

ผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลต่อการปะทะแบบจีปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต



นาย ประยุทธ์ คำเรืองศรี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF MECHANICAL PARAMETERS ON BALLISTIC IMPACT UPON  
POLYMER COMPOSITE PLATE



Mr. Prayut Khumrungsri

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2007


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลต่อการปะทะแบบชึ้นบนแผ่น พอลิเมอร์คอมพอสิต
โดย	นายประยุทธ์ คำเรืองศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กุณจินี มณีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. นวรงค์ ชลคุป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุณจินี มณีรัตน์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. นวรงค์ ชลคุป)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

  
..... กรรมการ  
(ดร. อัญชลี มโนกุล)

ประยุกต์ คำเรื่องศรี : ผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลต่อการปะทะแบบซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต (EFFECTS OF MECHANICAL PARAMETER ON BALLISTIC IMPACT UPON POLYMER COMPOSITE PLATE)

อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. กุณจินี มณีรัตน์ และ ดร. นวนงค์ ชลคุป, 138 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลที่มีต่อการปะทะทางซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้กระสุนเป็นวัตถุแข็งเกร็งและแผ่นเป้าหมายกำหนดให้เป็นวัสดุแบบ Orthotropic

เริ่มต้นการจำลองแบบด้วยวัสดุชนิดที่ 22 (Composite damage model) ในโปรแกรม LS-DYNA และใช้คุณสมบัติวัสดุคอมพอสิตของ Gu and Xu (2004) การจำลองให้ผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงพลังงานในระบบกับการลบเอลิเมนต์ที่เสียหาย ปรากฏว่า ผลการจำลองไม่มีความเหมาะสมเพียงพอ เนื่องจากแบบวัสดุชนิดที่ 22 ไม่มีหลักความเสียหายในทิศทางที่ 3 ที่สามารถทำให้เกิดการลบเอลิเมนต์ที่เสียหายได้ จนทำให้พลังงานในระบบเกิดความไม่ถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงได้เลือกแบบวัสดุชนิดที่ 59 (Composite failure model) มาแทนแบบวัสดุชนิดที่ 22 เนื่องจากมีหลักความเสียหายที่ทำให้เกิดการลบเอลิเมนต์ที่เสียหายได้ โดยการจำลองให้ผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) และมีแนวโน้มของความเร็วตกค้างใกล้เคียงกับผลการทดลองและการจำลองระดับอนุภาคของ Gu and Li (2005) ทั้งพลังงานในระบบมีความเหมาะสมและถูกต้องมากขึ้น

การปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความเร็วกระสุนหลังจากทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบเนื่องจากแผ่นเป้าหมายมีความยืดหยุ่นน้อยลง ส่วนการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกซึ่งเป็นทิศทางที่รับแรงปะทะของกระสุนโดยตรง กลับทำให้แผ่นเป้าหมายมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งจากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นทั้งในทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกในช่วงบวกและลบ 15 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความแตกต่างของความเร็วตกค้างเทียบกับผลการจำลองต้นแบบไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการปรับเพิ่มค่าความแข็งแรงด้านต่างๆ ในทิศทางของไฟเบอร์ เมตริกหรือทุกทิศทางถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หรือปรับลดถึง 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความแตกต่างของความเร็วตกค้างไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นการปรับค่าความแข็งแรงอัดที่ให้ค่าความแตกต่างของความเร็วตกค้างถึง 2-3 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต..... ประยุทธ์ คำป้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## 4870596021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: polymer composite / ballistic impact / LS-DYNA

PRAYUT KHUMRUNGSRI : EFFECTS OF MECHANICAL  
PARAMETER ON BALLISTIC IMPACT UPON POLYMER  
COMPOSITE PLATE.THESIS ADVISORS : KUNTINEE

MANEERATANA AND NUWONG CHOLLACOOP, Ph.D., 138 pp.

This thesis numerically studied the effects of mechanical parameters on ballistic impact upon the polymer composite plate by the commercial finite element code LS-DYNA. The bullet was assumed to be rigid; whereas, the target was assumed to be an orthotropic material with polymer composite properties from Gu and Xu (2004).

The simulation first utilized LS-DYNA material type 22 (composite damage model). Results of the simulation were in good agreements with the experiment by Gu and Xu (2004). However, when energy and damaged element deletion were considered, the material model was unsuitable due to the lack of no criteria failure in third direction that allowed damaged elements deletion. Thus, LS-DYNA material type 59 (composite failure model), which could delete damaged elements, was selected accordingly. The residual velocities from the simulation were in good agreements with the experiment by Gu and Xu (2004) as well as experiment and microstructure simulation by Gu and Li (2005).

When the Young' modulus in the fiber direction was increased up to 15%, the residual velocities of bullet increased because the material became less elastically deformable. On the other hand, when the Young' modulus in the matrix direction that directly bare the impact was increased by up to 15%, the residual bullet velocity decreased as the targets could deform more. In all, the residual velocities varied within 3% range when compared with the base case result as the Young's moduli in fiber and matrix directions were varied within 15% range. When strengths in fiber, matrix or both directions, were adjusted within -90% to +100% range, the residual velocities varied by less than 1% when compared with the base model, with an exception for the compressive strength that caused 2-3% residual velocity variation.

Department Mechanical Engineering

Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2007

Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.คุณธานี มณีรัตน์ และ อาจารย์ ดร. นวงศ์ ชลคุป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์ถนัดกิจ และ ดร.อัญชลี มโนนุกุล กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนและให้ความช่วยเหลืออื่นๆ ในงานวิจัยนี้ รวมทั้ง ดร.กุลจิรา สุจิโรจน์ หัวหน้าโครงการ การพัฒนาเกราะแข็งน้ำหนักเบา ตลอดจนนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ครูและช่างเทคนิค รวมถึงบุคลากรธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อนๆ รุ่นพี่ปริญญาโท ปริญญาเอก ในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณ รวมทั้งบุคคลอื่นที่ให้ความช่วยเหลือแต่ไม่ได้กล่าวถึงทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่ง ซึ่งท่านคอยให้กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

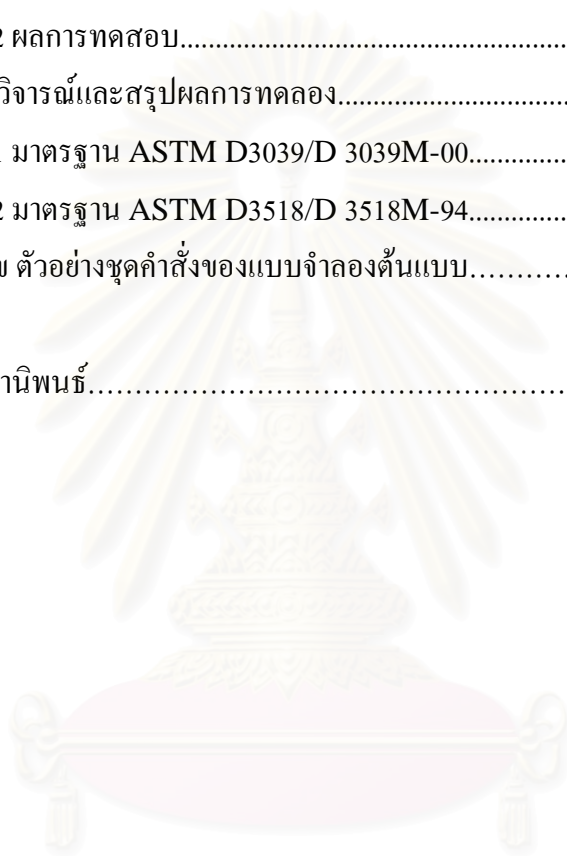
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง.....	5
2.2 การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นคอมพอสิต.....	10
2.3 สรุป.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 ทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต.....	15
3.1.1 ประเภทของวัสดุ.....	15
3.1.2 ความแข็งแรงของวัสดุแบบ Orthotropic ในระบบ 3 มิติ.....	20
3.2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	22
3.2.1 แบบวัสดุสำหรับคอมพอสิตที่ใช้ในโปรแกรม LS-DYNA.....	22
3.2.2 การตรวจหาผิวสัมผัสของเอลิเมนต์.....	24
3.2.3 สมดุลพลังงาน.....	25
3.2.4 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม.....	27
3.3 ข้อควรระวังในการจำลองแบบ.....	30

3.3.1 คลื่นความเค้น.....	30
3.3.2 Courant number.....	31
3.4 สรุป.....	31
บทที่ 4 การจำลองต้นแบบ.....	32
4.1 แบบจำลองเริ่มต้น.....	32
4.2 ผลการจำลองเริ่มต้นและการเปรียบเทียบ.....	37
4.3 ความเหมาะสมของแบบจำลองเริ่มต้น.....	43
4.4 การเลือกแบบวัสดุสำหรับการจำลองต้นแบบ.....	45
4.5 การจำลองต้นแบบ.....	46
4.6 ผลการจำลองของแบบจำลองต้นแบบและการวิเคราะห์ผล.....	48
4.7 การจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ Microstructure.....	54
4.7.1 การจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005).....	54
4.7.2 แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบการจำลองแบบ Microstructure และ ผลการจำลอง.....	56
4.8 การประยุกต์ใช้ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดลองสำหรับการจำลองแบบ.....	61
4.9 สรุป.....	61
บทที่ 5 ผลกระทบของมุมปะทะ เงื่อนไขขอบเขต ขนาดและความหนาของแผ่นคอมพอสิต... ..	62
5.1 ผลกระทบจากมุมปะทะของหัวกระสุน.....	62
5.2 ผลกระทบของเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นเป้าหมาย.....	64
5.3 ผลกระทบจากขนาดและความหนาของแผ่นเป้าหมาย.....	71
5.4 สรุป.....	76
บทที่ 6 ผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลในแผ่นคอมพอสิต.....	77
6.1 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่น.....	77
6.1.1 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบทิศทางเดียว.....	78
6.1.2 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิต แบบทิศทางเดียว.....	82



