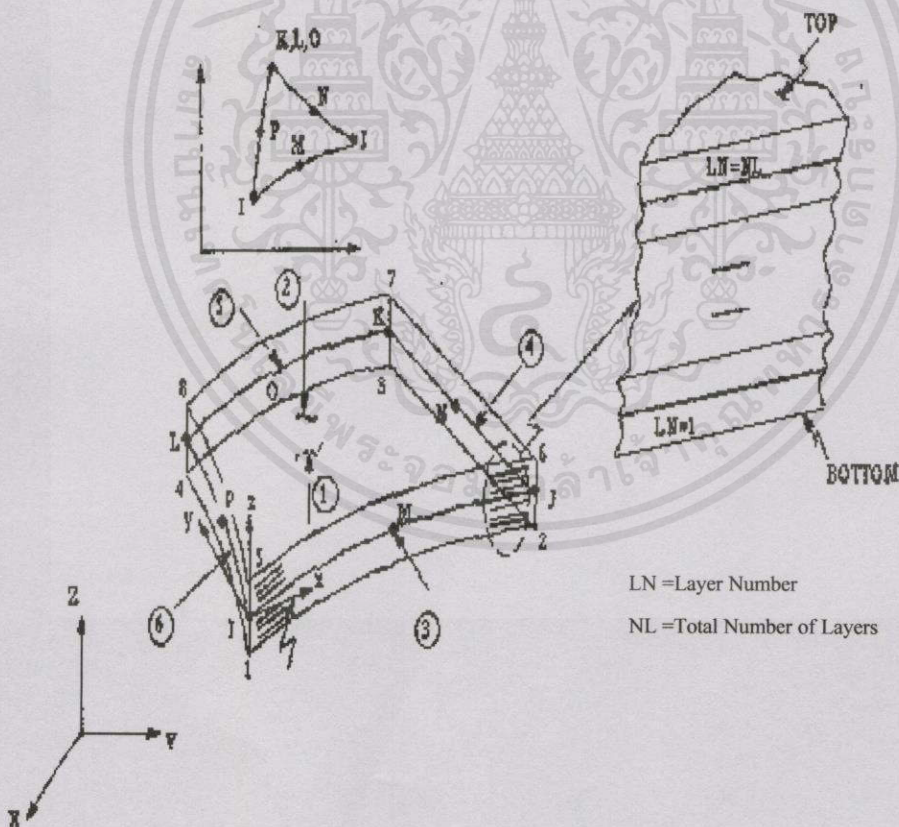
ขนาดเซลล์ (มม.)	Foil Gauge (มม.)	ความหนา แน่น (Kg/m ³)	โมดูลัส (MPa)
6.35	0.0762	83.296	1020.5
9.525	0.0762	57.667	634.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดในการสร้างรูปภาพทรงเรขาคณิตของคั่นแบบจะยึดถือตามขนาดของวัสดุทดสอบ โดยมี
ขนาดเท่ากับ 254*304.8 มม² ซึ่งลักษณะรูปภาพทรงเรขาคณิตของคั่นแบบและการแบ่งเอลิเมนต์ จะ

แสดงอยู่ในรูปที่ 5.4 และลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้รวมทั้งพิกัดแกนของเอลิเมนต์จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.5 โดยที่เอลิเมนต์ที่ใช้จะเป็นแบบ เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงเส้น (shell element)



รูปที่ 5.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (1624 เอลิเมนต์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.5 ระบบพิกัดแกนของเอลิเมนต์

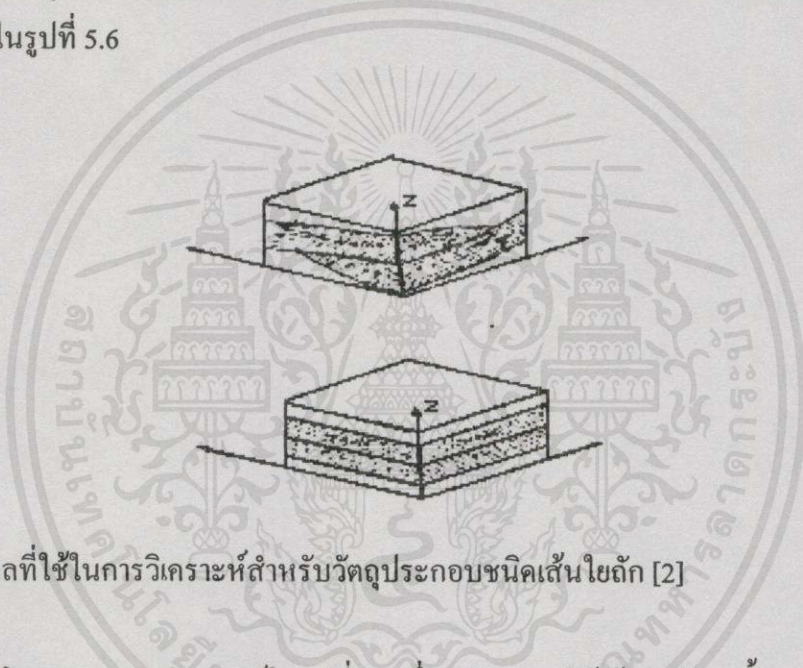
มีการแก้ไขปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมให้ครบถ้วนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล

การยุบตัวของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รวงผึ้งจากการทดสอบพบว่าจะมีระยะยุบตัวเดียวกันกับระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้ง ดังนั้นในการวิเคราะห์ถึงการยุบตัวจะถือว่าระยะยุบตัวระหว่างแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รวงผึ้งและระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งนี้มีระยะยุบตัวที่เท่ากัน

5.4.1 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์การยุบตัวของเซลล์รวงผึ้ง

ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ถึงการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้ง คือการหาลักษณะที่เหมาะสมของการจัดเรียงมุมของเส้นใยในแต่ละชั้นของการลามิเนต ที่ซึ่งมีผลต่อการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งในวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถัก โดยที่โมเดลสำหรับการวิเคราะห์เส้นใยถักนี้จะแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับวัสดุประกอบชนิดเส้นใยถัก [2]

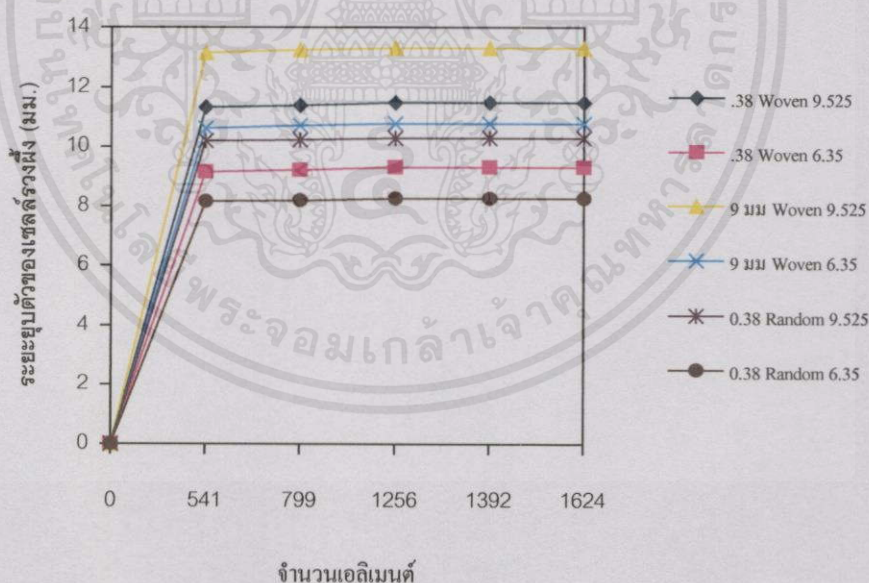
จากโมเดลของการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.6 ซึ่งจะพิจารณาให้เส้นใยถัก 1 ชั้นจะประกอบด้วยชั้นของลามิनाในทิศทางเดียว 2 ชั้นประกบกัน (ในแต่ละชั้นของเส้นใยถักจะมีการจัดเรียงมุมของลามิनाได้ 2 แบบ คือ แบบ $[0/90]$ และแบบ $[45/-45]$ โดยที่การวิเคราะห์หาลักษณะการจัดเรียงมุมของวัสดุประกอบเส้นใยถักในที่นี้จะแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบ $[0/90]_5$ และแบบ $[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$ ซึ่งทั้งสองแบบนี้จะมีจำนวนชั้นของลามิनाในทิศทางเดียวที่เท่ากันคือ 30 ชั้นและมีความหนาชั้นละ 0.37 มม. (หรือเทียบได้กับจำนวนชั้นของเส้นใยถัก 15 ชั้น) โดยที่ผลของการวิเคราะห์ถึงลักษณะการจัดเรียงมุมที่มีผลต่อระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งจะแสดงในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

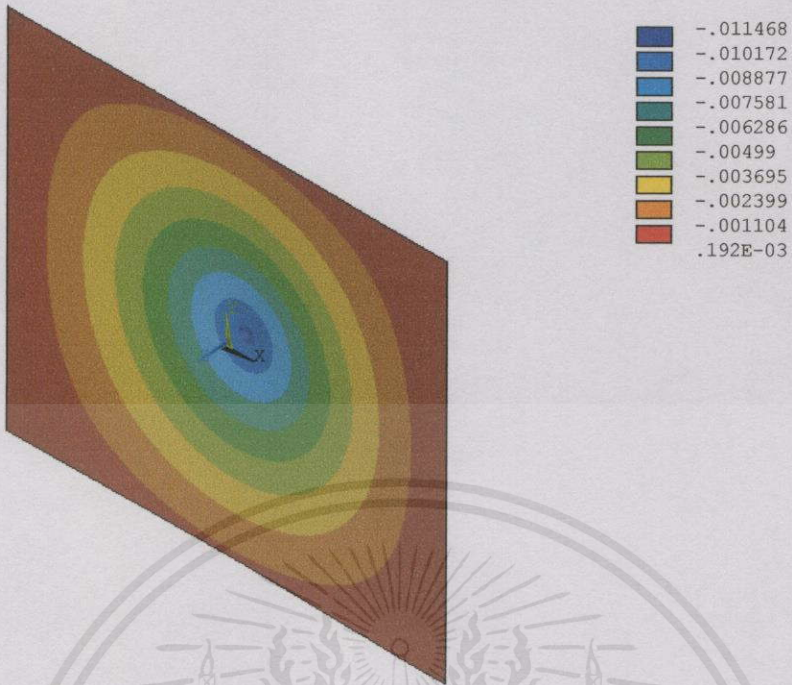
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบระหว่างระยะยูปตัวของเซลล์รวงผึ้งกับการจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัตถุ
ประกอบแบบเส้นใยถัก โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (9 มม. Woven 9.525)

การจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัตถุ ประกอบใยแก้ว/อีพอกซี	ระยะยูปตัวของเซลล์รวงผึ้ง (มม.)	พลังงานความเครียดของแผ่น ประกบด้านบน (Nm)
$[0/90]_{15}$	13.476	23.272
$[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$	13.301	23.029

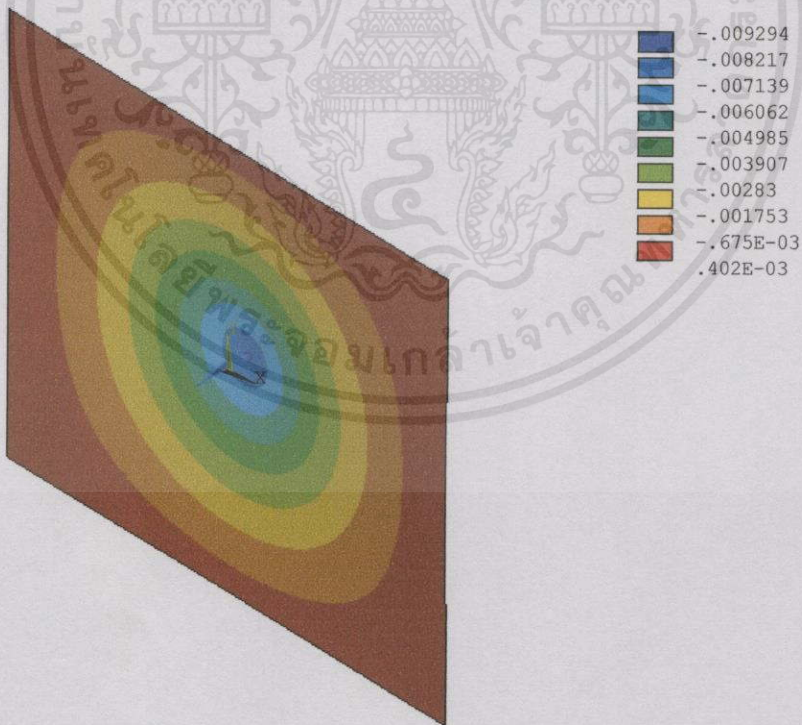
จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า การจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัตถุประกอบชนิดเส้นใยถัก แบบ $[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$ จะให้ระยะยูปตัวของเซลล์รวงผึ้งน้อยกว่าการจัดเรียงมุมของเส้นใยแบบ $[0/90]_{15}$ ดังนั้นจะใช้ลักษณะการจัดเรียงมุมแบบ $[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$ มาใช้ในการทดสอบ และการวิเคราะห์การยูปตัวของเซลล์รวงผึ้ง โดยที่ลักษณะการลู่เข้า (convergence) ของระยะยูปตัวของเซลล์รวงผึ้งที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.7 และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์การยูปตัวของเซลล์รวงผึ้งในรูปแบบต่างๆจะแสดงในรูปที่ 5.8 - 5.13



รูปที่ 5.7 แสดงการลู่เข้า (convergence) ของระยะยูปตัวของเซลล์รวงผึ้งที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยมีการจัดเรียงมุมของเส้นใยในวัตถุประกอบเป็นแบบ $[(0/90 \pm 45)_7 / 0/90]$
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเชิงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