6.1.3	ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบสองทิศทาง.....	86
6.1.4	ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบสองทิศทาง.....	92
6.2	ผลกระทบจากค่าความแข็งแรงของคอมพอสิต.....	95
6.2.1	ผลกระทบจากความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์.....	95
6.2.2	ผลกระทบจากความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริก.....	99
6.2.3	ผลกระทบจากความแข็งแรงเฉือน.....	102
6.2.4	ผลกระทบจากความแข็งแรงอัด.....	105
6.3	แนวทางวิธีการปรับค่าความยืดหยุ่นและความแข็งแรงสำหรับการผลิตแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	108
6.4	สรุป.....	108
บทที่ 7	สรุปผลการวิจัย.....	110
7.1	สรุปการจำลอง.....	110
7.2	สรุปการทดลอง.....	112
7.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อไป.....	112
7.3.1	แนวทางการวิจัยส่วนของการจำลองแบบ.....	112
7.3.2	แนวทางการวิจัยส่วนของการทดลอง.....	113
	รายการอ้างอิง.....	114
	บรรณานุกรม.....	117
	ภาคผนวก.....	118
	ภาคผนวก ก การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	119
ก.1	การเตรียมชิ้นงาน.....	119
ก.1.1	การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานและการเตรียมชิ้นทดสอบ.....	119
ก.1.2	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น.....	120
ก.2	วิธีการทดสอบ.....	121

ก.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	121
ก.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	123
ก.3 ผลการทดสอบ.....	125
ก.3.1 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลจากการทดสอบ.....	125
ก.3.2 ผลการทดสอบ.....	127
ก.4 การวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง.....	131
ก.4.1 มาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00.....	132
ก.4.2 มาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94.....	133
ภาคผนวก ข ตัวอย่างชุดคำสั่งของแบบจำลองต้นแบบ.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	138



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่	หน้า
4.1 คุณสมบัติของแผ่นเป่าหมายซึ่งเป็นวัสดุคอมพอสิต.....	34
4.2 แบบวัสดุคอมพอสิตที่อยู่ในโปรแกรม LS-DYNA เปรียบเทียบลักษณะการใช้งาน ในการจำลองแบบต่างๆ.....	45
4.3 การเพิ่มเติมคุณสมบัติความแข็งแรงในทิศทางที่ 3 จากแบบวัสดุชนิดที่ 22 ไปเป็น แบบวัสดุชนิดที่ 59.....	48
6.1 การปรับค่าคุณสมบัติคอมพอสิตจากทิศทางเดียวเป็นสองทิศทาง.....	87
ก.1 ผลการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบ แรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00.....	129
ก.2 ผลการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบ แรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94.....	131

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของ Twaron® CT716 ที่อัตราการดึงต่างกัน.....	6
2.2 ลักษณะสปริง- ตัวหน่วงที่นำมากำหนดพฤติกรรมของวัสดุ.....	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นกับอัตราการดึงต่างๆ.....	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่จุดเสียหายกับอัตราการดึงต่างๆ.....	8
2.5 ผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกัน.....	8
2.6 ลักษณะของเอลิเมนต์แบบคาน .....	9
2.7 ผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันในระดับอนุภาค.....	9
2.8 แบบจำลองเส้นใยระดับอนุภาคซึ่งให้ผลใกล้เคียงการทดลอง.....	10
2.9 ลักษณะแบบจำลองที่กระสุนไม่เสียรูป.....	11
2.10 ลักษณะแบบจำลองที่เป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH).....	12
2.11 ผลการจำลองที่เป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วปะทะสูง.....	12
2.12 แบบจำลองระดับอนุภาคที่พิจารณาแยกกันระหว่างไฟเบอร์และเมตริก.....	13
3.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า $\sigma_1$ .....	17
3.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า $\sigma_2$ .....	17
3.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า $\sigma_3$ .....	17
3.4 ทิศทางความแข็งแรงของวัสดุแบบ Orthotropic ในระบบ 3 มิติ.....	21
3.5 ลักษณะ Surface-to-surface ใน Contact surface .....	25
3.6 ลักษณะการสัมผัสกับผิวอิสระ.....	25
3.7 แผนผังการคำนวณของโปรแกรม.....	29
4.1 ลักษณะและขนาดของหัวกระสุนที่ใช้ในการจำลองของ Gu and Xu (2004).....	33
4.2 ทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกในแผ่นคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว .....	35
4.3 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh ของแบบจำลองเริ่มต้น.....	35
4.4 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh ของแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) .....	35
4.5 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที และเวลา	



รูปที่	หน้า
ที่ใช้ในการคำนวณ กับจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน.....	36
4.6 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองเริ่มต้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองและการจำลองของ Gu and Xu (2004).....	38
4.7 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการจำลองแบบเริ่มต้น กับแบบจำลองและผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ.....	38
4.8 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที....	39
4.9 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที โดยเปรียบเทียบที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่าต่างๆ.....	40
4.10 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) กับแบบจำลองเริ่มต้น.....	41
4.11 การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ของแบบจำลองเริ่มต้น กับ Gu and Xu (2004) ที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที.....	42
4.12 ผลงานรวมทั้งระบบขณะกระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที.....	43
4.13 หลังการทะลุผ่านของกระสุนโดยที่เอลิเมนต์ไม่ถูกลบ (ไม่แสดงรูปกระสุน) .....	44
4.14 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองต้นแบบ โดยใช้แบบวัสดุที่ 59 เปรียบผลการทดลองและจำลองของ Gu and Xu (2004) .....	49
4.15 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการจำลองแบบต้นแบบโดยใช้แบบวัสดุที่ 59 กับแบบจำลองและผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ.....	49
4.16 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที....	50
4.17 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองเริ่มต้น กับแบบจำลองต้นแบบ.....	51
4.18 การทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ทั้งรูปด้านข้างและด้านหน้าความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที ของแบบจำลองต้นแบบ.....	52
4.19 หลังการทะลุผ่านของกระสุน โดยที่เอลิเมนต์ถูกลบ (ไม่แสดงรูปกระสุน) .....	53
4.20 ผลงานรวมทั้งระบบของกระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA.....	53
4.21 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh จากการจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005) .....	54
4.22 กราฟแรงดึงของ Twaron®ที่อัตราการดึงต่างกัน จากการทดลองของ Gu (2004) .....	55

รูปที่	หน้า
4.23 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบผลการทดลองและจำลองของ Gu and Li (2005) .....	56
4.24 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการจำลองของ Gu and Li (2005) และการจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Gu and Li (2005) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ.....	57
4.25 การเปรียบเทียบความเสียหายของแผ่นเป้าหมายจากการทดลองกับผลการจำลอง ของ Gu and Li (2005) และการจำลองต้นแบบที่ด้านหน้าและด้านหลัง.....	58
4.26 การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของ หัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ของแบบจำลองต้นแบบ.....	58
4.26 (ต่อ) การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ของ Gu and Li (2005) โดยความเสียหายของแผ่นเมตริกและความเสียหายของไฟเบอร์.....	59
4.27 การเปรียบเทียบความเสียหายของแผ่นเป้าหมายระหว่างการจำลองที่เวลาต่างๆ ของ Gu and Li (2005) กับการจำลองต้นแบบ.....	60
5.1 การปะทะของหัวกระสุนกับแผ่นเป้าหมายที่มุมต่างๆ.....	63
5.2 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่มุมปะทะต่างๆ โดยความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที .....	63
5.3 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างระหว่างมุมปะทะต่างๆ กับมุม 30 องศา.....	64
5.4 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็ว กระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตรึงรอบขอบ.....	65
5.5 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็ว กระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตรึงขอบซ้ายและขอบขวา.....	65
5.6 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็ว กระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตรึงขอบบนและขอบล่าง.....	66
5.7 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบที่ การตั้งตามขอบแบบต่างๆ.....	67
5.8 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างระหว่างการตรึงขอบแบบต่างๆ กับ แบบการตรึงรอบขอบ.....	67
5.9 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบจัตุรัสที่การตรึงขอบ แตกต่างกัน.....	69
5.10 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมาย	

รูปที่	หน้า
แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่การตรึงตามขอบต่างๆ.....	70
5.11 เเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างการตรึงขอบแบบต่างๆ กับแบบการตรึงรอบขอบ.....	70
5.12 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาดแตกต่างกัน.....	72
5.13 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่ขนาดแตกต่างกัน.....	73
5.14 เเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างขนาด 200×200 ตารางมิลลิเมตร และ 300×300 ตารางมิลลิเมตร กับขนาด 100×100 ตารางมิลลิเมตร.....	73
5.15 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ความหนาต่างกัน..	74
5.16 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่ความหนาแตกต่างกัน.....	75
5.17 เเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างความหนา 10 15 และ 20 มิลลิเมตร กับความหนา 5 มิลลิเมตร.....	75
6.1 ทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกในแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว.....	78
6.2 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เเปอร์เซ็นต์.....	79
6.3 เเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เเปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีปรับค่า.....	79
6.4 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น และลดลง 15 เเปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ที่ไม่มีปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น.....	81
6.5 พลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ 15 เเปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ.....	82
6.6 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกอย่างละ 5 10 และ 15 เเปอร์เซ็นต์.....	83
6.7 เเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่น	