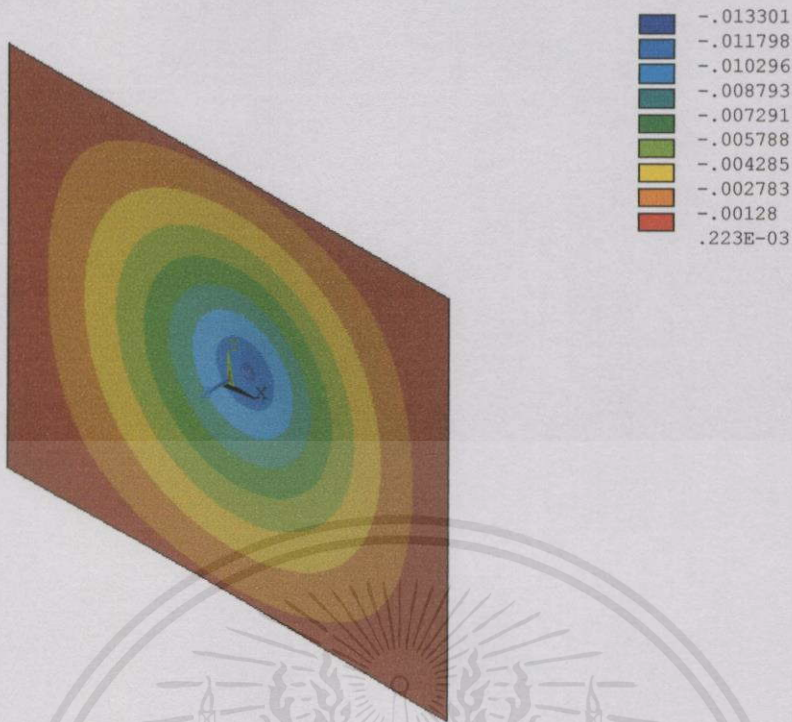
รูปที่ 5.8 การวิเคราะห์การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (.38 Woven 9.525)



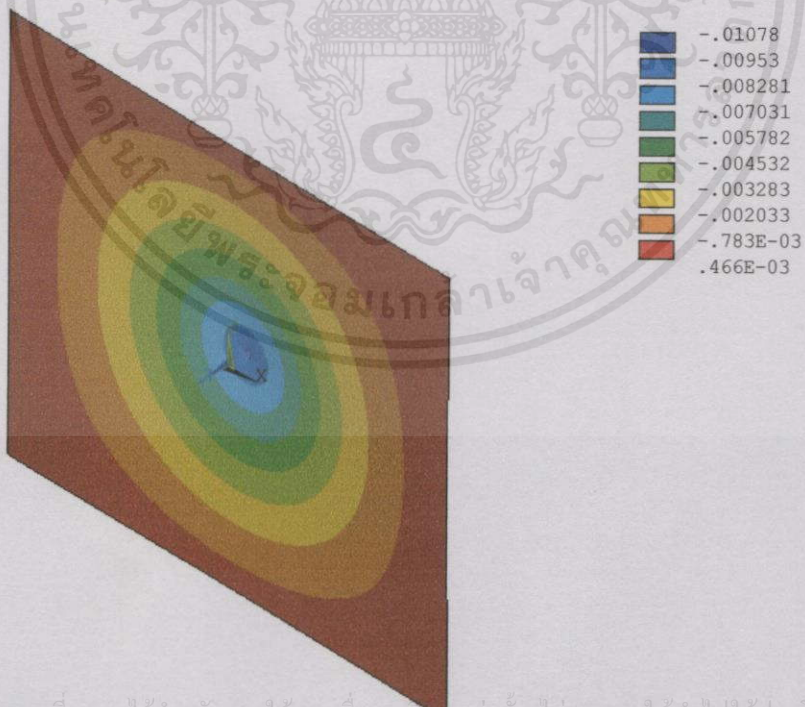
รูปที่ 5.9 การวิเคราะห์การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (.38 Woven 6.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

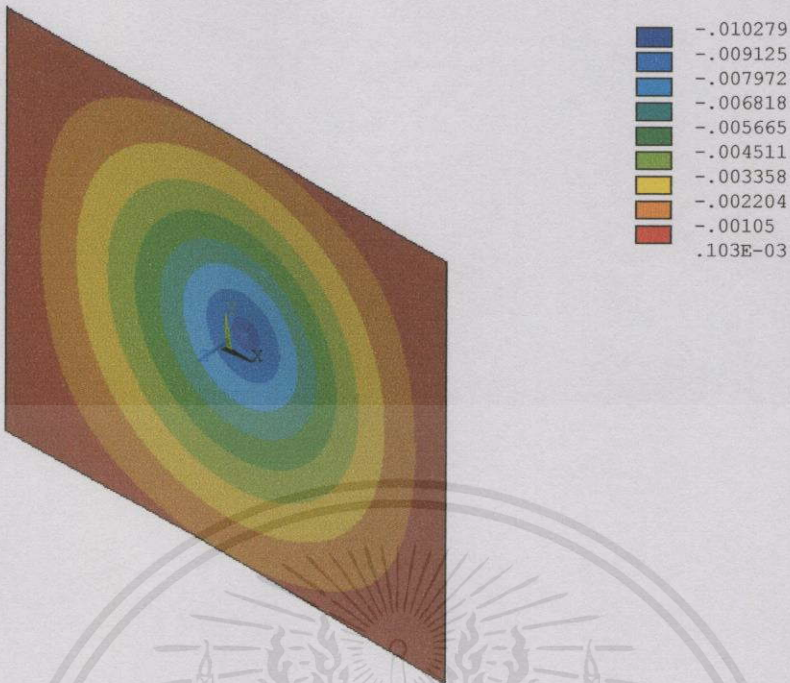
เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



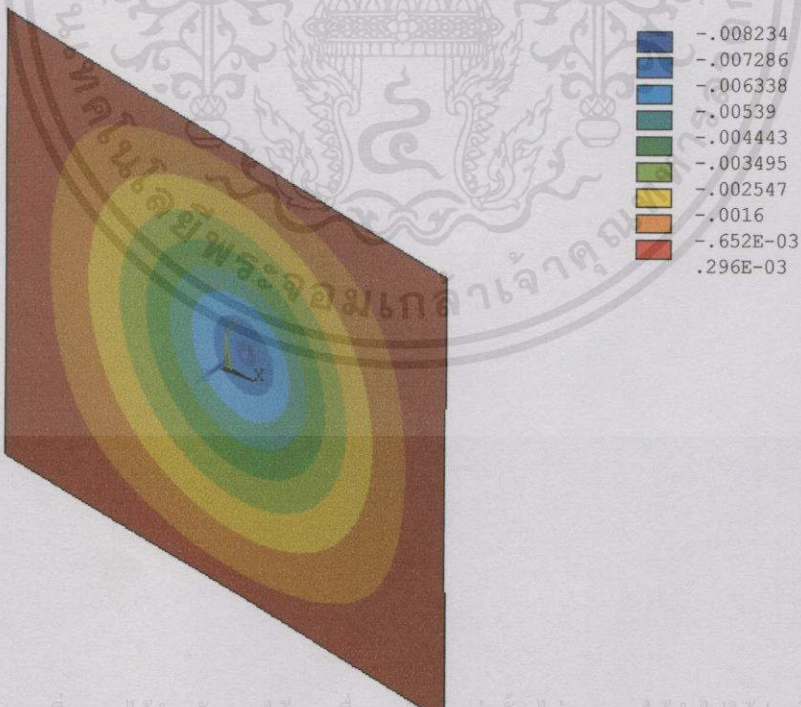
รูปที่ 5.10 การวิเคราะห์การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (9 มม. Woven 9.525)