รูปที่	หน้า
ในทิศทางของเมตริกอย่างละ 5 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบ ที่ไม่มีมีการปรับค่า.....	84
6.8 พลังงานความเครียดของแผ่นเป่าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในทิศทางของเมตริก 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ.....	84
6.9 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่า มอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น และลดลง 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ที่ไม่มีมีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น.....	85
6.10 ทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกในแผ่นคอมพอลิติดแบบสองทิศทาง.....	86
6.11 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ปะทะแผ่นเป่าหมายแบบไฟเบอร์ทิศทางเดียวเปรียบเทียบกับ กับแผ่นเป่าหมายแบบไฟเบอร์สองทิศทาง.....	88
6.12 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทาง ของไฟเบอร์แบบสองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์.....	89
6.13 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความ ยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบสองทิศทางอย่างละ 5, 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองที่ไม่มีมีการปรับค่า.....	90
6.14 พลังงานความเครียดของแผ่นเป่าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในทิศทางของไฟเบอร์ 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ.....	90
6.15 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่า มอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น และลดลง 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบสองทิศทาง ที่ไม่มีมีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น.....	91
6.16 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทาง ของเมตริกของคอมพอลิติดแบบไฟเบอร์สองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์.....	92
6.17 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัส ความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอลิติดแบบไฟเบอร์สองทิศทาง อย่างละ 5 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองที่ไม่มีมีการปรับค่า.....	93
6.18 พลังงานความเครียดของแผ่นเป่าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในทิศทางของเมตริก 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ.....	93
6.19 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่า มอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น และลดลง 15 เปรอร์เซ็นต์	



รูปที่	หน้า
เปรียบเทียบกับการจำลองแบบสองทิศทาง ที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น.....	94
6.20 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์.....	96
6.21 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	96
6.22 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	97
6.23 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	97
6.24 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงดึง.....	98
6.25 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	100
6.26 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	100
6.27 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงดึง.....	101
6.28 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	103
6.29 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทางเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์	

รูปที่	หน้า
กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	103
6.30 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ ที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงเฉือน.....	104
6.31 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	106
6.32 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทางเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า.....	106
6.33 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงอัด.....	107
ก.1 ลักษณะการตัดแผ่น Kevlar® ตามยาวของเส้นใย และตัดเป็นมุม 45 องศากับการวางตัวของเส้นใยโดยเส้นประแสดงการสานของเส้นใย .....	120
ก.2 ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตสำหรับการทดสอบหาค่า Young's modulus และ Shear modulus.....	121
ก.3 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU พร้อมชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม.....	122
ก.4 Extensometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น SI50-50-25.....	122
ก.5 Digital strain meter รุ่น TC-31K พร้อมชุดขยายสัญญาณ.....	123
ก.6 Strain gages ยี่ห้อ Kyowa รุ่น KFP-2-120-C1-65L1M2R.....	123
ก.7 ลักษณะการติด Strain gage ตามความยาวด้านหน้าและตามขวางด้านหลัง.....	124
ก.8 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบและเครื่องมือวัดต่างๆ ที่ติดตั้งเข้ากับชิ้นงาน.....	124
ก.9 ลักษณะความเสียหายจากตัวอย่างชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00.....	127
ก.10 ตัวอย่างความเสียหายจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00.....	128

รูปที่	หน้า
ก.11 ลักษณะตัวอย่างของกราฟ Stress/Strain Curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00.....	129
ก.12 ลักษณะความเสียหายจากตัวอย่างชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94.....	130
ก.13 ลักษณะตัวอย่างของกราฟ Shear Stress/strain curve ที่คำนวณได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94.....	131



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

เกราะเป็นอุปกรณ์ที่นักรบใช้มาตั้งแต่สมัยโบราณ วิวัฒนาการของเกราะเริ่มจากใช้ไม้ หรือ หนังสัตว์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันอาวุธแหลมคม มาจนถึงใช้โลหะ เรื่อยมาจนใช้วัสดุอื่นๆ ในการทำเป็นเกราะกันกระสุน ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตอาวุธมีความเจริญก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก ทำให้อาวุธมีความร้ายแรงในการทำลายมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ไม่ว่าจะใช้ป็นเสื้อเกราะส่วนบุคคลที่ต้องมีน้ำหนักเบาทำให้เกิดความคล่องตัวของผู้สวมใส่ หรือในรถหุ้มเกราะที่สามารถต่อต้านอาวุธที่มีความสามารถในการทำลายล้างสูง ได้ หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ทางทหารอื่นๆ ที่ต้องมีความเหมาะสมตามชนิดและสภาพการใช้งานแตกต่างกันออกไป ซึ่งเกราะประสิทธิภาพสูงที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพง ทั้งยังเป็นการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศด้วย

วัสดุที่นำมาประกอบเป็นเกราะกันกระสุนแบบแข็งมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ เซรามิก โลหะ และพอลิเมอร์ เป็นต้น เซรามิก ซึ่งมีความแข็งแรงสูงจะอยู่ด้านหน้าทำหน้าที่รับกระสุนกับแรงกระแทกโดยตรงและทำให้หัวกระสุนแตกออกเป็นชิ้นเล็ก โลหะและพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูงทำหน้าที่ดูดซับแรงกระแทก ลดความเร็วและเก็บกักชิ้นส่วนของเศษกระสุนที่แตกออก ลดอาการช้ำในและอาการบาดเจ็บของผู้สวมใส่

ปัจจุบันเส้นใยพอลิเมอร์ความแข็งแรงสูงได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อการพัฒนาเกราะกันกระสุนแบบต่างๆ จนกล่าวได้ว่าเป็นการปฏิวัติวิธีการทำเกราะกันกระสุนก็ว่าได้ เส้นใยที่นำมาใช้งานดังกล่าวนี้ มีหลายประเภท เช่น เส้นใยอารามาย (Kevlar® หรือ Twaron®) เส้นใยพอลิเอทิลีน (Spectra® หรือ Dyneema®) เส้นใย PBO (Zylon®) เส้นใยแต่ละประเภทมีคุณสมบัติข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ปัจจัยหลักในการกำหนดว่าเส้นใยมีความเหมาะสมในการใช้งานด้านเกราะกันกระสุนหรือไม่ คือ คุณสมบัติเชิงกล ซึ่งโดยส่วนใหญ่เส้นใยไฟเบอร์เหล่านี้มีความแข็งแรงสูงอยู่แล้ว (ทวีชัย และ ศรารุช, 2004) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านน้ำหนักต่อความแข็งแรงขึ้นอีก ได้มีการนำไฟเบอร์เหล่านี้ไปผสมรวมกับเมตริกชนิดต่างๆ เกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูงขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในการทำเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูง

การกำหนดประสิทธิภาพของเกราะกันกระสุนในปัจจุบันนิยมใช้มาตรฐาน NIJ Standard-0101.04 ของ National Institute of Justice (NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของเกราะกันกระสุน โดยระดับประสิทธิภาพของเกราะกันกระสุน



แบ่งเป็น 7 ระดับตามลำดับความแข็งแรงต่ำไปสูงดังนี้คือ 1, 2A, 2, 3A, 3, 4 และระดับพิเศษ (คณะกรรมการมาตรฐานยุโรปกรณีเครื่องป้องกันกระสุนกระสุนทรวงกลาโหม, 2004)

เนื่องจากมีความต้องการที่จะพัฒนาความสามารถในการผลิตเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูงและมีน้ำหนักเบาให้ได้ภายในประเทศ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยความร่วมมือกับกระทรวงกลาโหม จึงได้ตั้งโครงการการพัฒนาเกราะแข็งน้ำหนักเบาสำหรับการใช้งานด้านยุทธโปกรณ์ทางทหารในกองทัพไทย (กุลจิรา และ คณะ, 2004) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อศึกษาความต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนปืนของเซรามิกโลหะและพอลิเมอร์
2. เพื่อพัฒนาและคัดเลือกเซรามิกโลหะและพอลิเมอร์ สำหรับนำไปสร้างเกราะกันกระสุนที่มีราคาถูกและน้ำหนักเบา
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองความเสียหายของวัสดุจากกระสุน
4. เพื่อพัฒนาการออกแบบและการนำวัสดุต่างๆ มาจัดเรียงผสมกัน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของเกราะกันกระสุน

โดยได้แบ่งโครงการออกเป็น 4 โครงการย่อย คือ

1. การวิจัยและพัฒนาเซรามิกชนิดอะลูมินา เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับเกราะกันกระสุน
2. โครงการคัดเลือกเหล็กแผ่น เพื่อนำไปสร้างเสื้อเกราะกันกระสุนชนิดแข็งที่มีน้ำหนักเบา
3. การพัฒนาเส้นใยพอลิเอทิลีน พอลิเมอร์คอมพอสิต จากเมตริกเบนซอกซาซีน/ยูรีเทนอัลลอยด์กับเส้นใยพอลิเอทิลีนและเส้นใย Kevlar® และพอลิเมอร์คอมพอสิต/โลหะ หรือเซรามิก สำหรับทำเกราะกันกระสุน
4. การทำแบบจำลองความเสียหายของวัสดุชนิดต่างๆ โดยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับเกราะกันกระสุน

งานในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการที่ 4 คือ การจำลองความเสียหายของวัสดุ โดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งการจำลองแบบมีข้อดี คือ สามารถจำลองแบบได้มากกว่าที่ที่ต้องการโดยไม่ต้องสิ้นเปลืองวัสดุในการทดลอง ช่วยลดจำนวนครั้งในการทดลองลง ทำให้ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการทดลอง รวมทั้งสามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง เช่น ความแข็งของวัสดุ ความเร็วของกระสุนได้สะดวก แต่มีข้อเสีย คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง อาจจะไม่มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง เนื่องจากในการจำลองแบบไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขบางอย่างจากข้อสมมติฐานบางประการให้เหมือนกับการทดลองจริงทุกประการ เช่น เรื่องของพลังงานความร้อนหรือพลังงานเสียงที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของกระสุน หรือผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ จากการทดลองที่ไม่อาจควบคุมได้ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลการจำลองกับการทดสอบแบบทำลายเพื่อการเปรียบเทียบผล