รูปที่ 5.11 การวิเคราะห์การขยับตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (9 มม. Woven 6.35)



รูปที่ 5.12 การวิเคราะห์การขุดตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (.38 Random 9.525)



รูปที่ 5.13 การวิเคราะห์การขุดตัวของเซลล์รวงผึ้ง (m) (.38 Random 6.35)

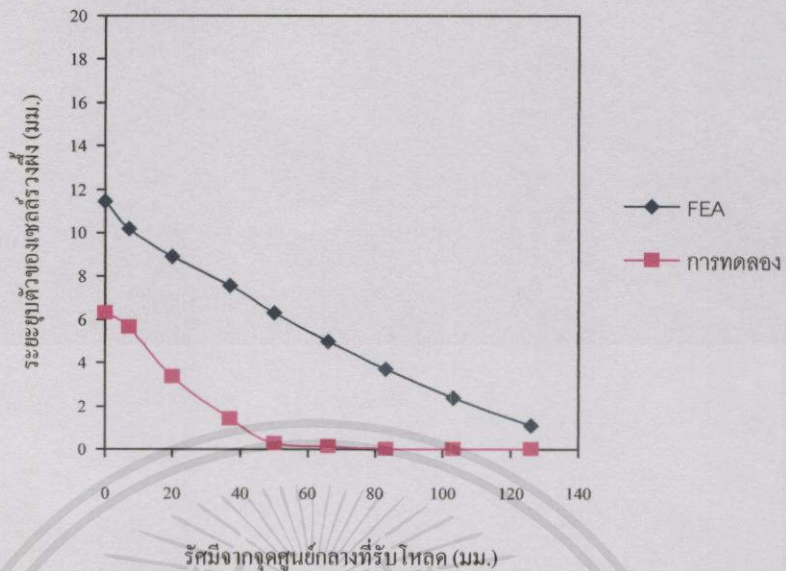
จากผลของการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.8 – 5.13 พบว่าการยุบตัวจะเป็นแบบสมมาตรรอบแกน z และระยะยุบตัวของการวิเคราะห์ในรูปแบบ (9 มม. Woven 9.525) ในรูปที่ 5.10 จะให้ค่าระยะยุบตัวสูงสุด คือ 13.3 มม. ส่วนการวิเคราะห์ในรูปแบบ (.38 Random 6.35) ในรูปที่ 5.13 จะให้ค่าระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งน้อยที่สุด คือ 8.2 มม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซ์ชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทางจะมีการต้านทานการยุบตัวได้ดีกว่าวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซ์ชนิดเส้นใยถัก (หรืออาจสรุปได้ว่ามีการดูดซับพลังงานจากการปะทะได้ดีกว่า เนื่องจากการส่งผ่านพลังงานที่เหลือไปยังเซลล์รวงผึ้งน้อยกว่าจึงทำให้เซลล์รวงผึ้งเกิดการยุบตัวน้อยกว่า) แต่ก็มีข้อเสียคือมีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้น้อยกว่าชนิดเส้นใยถัก ดังจะสังเกตได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4.1 ซึ่งวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซ์ชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทางสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้เพียงกระสุนขนาด .38 ในขณะที่วัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซ์ชนิดเส้นใยถักสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ทั้งสองแบบ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4.3

5.4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์

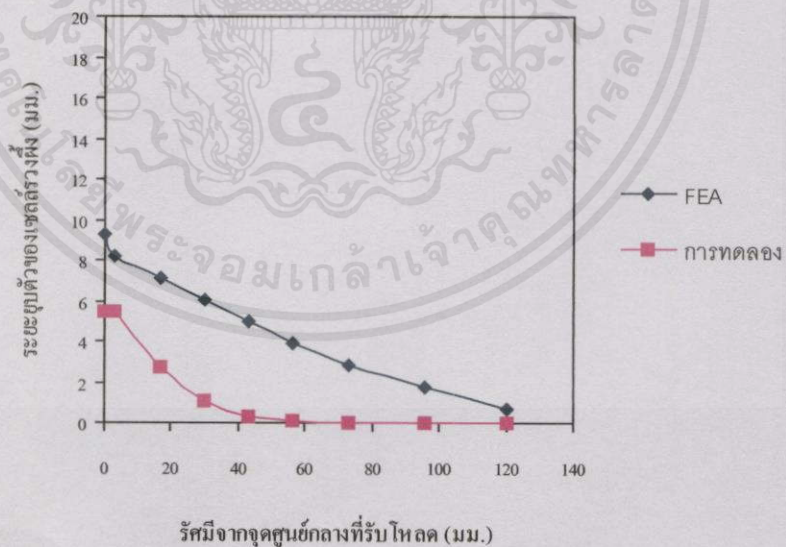
เนื่องจากการทดสอบและการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งมีความสมมาตรของระยะยุบตัวรอบแกน z ดังนั้นในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะพิจารณาเพียงครึ่งหนึ่งจากจุดศูนย์กลางของภาคตัด (ครึ่งหนึ่งของภาคตัดในรูปที่ 4.11 – 4.16) เทียบกับระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งที่จุดเดียวกันนี้ของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งผลเปรียบเทียบการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งระหว่างการทดสอบกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.14 และผลเปรียบเทียบระยะยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งเทียบกับระยะตามแนวรัศมีจากแกน z จะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.15 - 5.20



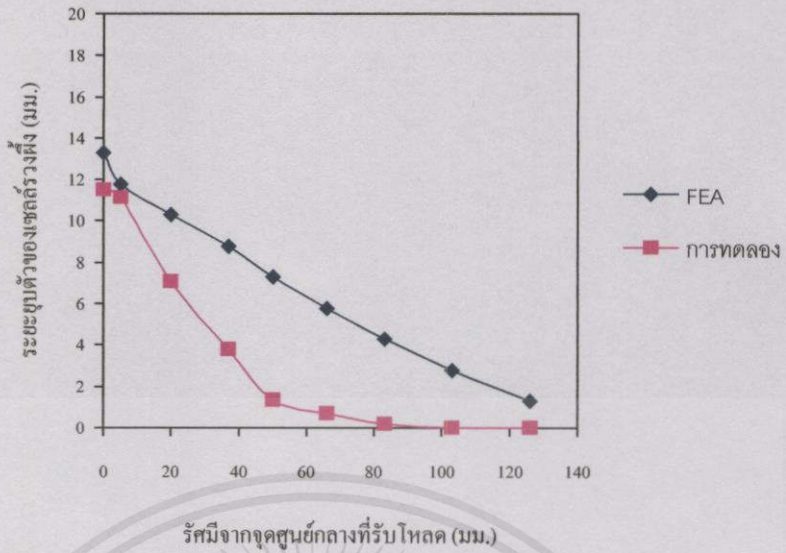
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.14 แสดงผลเปรียบเทียบการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งระหว่างการทดสอบกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์