การพัฒนาแบบจำลองโดยใช้เทคนิคการจำลองแบบนี้ มีระยะเวลาวิจัย 3 ปี โดยแบ่งย่อยออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาและรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการจำลองแบบทางจีป็น และข้อมูลของเกราะกันกระสุนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. เตรียมการจำลองแบบและเทียบมาตรฐานภายใต้สภาวะสถิต
3. ปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถรองรับสภาวะแบบพลวัตของของแผ่นเซรามิก โลหะ และพอลิเมอร์คอมพอสิต
4. พัฒนาแบบจำลองด้านการประกอบวัสดุเป็นเกราะกันกระสุน
5. ศึกษาและพัฒนาสมรรถนะการปฏิบัติงานเชิงจีปนของเกราะซึ่งใช้วัสดุที่ศึกษาในโครงการย่อยที่ 1 ถึง 3

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำตั้งแต่ขั้นที่ 1 ถึงขั้นที่ 3 โดยจำลองความเสียหายของวัสดุจากการกระแทกจีปนของพอลิเมอร์คอมพอสิตเท่านั้น

วัสดุคอมพอสิต เป็นวัสดุผสมที่มีการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันในระดับมหภาคเพื่อทำให้คุณสมบัติของวัสดุที่ได้ใหม่มีประสิทธิภาพในการรับแรงสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นความทนทานต่อสภาวะต่างๆ มีความแข็งแรงมากขึ้นแต่น้ำหนักเบาลง หรือมีความยืดหยุ่นสูงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพของเกราะอย่างมาก เพราะวัสดุคอมพอสิตจะเป็นวัสดุชั้นสุดท้ายในการรับแรงกระแทกและป้องกันไม่ให้เศษหัวกระสุนไปทำอันตรายกับตัวผู้สวมใส่ โดยทั่วไปวัสดุคอมพอสิตจะประกอบไปด้วยเส้นใยไฟเบอร์และเมตริก ซึ่งเส้นใยไฟเบอร์นี้เป็นพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิaramay (Polyaramid) โดยชื่อทางการค้า เช่น Twaron® และ Kevlar® เป็นต้น สำหรับเมตริกโดยส่วนใหญ่จะเป็นตัวเสริมความแข็งแรงของคอมพอสิต เช่น อีพอกซี (Epoxy) และ เรซิน (Resin) เป็นต้น

จากการที่คอมพอสิตเป็นวัสดุผสม จึงทำให้มีคุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันออกไปจากคุณสมบัติมาตรฐาน ทั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละแนวแกนของวัสดุก็มีค่าแตกต่างกันในลักษณะวัสดุแบบ Orthotropic หรือ Anisotropic ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนจึงมีความแตกต่างกัน ทำให้มีความซับซ้อนยากยิ่งในการวิเคราะห์ จึงควรใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองความเสียหายเพื่อทำนายความเสียหายหรือผลกระทบต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นจากการกระแทกของกระสุนกับคอมพอสิต เพื่อใช้ลดการลองผิดลองถูกในการออกแบบตามที่กล่าวข้างต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและเลือกใช้สมการโครงสร้าง (Constitutive equation) หลักความเสียหาย (Failure criterion) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์คอมพอสิต และหัวกระสุน สำหรับการจำลองแบบพลวัตระดับมหภาคจากการปะทะทางจีปนในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA
2. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ระดับมหภาคที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA ในการจำลองการปะทะทางจีปนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

3. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลที่มีผลต่อการปะทะแบบทางซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการจำลองแบบทางซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต
2. ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA ในการจำลองทางพลวัตระดับมหภาค
3. แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการปะทะทางซิปบนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัวกระสุนและแผ่นคอมพอสิต
4. เปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลทางการปะทะทางซิปบนที่ได้ศึกษารวบรวมมาจากผลงานวิจัยและการทดลองที่เกี่ยวข้อง
5. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลที่มีผลต่อการปะทะทางซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการจำลองแบบทางซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต
2. ศึกษาและเลือกใช้สมการ โครงสร้าง หลักความเสียหาย และการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์คอมพอสิต และหัวกระสุน สำหรับการจำลองแบบพลวัตจากการปะทะทางซิปบน
3. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA ในการจำลองการปะทะแบบซิปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต
4. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลต่อการปะทะแบบซิปบนและเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลทางการกระแทกทางซิปบนที่ได้ศึกษารวบรวมมาจากผลงานวิจัยและการทดลองที่เกี่ยวข้อง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สมการ โครงสร้าง หลักความเสียหาย ทั้งได้ลักษณะเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการกระแทกซิปบนทางพลวัตสำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิตระดับมหภาคในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA รวมทั้งทราบค่าพารามิเตอร์เชิงกลที่มีผลกระทบสำหรับวัสดุคอมพอสิต เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ร่วมกับการพัฒนาเกราะกันกระสุนที่มีการรวมกันของวัสดุทั้ง 3 ชั้น ทั้งเป็นการสร้างองค์ความรู้ เพื่อเป็นพื้นฐานงานวิจัยทางซิปบนศาสตร์และการนำไปใช้จริงในอนาคต

## บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

สำหรับการจำลองแบบการกระแทกทางชีพบนคอมพิวเตอร์ ส่วนใหญ่จะมีการศึกษาโดยทำการทดลองเชิงจริงและทำการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ แล้วนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบที่จำลองขึ้นมา โดยศึกษาความเค้น ความเร็วกระสุนหลังจากทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายหรือที่เรียกว่า ความเร็วตกค้าง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมทั้งปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ขณะเกิดการกระแทกหรือหลังจากการกระแทกที่คอมพิวเตอร์เสียชีวิตไปแล้ว การจำลองแบบถูกใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุและออกแบบจำนวนชั้นของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำเกราะกันกระสุน เพื่อลดการทดลองเชิงจริง เป็นการลดความยุ่งยาก เวลา และค่าใช้จ่ายในการทดสอบจริง รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองแทนการทดลองที่ลักษณะบางอย่างไม่สามารถศึกษาได้ขณะการทดลอง เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นความเค้นขณะแผ่นคอมพิวเตอร์รับแรงกระแทกจากกระสุน

แบบการจำลองทางคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่มีการจำลองขึ้นโดยโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งมีหลายโปรแกรม ที่นิยมใช้ได้แก่ LS-DYNA และ AUTODYN ในบางงานวิจัยใช้โปรแกรม ABAQUS ซึ่งการจำลองแบบ มีหลากหลายแบบตั้งแต่แบบอย่างง่ายไปจนถึงแบบที่มีความซับซ้อน โดยแบบจำลองอย่างง่ายสามารถจำลองและทำการคำนวณผลได้ใน โปรแกรม ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้ ง่ายต่อการออกแบบและให้ผลระดับมหภาค (Macrostructure) ที่ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ไม่สามารถให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับอนุภาค (Microstructure) ส่วนแบบจำลองที่มีความซับซ้อนอาจต้องเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutines) เข้าไปในโปรแกรมหลัก เพื่อสร้างรูปร่างของแบบจำลองที่ซับซ้อนและคำนวณพฤติกรรมของวัสดุที่รูปร่างซับซ้อนนั้นๆ ซึ่งจุดนี้จะทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนและสร้างยากกว่าแบบจำลองแบบง่าย ทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า แต่การจำลองแบบในระดับอนุภาคให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองอย่างง่าย

แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการปะทะทางชีพ สามารถแบ่งประเภทออกเป็น 2 ประเภท คือ การจำลองแบบการกระแทกบนเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง และการจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นคอมพิวเตอร์ หลังจากการพิจารณาข้อดีข้อเสียของการจำลองสองแบบที่ผ่านมาแล้ว จึงนำมาสรุปเป็นแนวทางสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

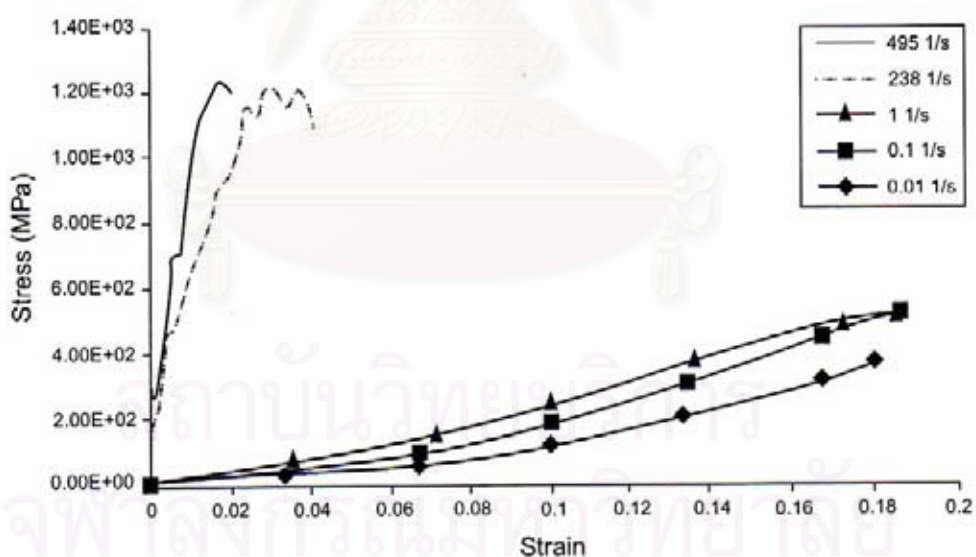
### 2.1 การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง

การจำลองลักษณะนี้จะพิจารณาเฉพาะการกระแทกบนแผ่นเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง โดยไม่รวมถึงเมตริกซึ่งใช้ในการยึดระหว่างแผ่นไฟเบอร์เข้าด้วยกันในการคำนวณด้วย ซึ่งอาจ

กล่าวได้ว่าการจำลองลักษณะนี้ไม่ได้เป็นการจำลองแบบบนแผ่นคอมพอสิต แต่ก็ยังอยู่ในขอบเขตที่ต้องทำการศึกษาเพราะเป็นแผ่นไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง ที่จะนำไปใช้ทำเป็นส่วนประกอบของแผ่นคอมพอสิต เพื่อทำเกราะกันกระสุนต่อไป

เส้นใยไฟเบอร์ถักความแข็งแรงสูงถูกใช้โดยทั่วไปสำหรับการทำเกราะกันกระสุน เนื่องจากความต้านทานการกระแทกที่ดีเยี่ยม อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและความคล่องตัวในการสวมใส่ ไฟเบอร์ที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมการทำเกราะกันกระสุนโดยส่วนใหญ่จะเป็นชนิดพอลิเมอร์ (Polymeric) ซึ่งชื่อทางการค้าได้แก่ Kevlar® ผลิตโดยบริษัท Du Pont และ Twaron® ผลิตโดยบริษัท Akzo Nobel เป็นอารามาร์ยไฟเบอร์ (Aramid fiber) 2 แบบที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับงานทำเกราะกันกระสุนและในงานวิจัยการจำลองทางชิป

คุณสมบัติของเส้นใย จากงานวิจัยส่วนใหญ่นิยามกำหนดให้มีคุณสมบัติในแต่ละ เอลิเมนต์มีค่าเท่ากันโดยใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุ ซึ่งถ้าใช้คุณสมบัติสถิตของวัสดุจะทำให้ผลลัพธ์มีค่าไม่ถูกต้องสำหรับความต้านทานทางชิป (Shim *et al.*, 1995) โดยค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของวัสดุหาได้จากกรทดลองแบบ Dynamic tensile tests ซึ่งจะทำการดึงเส้นใยที่อัตราการดึง (Strain-rate) ต่างๆ โดยเครื่องทดสอบแรงดึงความเร็วสูง (Shim *et al.*, 2001) ผลการดึงดังรูปที่ 2.1

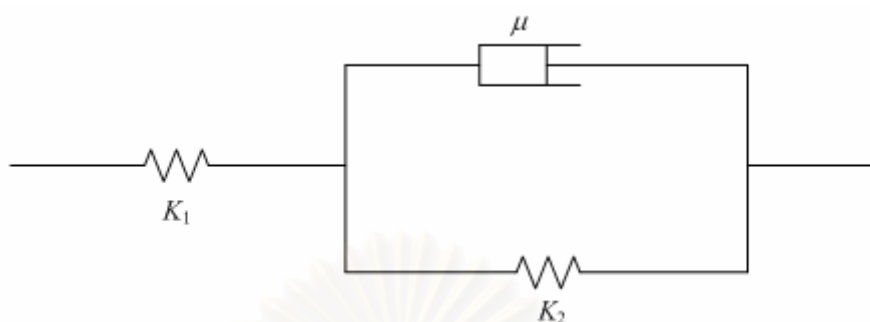


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของ Twaron® CT716 ที่อัตราการดึงต่างกัน (Shim *et al.*, 2001)

ค่าอัตราการดึงต่างๆ ที่ได้จะมีค่าความเสียหายของเส้นใยที่ต่างกัน ซึ่งจะนำมากำหนดเป็นหลักความเสียหายและสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่เสียหายกับอัตราการดึง ทั้งนี้ได้

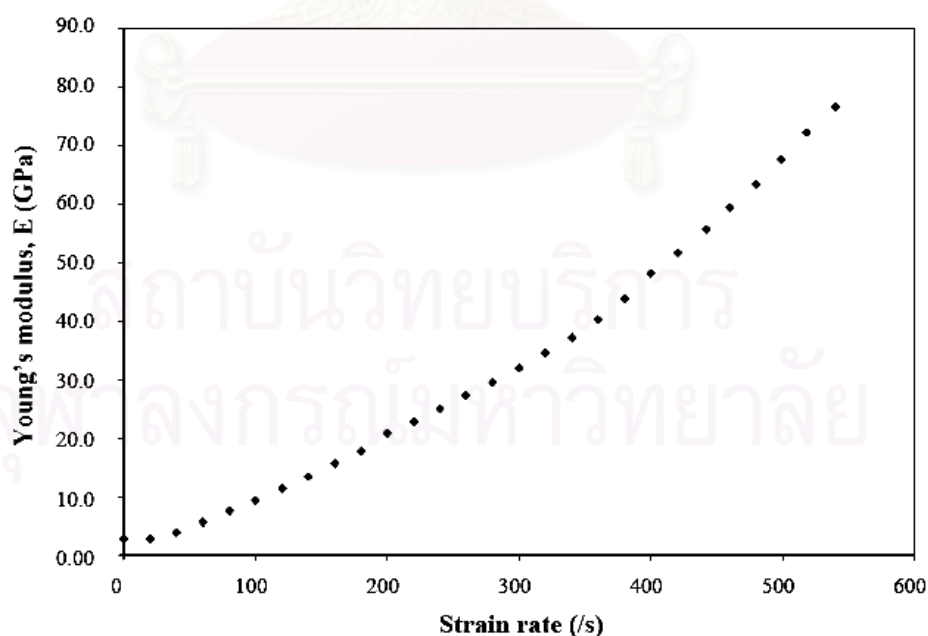


กำหนดให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบสปริง-ตัวหน่วง (Springs-Dashpot) และเป็น Viscoelastic (Shim *et al.*, 2001; Lim *et al.*, 2003; Tan *et al.*, 2005) แสดงดังรูปที่ 2.2

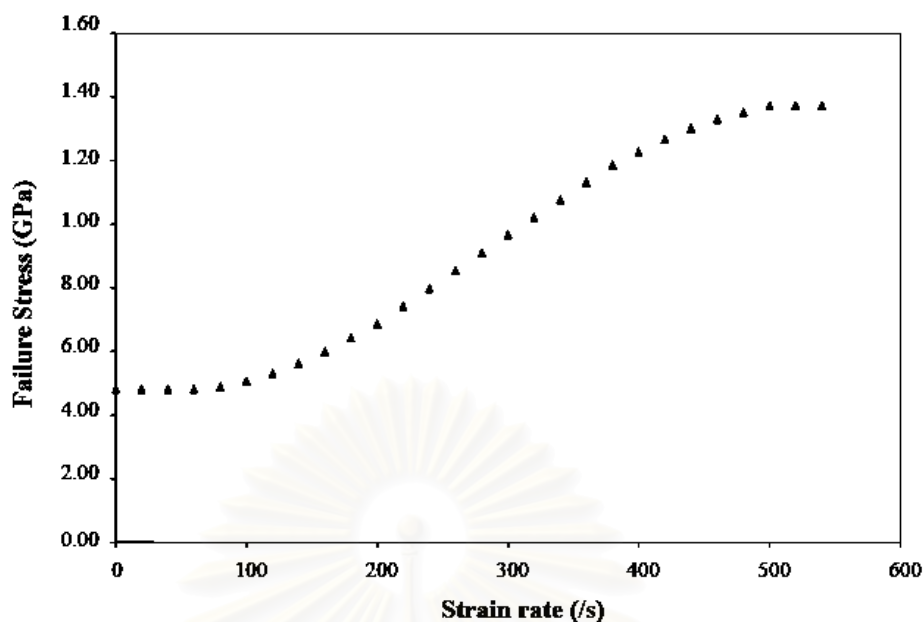


รูปที่ 2.2 ลักษณะสปริง-ตัวหน่วงที่นำมากำหนดพฤติกรรมของวัสดุ (Shim *et al.*, 2001; Lim *et al.*, 2003; Tan *et al.*, 2005)

จากค่าความเครียดตามอัตราการดึงต่างๆ และสมการความสัมพันธ์จากการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุ นำมากำหนดเป็นหลักความเสียหายที่ค่าความยืดหยุ่น (Elastic failure criterion) โดยวัสดุมีค่าวัสดุมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) และ ค่าความเค้นที่จุดเสียหาย (Failure stress) แปรผันตามสภาพการดึง จากการตัดแปลงในช่วง Elastic-Plastic ให้เหลือ Elastic เพียงอย่างเดียว แสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นกับอัตราการดึงต่างๆ (Lim *et al.*, 2003)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่จุดเสียหายกับอัตราการดึงต่างๆ (Lim *et al.*, 2003)

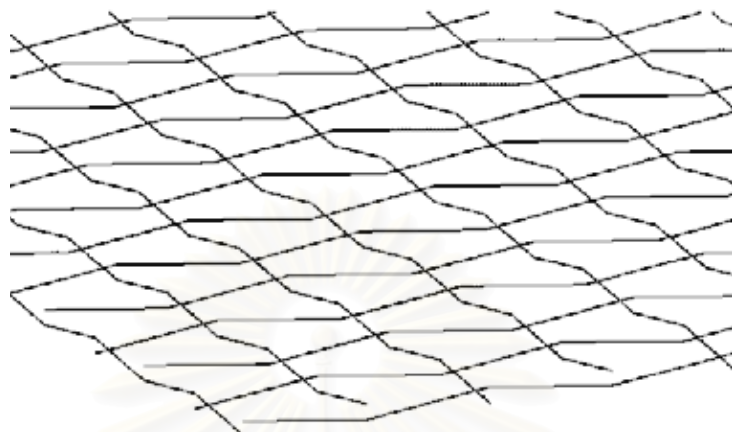
การจำลองแบบนี้เป็นการกำหนดให้แผ่นไฟเบอร์เสียหายที่คุณสมบัติยืดหยุ่น ซึ่งทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LS-DYNA3D เลือกใช้แบบวัสดุชนิดที่ 19 (Strain rate dependent plasticity) และเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง (Shell หรือ Membrane) กับแผ่นเส้นใยไฟเบอร์ กระสุนที่ใช้ในการจำลองกรณีดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นทรงกลมและถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Lim *et al.*, 2003; Zeng *et al.*, 2005) การจำลองให้ผลลัพธ์ในค่าของความเร็วตกค้างรวมทั้งลักษณะความเสียหายในระดับมหภาคของแผ่นไฟเบอร์ ใกล้เคียงกับผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกัน (Lim *et al.*, 2003)