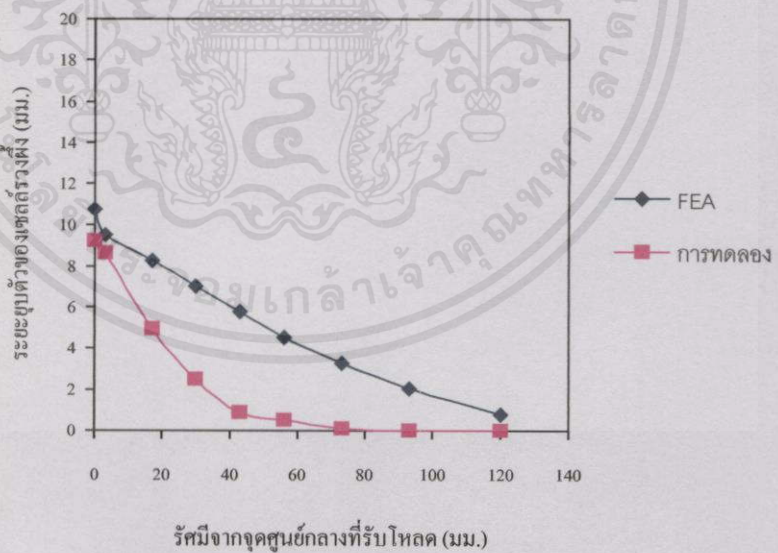
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยุบตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (.38 Woven 9.525)



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยุบตัวตามเอกสารนี้เป็นแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (.38 Woven 6.35) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

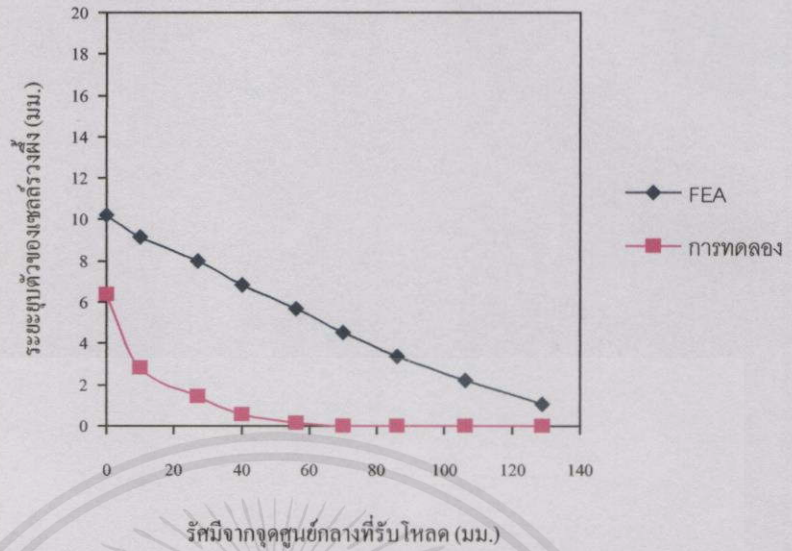


รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยับตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รูวงผึ้ง (9 มม. Woven 9.525)

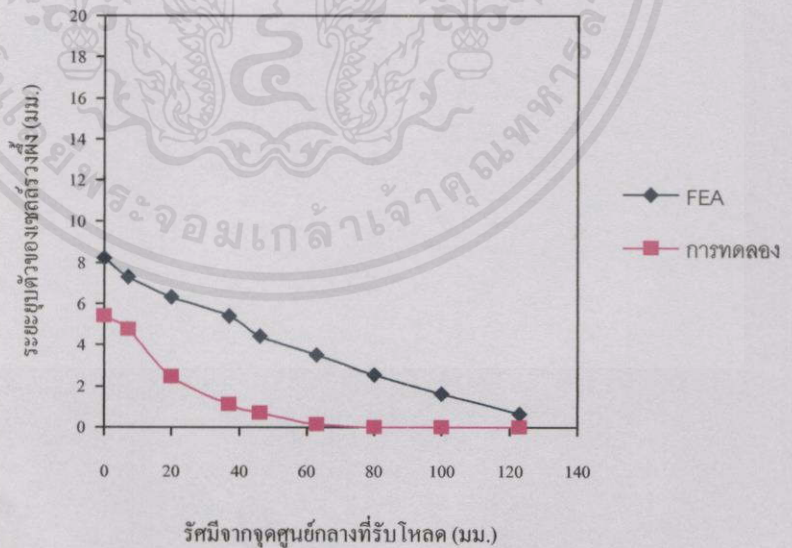


รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยับตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รูวงผึ้ง (9 มม. Woven 6.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



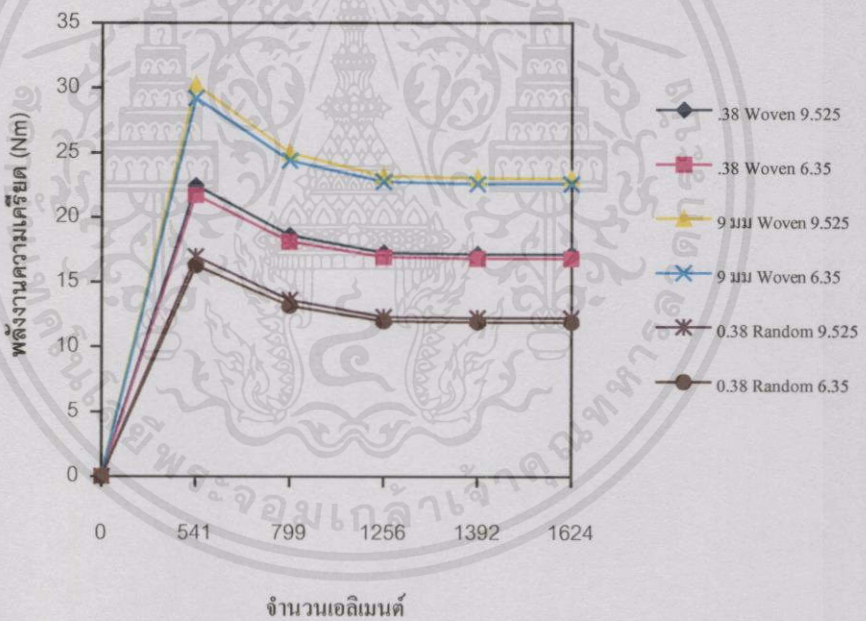
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยุบตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (.38 Random 9.525)



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง ของระยะขยุบตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (.38 Random 6.35)

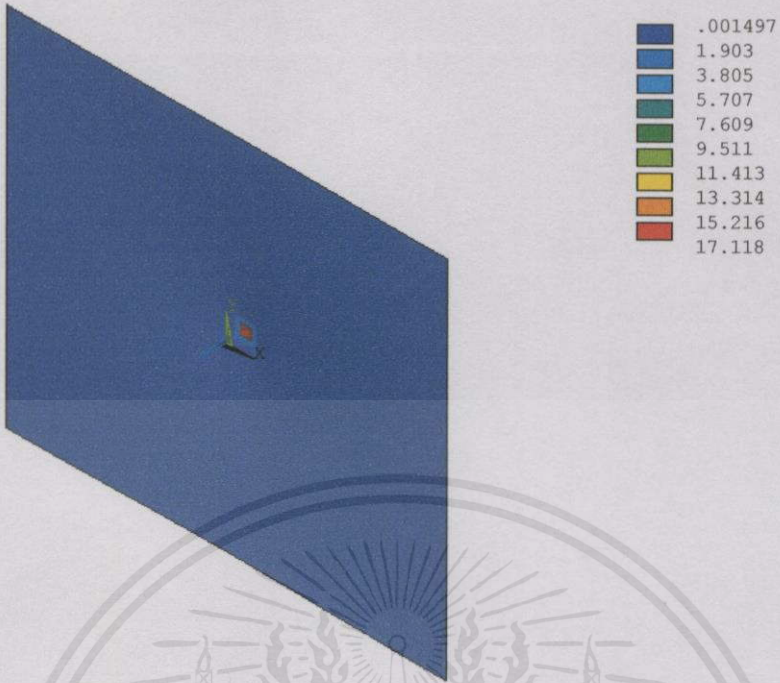
5.4.3 การประมาณค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิช

ในการประมาณค่าการดูดซับพลังงานจะอาศัยหลักการที่ว่า [10] พลังงานที่ทำให้เซลล์รวงผึ้งยุบตัวจะเท่ากับ พลังงานที่ถูกดูดซับไปโดยเซลล์รวงผึ้ง โดยจะพิจารณาควบคู่ไปกับการยุบตัวของแผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบอยู่ด้านล่าง (กล่าวคือ เมื่อเซลล์รวงผึ้งมีการยุบตัวมากๆและแผ่นประกอบด้านล่างหรือวัสดุหนุนที่ฐานรองรับมีการยุบตัวน้อยๆ ก็อาจกล่าวได้ว่าในวัสดุประกอบชิ้นนั้นมีการดูดซับพลังงานบางส่วนเกิดขึ้น) ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของเซลล์รวงผึ้งมีค่าเท่ากับค่าพลังงานความเครียด (strain energy) ของแผ่นประกอบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง ซึ่งจะสมมติให้เป็นสัดส่วนเดียวกันกับพลังงานความเครียดของแผ่นประกอบด้านล่างเซลล์รวงผึ้ง โดยที่ลักษณะการลู่เข้าของค่าพลังงานความเครียดจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.21 และการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความเครียดของแผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบอยู่ด้านบนเซลล์รวงผึ้งในรูปแบบต่างๆจะแสดงในรูปที่ 5.22 - 5.27



รูปที่ 5.21 แสดงการลู่เข้า (convergence) ของค่าพลังงานความเครียดของแผ่นประกอบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ($[(0/90/\pm 45)_7 / 0/90]$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

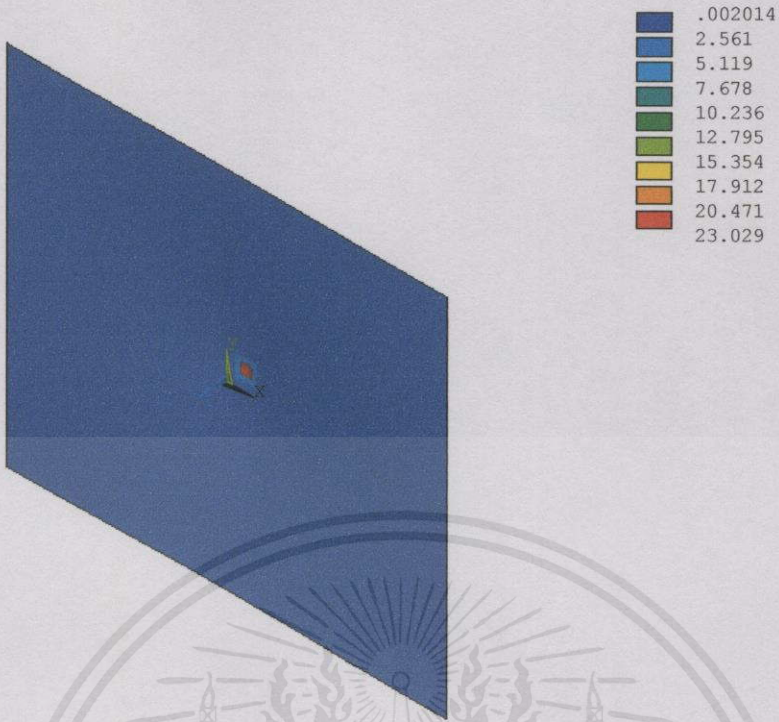


รูปที่ 5.22 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รวงผึ้ง (Nm) (.38 Woven 9.525)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.23 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รวงผึ้ง (Nm) (.38 Woven 6.35) ใช้

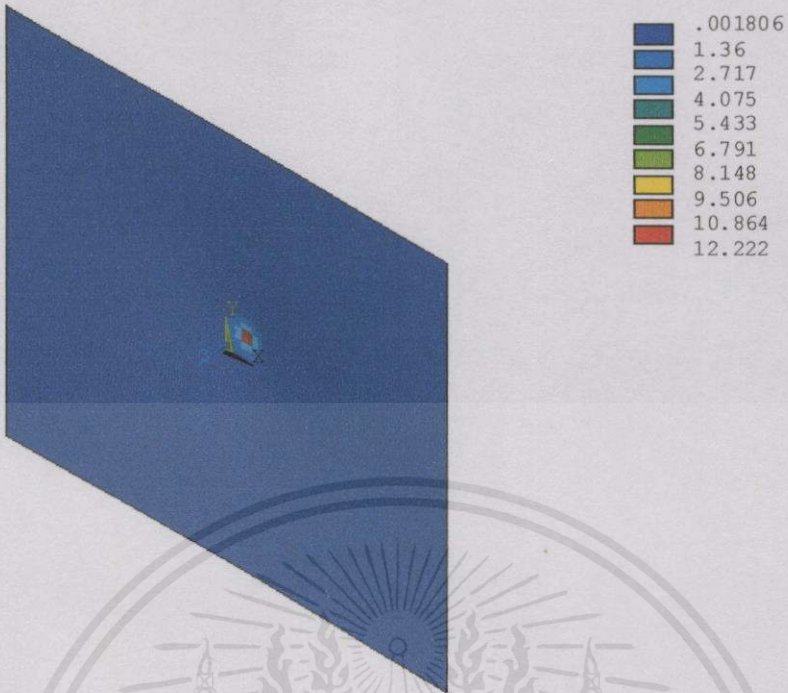


รูปที่ 5.24 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (Nm) (9 มม. Woven 9.525)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.25 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รวงผึ้ง (Nm) (9 มม. Woven 6.35)



รูปที่ 5.26 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (Nm) (.38 Random 9.525)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.27 พลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านบนเซลล์รังผึ้ง (Nm) (.38 Random 6.35)

จากรูปที่ 5.21 – 5.27 สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านล่างของเซลล์รวงผึ้ง ซึ่งค่าระยะขยุบตัวของแผ่นประกบด้านล่างนี้จะได้จากค่าเฉลี่ยจากการวัดของชิ้นทดสอบที่บริเวณตำแหน่งที่โหลดมากกระทำ (ซึ่งสมมติให้พลังงานความเครียดที่จุดนี้ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์เป็นสัดส่วนกันหรือเป็นฟังก์ชันของระยะขยุบตัวตามแนวแกน z) โดยผลที่ได้จะแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงระยะขยุบตัวและพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านล่าง

ขนาด กระสุน	ชนิดของใย แก้ว/อีพอกซี	ขนาดเซลล์รวงผึ้ง (มม.)	ระยะขยุบตัวของแผ่น ประกบด้านล่าง (มม.)	พลังงานความเครียดของแผ่น ประกบด้านล่าง (Nm)
.38	Woven	9.525	0.44	0.66
.38	Woven	6.35	1.32	2.40
9 มม.	Woven	9.525	0.56	0.97
9 มม.	Woven	6.35	3.96	8.34
.38	Random	9.525	0.42	0.50
.38	Random	6.35	1.28	1.85

ดังนั้นในการประมาณค่าของการดูดซับพลังงานในที่นี้จะพิจารณาเพียงค่าของพลังงานความเครียดของแผ่นประกบด้านล่างเทียบกับค่าพลังงานปะทะของกระสุน (ตารางที่ 4.1) ที่ใส่เข้าไป ซึ่งผลที่ได้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงการดูดซับพลังงานของวัสดุทดสอบ

ขนาด กระสุน	ชนิดของใย แก้ว/อีพอกซี	ขนาด เซลล์ รวงผึ้ง (มม.)	พลังงาน ปะทะของ กระสุน (Nm)	พลังงานความเครียดของ แผ่นประกบด้านล่าง (Nm)	การดูดซับพลังงาน ของวัสดุทดสอบ (%)
.38	Woven	9.525	271.2	0.66	99.6
.38	Woven	6.35	271.2	2.40	99.1
9 มม.	Woven	9.525	454.26	0.97	99.8
9 มม.	Woven	6.35	454.26	8.34	98.2
.38	Random	9.525	271.2	0.50	99.8
.38	Random	6.35	271.2	1.85	99.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ ไปใช้

จากตารางที่ 5.4 พบว่าหลังจากรับแรงปะทะแล้วเซลล์รวงผึ้งทั้งสองขนาดมีการดูดซับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เซลล์รวงผึ้งขนาด 9.525 มม. จะดูดซับพลังงานและกระจายแรงปะทะได้ดีที่สุด ซึ่งโดยรวมแล้วสามารถดูดซับพลังงานได้ถึง 99.8% ส่วนพลังงานที่เหลือส่วนน้อยนั้นจะสมมติให้เป็นพลังงานที่ถูกดูดซับโดยวัสดุหุ้ม

5.5 วิจัยการผลกระทดลอง

จากรูปที่ 5.15 – 5.20 พบว่าผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของระยะขยุบตัวตามแนวรัศมีของแผ่นประกบด้านบนบนเซลล์รวงผึ้งจะมีค่าสูงกว่าระยะขยุบตัวที่ได้จากการทดสอบ และยังสังเกตพบว่าผลของการเปรียบเทียบที่เกิดจากรูปแบบที่มีการใช้โหนดของกระสุนขนาด .38 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่ารูปแบบที่มีการใช้โหนดของกระสุนขนาด 9 มม. (ซึ่งในรูปแบบที่มีการใช้โหนดขนาด .38 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 39.6 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รูปแบบที่มีการใช้โหนดขนาด 9 มม. จะมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 13.8 เปอร์เซ็นต์) จากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการประมาณค่าโหนดจากไดนามิกส์โหนดไปเป็นโหนดสถิตย์นี้ไม่มีความเหมาะสมและมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากยังคงมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าต่างๆมากมายที่ไม่ได้นำมาพิจารณา เช่น ผลของการเปลี่ยนรูปไปของหัวกระสุน ซึ่งจะมีผลทำให้ลักษณะของการเกิดโหนดจะไม่เป็นแบบโหนดเฉพาะจุด(Point load) แต่จะเป็นไปในลักษณะของโหนดที่มีการกระจายตัวไปตามพื้นผิวที่เปลี่ยนรูปไปของหัวกระสุน , ผลของความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างหัวกระสุนกับวัสดุทดสอบ , ลักษณะความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างระหว่างแรงด้านของกระสุนกับระยะฝั่งตัวของกระสุนซึ่งอาจจะไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้นดังที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้(โดยผลจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าในการประมาณค่าโหนดของกระสุนควรที่จะมีค่าน้อยลงมากกว่านี้จึงจะทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบและการวิเคราะห์ลดน้อยลง) , การใช้ความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียดโดยการนำเอาหลักการของพลังงานมาใช้ในการคำนวณข้างต้น ซึ่งจะมีความถูกต้องอยู่ในช่วงที่เป็นอีลาสติก แต่โดยความเป็นจริงแล้วผลที่ได้ในงานวิจัยนี้จะมีผลบางส่วนเกิดขึ้นในลักษณะที่อยู่ในช่วงที่เป็นพลาสติก และสาเหตุที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ก็คือความคลาดเคลื่อนในการควบคุมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เช่นการควบคุมสัดส่วนของเส้นใย , ความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดต่างๆรวมทั้งการใช้ค่าเฉลี่ยในการนำมาคิด เป็นต้น ซึ่งจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น มีผลทำให้การประมาณค่าพลังงานความเครียดเพื่อที่จะใช้ประมาณค่าการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุทดสอบนี้ไม่ถูกต้องตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทดสอบหรือวิเคราะห์การกระแทกที่เกิดจากการปะทะของกระสุนปืนบนวัสดุประกอบที่มีโครงสร้างแบบแซนดวิชนี้ ทำให้เราทราบถึงพฤติกรรมต่างๆที่เราสนใจ เช่น การยุบตัวของพื้นผิวด้านหลัง หรือการยุบตัวของแผ่นประกบด้านล่างเซลล์รวงผึ้ง และพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบชนิดนี้ และยังทำให้เราทราบว่าวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยถักจะมีการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ดีกว่าวัสดุประกอบใยแก้ว/อีพอกซีชนิดเส้นใยไม่ต่อเนื่องกระจายในทุกทิศทาง และยังทำให้เราทราบอีกว่า เซลล์รวงผึ้งที่มีขนาดเซลล์เท่ากับ 9.525 มม. จะมีการดูดซับพลังงานจากการปะทะของกระสุนได้ดีกว่าเซลล์รวงผึ้งที่มีขนาดเซลล์เท่ากับ 6.35 มม. ถึงแม้ผลที่ได้จากการทดสอบและวิเคราะห์จะมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ก็ยังพอที่จะสรุปได้ว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบนี้มีการดูดซับพลังงานได้ดี โดยพบว่า วัสดุประกอบโครงสร้างแบบแซนดวิชที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซี ที่มีแกนกลางเป็นรูปรวงผึ้งอลูมิเนียมขนาดเซลล์เท่ากับ 9.525 มม. จะต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด .38 และขนาด 9 มม. ได้ดี และดูดซับพลังงานปะทะของกระสุนและกระจายแรงปะทะในบริเวณผิวด้านหลังได้ดีเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาในการทำเกราะป้องกันกระสุนที่สามารถดูดซับพลังงานได้ดี หรือใช้เป็นวัสดุเสริมในเสื้อเกราะกันกระสุนที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันและลดอาการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการปะทะของกระสุนปืน และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุประกอบชนิดนี้ต่อไปในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผลของการประมาณค่าการดูดซับพลังงานที่เกิดจากการกระแทกในวัสดุทดสอบที่ได้นี้ยังไม่มีข้อมูลเพียงพอ ซึ่งมันเป็นผลมาจากข้อจำกัดหลายๆอย่างที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ เช่นผลที่เกิดในส่วนของระดับMicromechanics โดยมันมีผลเกี่ยวเนื่องกับการประมาณค่าโหลดที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งโดยแท้จริงแล้วความสัมพันธ์และตัวแปรต่างๆที่ต้องนำมาพิจารณาจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่านี้ โดยวิธีการวิเคราะห์นี้จึงอาจจะยังไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ ดังนั้นจึงควรที่จะหาวิธีการที่จะวัดค่าของโหลดที่เกิดขึ้นโดยเชิงทดลองเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแท้จริงก่อน แล้วจึงจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผล

เอกสารอ้างอิง

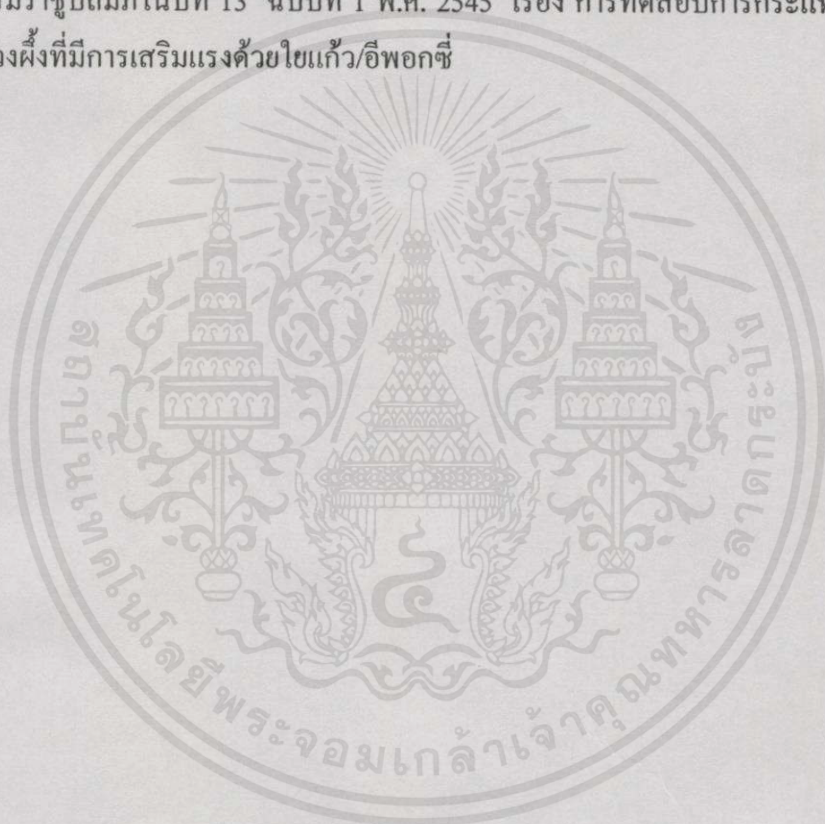
- [1] Carl T. Herakovich. **Mechanics of Fibrous Composite**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1998
- [2] Mallick P.K. **Composites Engineering Handbook**. New York : Marcel Dekker, Inc. 1997
- [3] สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ. กลศาสตร์วัสดุประกอบ. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : JICA. 2535
- [4] Ronald F. Gibson. **Principles of Composite Material Mechanics**. New York : McGraw-Hill, Inc. 1994
- [5] Ferdinand P. Beer , Russell J.R. Johnston. **Mechanics of Materials**. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 1992
- [6] พิชญ จุลศิริ. ชนิดและวิธีเลือกเสื่อเกราะป้องกันกระสุน. กองสรรพาวุธ. สำนักงานส่งกำลังบำรุง. 2538
- [7] จินตมัย สุวรรณประทีป. “คอมโพสิตในยานยนต์ทางทหาร.” วารสารเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่2, มกราคม-มีนาคม 2544. หน้า 17-20.
- [8] สุจิระ ขอบจิตต์เมตต์, สมประสงค์ ภาษาประสงค์, อภิชาติ สนธิสมบัติ. “การศึกษาความเป็นไปได้เพื่อพัฒนาเส้นใยไหมมาใช้ในการผลิตเสื่อเกราะ.” วารสารข่าวสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ปีที่41, ฉบับที่431, มกราคม-มีนาคม 2543. หน้า 14.
- [9] สนธิพีร์ เอम्मณี, เอกชัย คล้ายวงศ์วาลย์. “คุณสมบัติทางกลของแผ่นแซนด์วิชภายใต้การดัด” บทความสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่13, ฉบับที่2, ธันวาคม 2542. หน้า 114-121.
- [10] ฐานิฎฐ์ ทินนาม , ัญญุมิ มัจพันธ์. “การวิเคราะห์การโค้งงอและการดัดกลืนพลังงานของวัสดุประกอบรูปร่างสี่เหลี่ยม.” ปรินญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
- [11] Matthews F.L. , Davies G.A.O. , Hitchings D. ,Soutis C. **Finite element modelling**. Washington D.C. : CRC Press. 2000
- [12] Hull D. , Clyne T.W. **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge University Press. 1996
- [13] Bor Z. Jang. **Advanced Polymer Composites : Principles and Application**. Asm International. New York : The Materials Information Society. 1994

- [14] Raymond F. Wegman , thomas R. Tullos. **Hand book of Adhesive bonded Structural Repair**. New Jersey : Noyes Publications Park Ridge. 1992
- [15] Frederik J. Plantema. **Sandwich Construction**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1966
- [16] สุมิตร ศรีใจ. “ตารางเทียบอานุภาพกระสุนปืนสั้น.” Gun Magazine. ปีที่1, ฉบับที่ 5, สิงหาคม 2539, หน้า 46
- [17] กิ่ง สุรบาล. “สนทนาภาษาปืน.” นิตยสารการกีฬาและวิชาการปืน. ปีที่13, ฉบับที่ 155, กันยายน 2530, หน้า 43
- [18] อำนาจ ทองแสน. **เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบงานผลิต (CAD/CAM Technology)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). 2542
- [19] วีระศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร , ชีระยุทธ สุวรรณประทีป , สมาน เจริญกิจพุดผล. **กลศาสตร์วิศวกรรม ฉบับเสริมประสบการณ์ ภาคพลศาสตร์**. กรุงเทพ : ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด. 2521
- [20] เดช พุทธเจริญทอง. **การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. กรุงเทพมหานคร : บริษัทพิมพ์ดี จำกัด. 2541
- [21] Stephen P. Timoshenko , Woinowsky S. Krieger. **Theory of Plates and Shells**. Second Edition. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 1959

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสกันธ์ ประทีปะจิตติ เกิดเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม 2518 ที่จังหวัดสมุทรปราการ อ.เมือง ต.ปากน้ำ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2541 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต โดยมีผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนาของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ในปีที่ 13 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2545 เรื่อง การทดสอบการกระแทกของวัสดุ ประกอบบูรพรวงผึ้งที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว/อีพอกซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้