ต่อมาได้มีการพัฒนารูปแบบของลักษณะของเส้นใยในแบบจำลอง โดยใช้เอลิเมนต์แบบคาน (Bar elements) โดย Tan and Ching (2006) ซึ่งลักษณะของเอลิเมนต์จะมีความแตกต่างกับชนิดเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง คือ เอลิเมนต์แต่ละอันจะสามารถไหลไปบนเอลิเมนต์อีกอันหนึ่งได้

คล้ายพฤติกรรมจริงของเส้นใยมากกว่าเอลิเมนต์แบบแผ่นบางที่เอลิเมนต์แต่ละอันจะมีการเชื่อมโยงติดต่อกันไปทั้งหมดไม่สามารถไหลหรือเคลื่อนตัวแยกจากกันได้ ดังแสดงรูปที่ 2.6



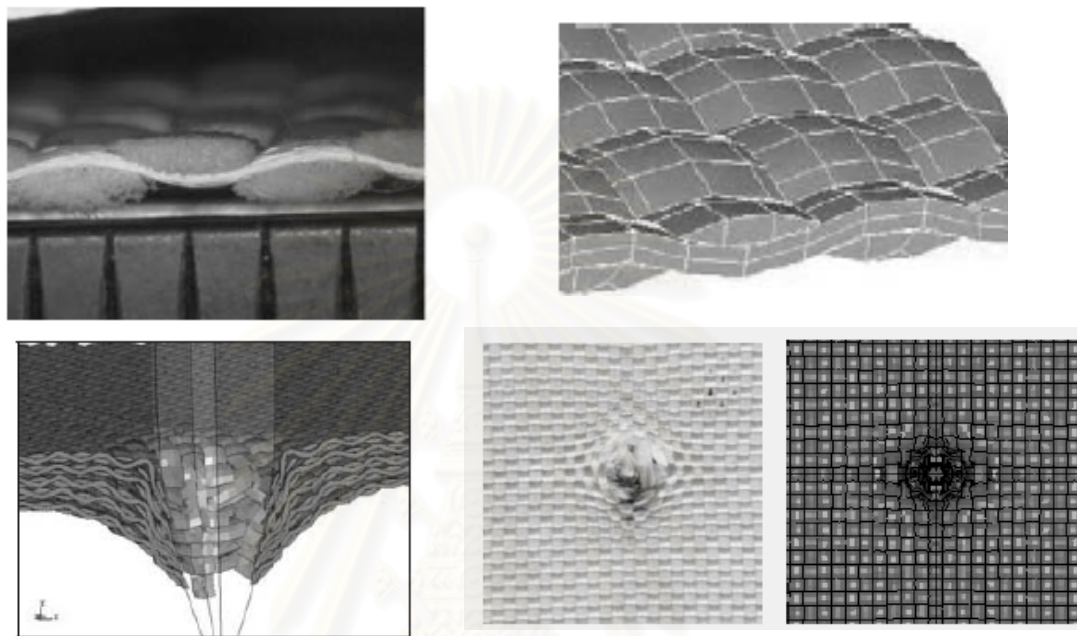
รูปที่ 2.6 ลักษณะของเอลิเมนต์แบบคาน (Bar elements) ของ Tan and Ching (2006)

ผลการจำลองชนิดที่ใช้เอลิเมนต์แบบคาน ถ้าเทียบลักษณะความเสียหายของแผ่นไฟเบอร์ในระดับอนุภาคจะมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าใช้เอลิเมนต์แบบแผ่นบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อเปรียบเทียบระดับมหภาค กล่าวคือ เทียบเพียงความเร็วตกค้างการจำลองทั้ง 2 แบบ ก็ไม่แตกต่างกันมาก แต่แบบจำลองที่ใช้เอลิเมนต์แบบคานจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการออกแบบและคำนวณมากกว่า ถือได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนของการจำลองการกระแทกบนเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.7 ผลการจำลอง (บน) เปรียบเทียบกับการทดลอง (ล่าง) ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันในระดับอนุภาคของ Tan and Ching (2006)

นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้เอลิเมนต์แบบหกหน้าแทนพฤติกรรมของเส้นใย (Gu, 2004) เป็นการวิจัยระดับรายละเอียดเส้นใยอีกแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงพฤติกรรมของเส้นใยได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น แต่ออกแบบและสร้างแบบจำลองได้ยากยิ่งกว่า ทั้งใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น ซึ่งการจำลองแบบนี้สามารถจำลองแผ่นเส้นใยได้หลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



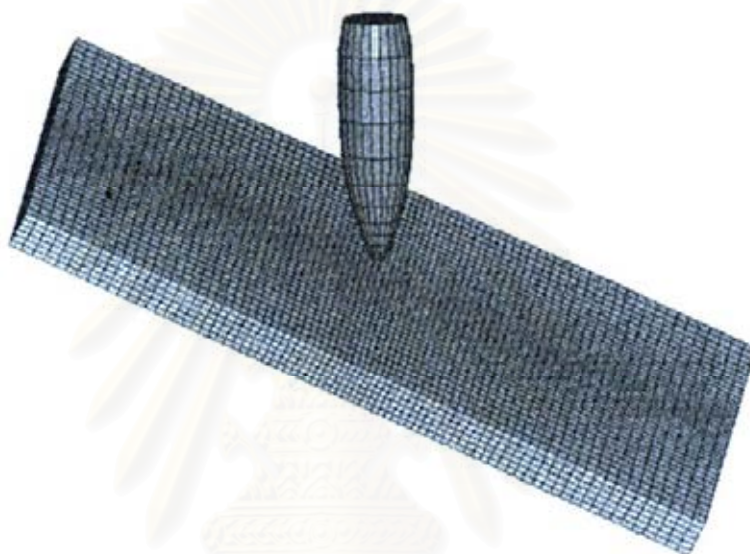
รูปที่ 2.8 แบบจำลองเส้นใยระดับอนุภาคซึ่งให้ผลใกล้เคียงการทดลองของ Gu (2004)

## 2.2 การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นคอมพอสิต

การจำลองในลักษณะนี้ เป็นการจำลองโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของเมตริกซ์ที่นำมาผสมกับไฟเบอร์ ซึ่งจะเป็นการนำคุณสมบัติที่เฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิดมารวมกันตามหลักของวัสดุคอมพอสิต กล่าวคือ เส้นใยไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางของไฟเบอร์ ร่วมกับเมตริกซ์ที่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า ทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นเหมาะสมกับการนำไปใช้ทำเกราะกันกระสุน โดยการหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ สามารถหาได้จากค่าคุณสมบัติของแต่ละอย่างมาจากการทดลองหรือจากคุณสมบัติมาตรฐานของวัสดุ แล้วนำมารวมกันโดยใช้ทฤษฎีทางคอมพอสิต ที่เรียกว่า กฎของส่วนผสม (Rule of mixture) เพื่อให้ได้คุณสมบัติรวมของแผ่นคอมพอสิตทั้งแผ่นแล้วนำค่าที่ได้ไปทำเป็นแบบจำลอง หรือจะใช้วิธีแยกคำนวณในชั้นของไฟเบอร์และเมตริกซ์ในการจำลองแบบไปพร้อมกัน โดยจะเป็นการพิจารณาในระดับอนุภาค ซึ่งในวิธีการอย่างหลังนี้ เป็นวิธีที่ยากและซับซ้อนมากเนื่องจากต้องพิจารณาแยกชั้นแต่ละชั้น ทั้งต้องคำนึงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นไฟเบอร์และเมตริกซ์รวมถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการกระแทก จึงยังไม่เป็นวิธีการที่นิยมแพร่หลายในงานทางด้านจำลองแผ่นคอมพอสิต



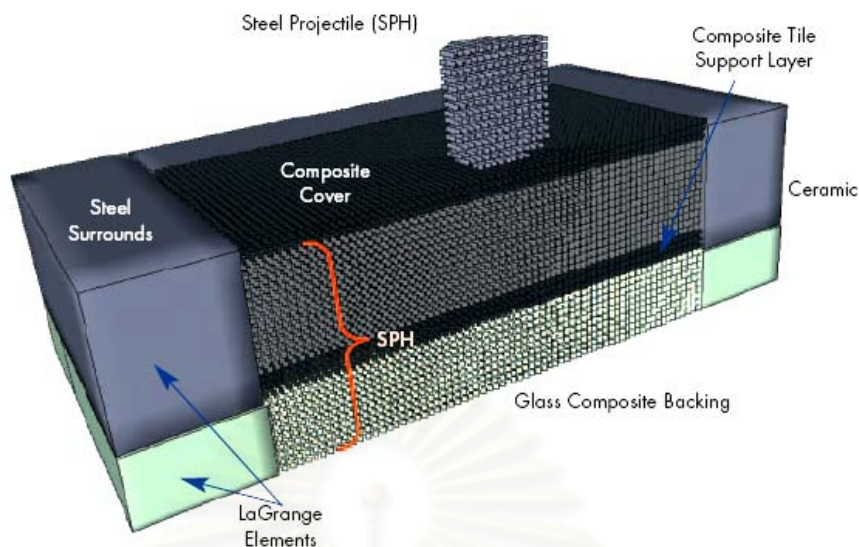
การออกแบบแบบจำลองจะมีสองส่วนคือ ส่วนของแผ่นคอมพอสิตและส่วนของกระสุน ซึ่งส่วนของกระสุนงานในวิจัยที่ผ่านมานั้นมีสองแบบ คือ แบบแรกจะกำหนดให้กระสุนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Gu and Xu, 2004; Gu and Li, 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยจะไม่พิจารณาการเสียรูปของกระสุน เนื่องจากจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการทดลอง เป็นการช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ โปรแกรมสำเร็จรูปที่นิยมใช้ สำหรับวิธีการนี้คือ LS-DYNA อย่างไรก็ตาม ทั้งนี้ลักษณะความเสียหายของแผ่นคอมพอสิตและกระสุนยังขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของหัวกระสุนและความหนาของแผ่นเป้าหมายด้วย (Jenq *et al.*, 1998)



รูปที่ 2.9 ลักษณะแบบจำลองที่กระสุนไม่เสียรูป (Gu and Xu, 2004)

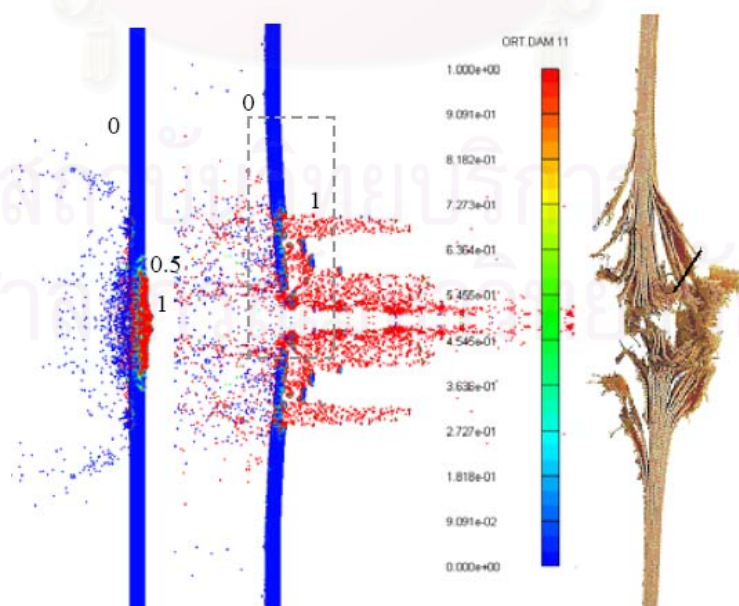
ส่วนแนวทางการออกแบบหัวกระสุนแบบที่สอง คือ การกำหนดให้กระสุนมีคุณสมบัติตามจริง กระสุนจึงมีการเสียรูปเนื่องจากการความเค้นที่เกิดขึ้นขณะปะทะ การออกแบบกระสุนวิธีนี้จะทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองจะมีมากขึ้น การออกแบบจึงยุ่งยากมากกว่าแบบแรก จึงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องการทราบค่ามากขึ้น วิธีนี้จะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลองถ้าจะพิจารณาถึงการเสียรูปของกระสุนด้วย (Johnson *et al.*, 1999) แต่อย่างไรก็ตามการเสียรูปที่มากเกินไปของกระสุนอาจทำให้ไม่สามารถคำนวณหาผลการจำลองแบบได้ ดังนั้น บางกรณีของการจำลองจึงต้องมีการออกแบบให้ลักษณะเป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH) แสดงดังรูปที่ 2.10





รูปที่ 2.10 ลักษณะแบบจำลองที่เป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH) (Yen *et al.*, 2004)

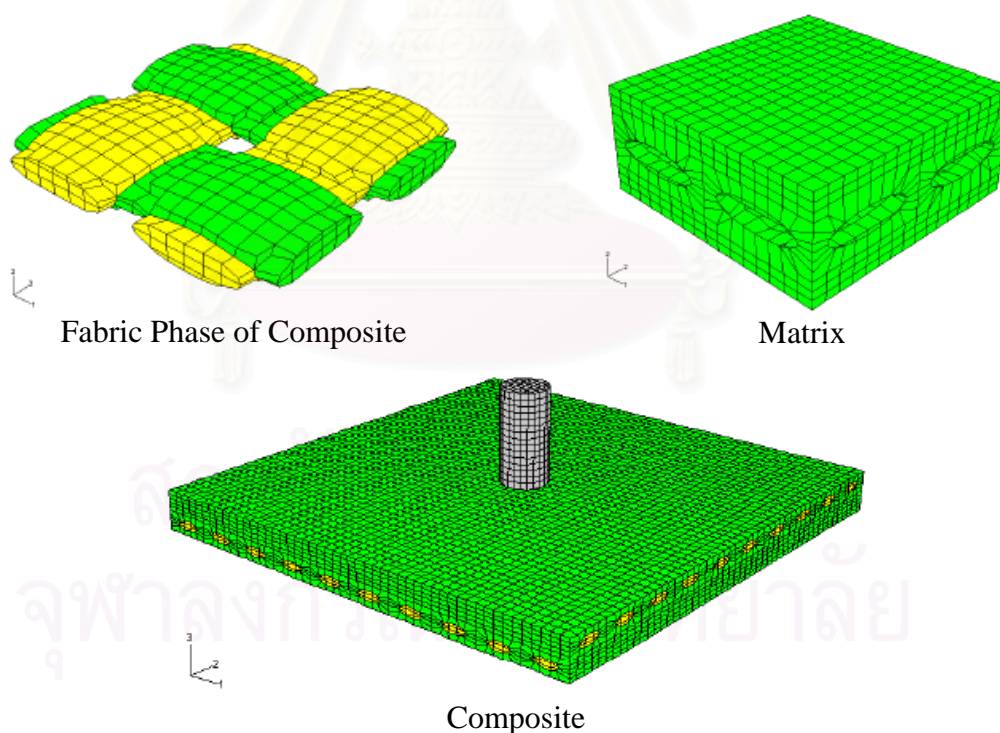
วิธีการดังกล่าวนี้将有ความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากจะไม่ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป กล่าวคือวิธีการดังกล่าวจะไม่มีกริด (Meshless) (Yen, 2002; Yen *et al.*, 2004) ทั้งยังเป็นกรจำลองการกระแทกที่ความเร็วสูง (Hypervelocity) เนื่องจากมีการเสียรูปที่สูงมากของแบบจำลอง เช่น การกระแทกของเศษชิ้นส่วนดาวหางกระทบสถานีอวกาศ (Clegg *et al.*, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการจำลองวิธีนี้นิยมใช้คือ AUTODYN



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองที่เป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วปะทะสูง (Clegg *et al.*, 2006)

ส่วนของแผ่นคอมพอสิตงานวิจัยส่วนใหญ่จะกำหนดให้เป็นเอลิเมนต์ทรงหกหน้า ซึ่งจะกำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันในแต่ละแนวแกน (Special orthotropic หรือ transversely isotropic) ตามลักษณะของวัสดุคอมพอสิตซึ่งได้กำหนดค่าความเสียหายในแต่ละแนวแกนที่แตกต่างกัน (Lee and Yoo, 2001; Gu and Xu, 2004) ความหนาและความแข็งแรงแต่ละแนวแกนของแผ่นคอมพอสิตมีผลกระทบโดยตรงกับผลลัพธ์ ซึ่งความเร็วตกค้างให้ค่าใกล้เคียงกันกับการทดลอง วิธีการดังกล่าวนี้จะพิจารณาระดับมหภาคของคอมพอสิตทั้งแผ่น โดยไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์ระดับเส้นใย ทั้งนี้ไม่พิจารณาการแยกชั้นของคอมพอสิต (Delamination)

อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่พิจารณาถึงระดับอนุภาคโดยการจำลองแบบตามวิธีการนี้มีความซับซ้อนมากเนื่องจากจะพิจารณาคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์แยกออกจากกัน (Gu and Li, 2005) ผลกระทบจากการกระแทกจะเกิดกับไฟเบอร์และเมทริกซ์แตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยบางงานยังได้พิจารณาในระดับรายละเอียดไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นใยถัก (Jovicic, 2003) แสดงดังรูปที่ 2.12 การวิจัยแบบนี้ซับซ้อนมากสำหรับวัสดุคอมพอสิตเพราะต้องพิจารณาผลกระทบหลายอย่างที่เกิดขึ้นขณะการกระแทก แต่ผลลัพธ์ที่ได้ในระดับมหภาคก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการแรกและผลการทดลอง



รูปที่ 2.12 แบบจำลองระดับอนุภาคที่พิจารณาแยกกันระหว่าง ไฟเบอร์ และเมทริก (Jovicic *et al.*, 2003)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกแบบหนึ่ง คือ การกำหนดให้คอมพอสิตเป็นแบบ Smooth particle hydrodynamic (SPH) เหมือนกับแบบจำลองที่ใช้ในส่วนของกระสุน เนื่องจากการเสียรูปมาก

ของแผ่นคอมพอสิต ซึ่งมีรายละเอียดและกลไกการคำนวณที่ซับซ้อน (Cheeseman *et al.*, 2004; Clegg *et al.*, 2006) แต่ก็ให้ผลลัพธ์ระดับมหภาคต่างๆ ในระดับที่ใกล้เคียงกันกับวิธีที่พิจารณา ระดับมหภาค

### 2.3 สรุป

จากงานวิจัยที่ศึกษามาทั้งหมดทำให้สามารถแยกประเภทของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการกระแทกทางชีวป็นศาสตร์ ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นเส้นใยไฟเบอร์ความแข็งแรงสูง และ 2. การจำลองแบบการกระแทกบนแผ่นคอมพอสิต ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น และทำให้เห็นว่า แบบจำลองการกระแทกบนแผ่นไฟเบอร์ความแข็งแรงสูงไม่มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากพิจารณาเพียงแผ่นเส้นใยไฟเบอร์เท่านั้น เพราะในการทำเกราะกันกระสุนนิยมทำเป็นแผ่นคอมพอสิตโดยการผสมของเมตริกชนิดต่างๆ

แบบจำลองที่ศึกษาจึงเป็นแบบจำลองที่เป็นแผ่นคอมพอสิตมีความหนา ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันในแต่ละแนวแกนตามหลักของวัสดุแบบ Orthotropic ของวัสดุคอมพอสิต ที่จะนำมาศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองทางชีวป็น ซึ่งการจำลองจะพิจารณาในระดับมหภาค เนื่องจากมีความซับซ้อนของการออกแบบและคำนวณน้อยกว่า ทั้งการจำลองระดับอนุภาคต้องพิจารณารายละเอียดระดับเส้นใย สำหรับแผ่นเกราะกันกระสุน แต่ได้ผลการจำลองโดยรวมที่ไม่แตกต่างกันมาก

### บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบการกระแทกทางจีปบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถแบ่งเป็น 3 คือ ส่วนทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (Theory of composite materials) ส่วนของการคำนวณทางตัวเลข (Numerical methods) และส่วนของข้อระวังในการจำลองแบบ โดยแยกอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 ทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต

หัวข้อทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (Theory of composite materials) นี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปของวัสดุคอมพอสิตซึ่งในที่นี้ได้แยกไว้เป็น 2 เรื่อง คือ ประเภทของวัสดุ และหลักความเสียหายของคอมพอสิต ซึ่งแบ่งตามหัวข้อดังนี้

##### 3.1.1 ประเภทของวัสดุ

โดยทั่วไปคอมพอสิตจะเป็นการนำวัสดุ 2 ชนิดมาผสมกันในระดับมหภาค จนเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านต่างๆ วัสดุคอมพอสิตจึงมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous) และไม่เป็นวัสดุแบบ Isotropic กล่าวคือ คุณสมบัติของวัสดุคอมพอสิตเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางหรือที่เรียกว่า Anisotropic materials ความแข็งแรงของคอมพอสิตจะแตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber) ซึ่งอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ หรืออาจเป็นวัสดุจำพวกคาร์บอน ทั้งความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตยังขึ้นอยู่กับเมตริก (Matrix) ซึ่งอาจเป็นเรซิน หรือ วัสดุอื่นทำหน้าที่ยึดเส้นใยไฟเบอร์แต่ละชั้นเข้าด้วยกัน นอกจากนี้แล้ว ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิต ยังขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของเส้นใยไฟเบอร์และลักษณะการวางตัวของเส้นใยแต่ละชั้นด้วย

วัสดุคอมพอสิตส่วนใหญ่นิยมผลิตด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวนหลายชั้น ซึ่งในแต่ละชั้นของคอมพอสิตจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน โดยอาจนำมาวางซ้อนกันที่มุมต่างกันเพื่อการรับแรงในทิศทางที่ต่างกันและเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นของไฟเบอร์หรือระหว่างไฟเบอร์ด้วยกันด้วยเมตริก การวางให้ทิศทางของไฟเบอร์ไปในทิศทางเดียวกันเพียงทิศเดียวจะเรียกว่าแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) ส่วนที่นิยมใช้ในกระดานกระดานจะทำการวางทิศทางของไฟเบอร์ให้ตั้งฉากกัน หรือที่เรียกว่าแผ่นคอมพอสิตแบบสองทิศทาง (Bidirectional) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วไฟเบอร์เหล่านี้จะถูกสานหรือถักมาให้แผ่นเดียวกันอย่างเช่น แผ่น Kevlar® หรือ Twaron® เพื่อเพิ่มการรับแรงปะทะของกระดานให้ได้มากขึ้น



คุณสมบัติเชิงกลทั่วไปของวัสดุคอมพอสิต ซึ่งเป็นวัสดุแบบ Anisotropic สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแนวฉาก  $\sigma$  และความเค้นเฉือน  $\tau$  กับ ความเครียดแนวฉาก  $\varepsilon$  และความเครียดเฉือน  $\gamma$  ให้อยู่ในรูปของ Compliance เมตริกซ์ ซึ่งมี 36 สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ กับ 21 ตัวแปรที่ไม่ขึ้นต่อกัน ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & \text{Sym} & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

ประเภทของวัสดุตามหลักของคอมพอสิต สามารถแยกเป็นชนิดพื้นฐานต่างๆ ได้ดังนี้

1. Monoclinic materials คือ วัสดุ Anisotropic ที่มีคุณสมบัติอยู่ในแนวแกนของวัสดุ (Material axis) 1 แกน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Compliance เมตริกซ์ ซึ่งมี 17 สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ กับ 13 ตัวแปรที่ไม่ขึ้นต่อกัน วัสดุชนิดนี้ค่อนข้างจะพบได้ยากหรือมีอยู่ในความเป็นจริงน้อย จากการที่มีทิศทางในแนวแกนของวัสดุเพียงทิศทางเดียว

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

2. Orthotropic materials คือ วัสดุ Anisotropic ที่มีคุณสมบัติอยู่ในแนวแกนของวัสดุ (Material axis) 2 แกน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Compliance เมตริกซ์สามารถแสดงที่มาและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้ด้วยการกำหนดให้ 1, 2, 3 เป็นแกนปกติของวัสดุ เมื่อเส้นใยไฟเบอร์วางตัวในระนาบ 2-3 ไม่วางตัวกระจายตามระนาบ 1-3 และ 1-2 ได้ดังนี้



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.3a)$$

เมื่อพิจารณารูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_1$  ตามรูปที่ 3.1 ได้ผลลัพธ์  $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1}$ ,

$$\varepsilon_2 = -\nu_{12}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}\sigma_1, \quad \varepsilon_3 = -\nu_{13}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}\sigma_1, \quad \gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{13} = 0$$



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงรูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_1$

เมื่อพิจารณารูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_2$  ตามรูปที่ 3.2 ได้ผลลัพธ์  $\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}$ ,

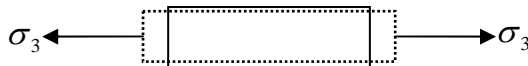
$$\varepsilon_1 = -\nu_{21}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}\sigma_2, \quad \varepsilon_3 = -\nu_{23}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{23}}{E_2}\sigma_2, \quad \gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{13} = 0$$



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงรูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_2$

เมื่อพิจารณารูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_3$  ตามรูปที่ 3.3 ได้ผลลัพธ์  $\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3}$ ,

$$\varepsilon_1 = -\nu_{31}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}\sigma_3, \quad \varepsilon_2 = -\nu_{32}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{32}}{E_3}\sigma_3, \quad \gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{13} = 0$$



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงรูปปร่างของวัสดุเมื่อใส่เฉพาะค่า  $\sigma_3$

เมื่อใส่เฉพาะค่า  $\tau_{12}$  ผลลัพธ์ ได้เฉพาะค่า  $\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$ , ใส่เฉพาะค่า  $\tau_{13}$  ผลลัพธ์ ได้เฉพาะค่า

$$\gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G_{13}} \text{ และใส่เฉพาะค่า } \tau_{23} \text{ ผลลัพธ์ ได้เฉพาะค่า } \gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}}$$

เมื่อใส่ค่าความเค้นทุกค่า สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดให้อยู่ในรูปของยังมอดูลัส ( $E$ ) และอัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.3b)$$

เมื่อ  $\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$ ,  $\frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3}$ ,  $\frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2}$  และ 12 สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ กับ 9 ตัวแปรที่ไม่ขึ้น

ต่อกัน ซึ่งวัสดุชนิดนี้ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตที่อาจมีทิศทางความแข็งแรงแตกต่างกันได้ทั้ง 3 ทิศทาง

3. Transversely isotropic หรือ specially orthotropic จะมีคุณสมบัติในทิศทางใดๆ

บนระนาบที่ 2-3 เหมือนกัน ดังนั้น ตัวแปร 2 และ 3 ของ Compliance เมตริกซ์จึงมีค่าเท่ากัน นั่น

คือ  $E_2 = E_3, G_{12} = G_{13}$ ,  $\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{31}}{E_3}$  และ  $G_{23}$  ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งคุณสมบัติแบบ

Isotropic,  $G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{32})} = \frac{E_3}{2(1+\nu_{23})}$  นั่นคือ 12 สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ กับ 5 ตัวแปรที่

ไม่ขึ้นต่อกัน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของ Compliance เมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{13}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.4a)$$

หรือ

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{21}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.4b)$$

วัสดุชนิดนี้เป็นประเภทวัสดุคอมโพสิตส่วนใหญ่ เพราะมีความแข็งแรงตามแนวแกนของไฟเบอร์อย่างน้อย 1 ทิศทางและทิศทางของเมตริก 2 ทิศทาง หรือกลับกัน ที่ทิศทางของไฟเบอร์ 2 ทิศทางในแนวระนาบ และทิศทางของเมตริก 1 ทิศทางตามความหนา อย่างเช่น เกราะกันกระสุน

4. Isotropic materials คุณสมบัติของวัสดุมีค่าเท่ากันในทุกทิศทาง นั่นคือ 12 สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์ กับ 2 ตัวแปรที่ไม่ขึ้นต่อกัน ใน Compliance เมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

วัสดุแบบนี้โดยส่วนใหญ่ก็เป็นวัสดุที่สามารถพบได้ทั่วไป เช่น เหล็ก พลาสติก หรือเซรามิก เป็นต้น เพราะวัสดุเหล่านี้มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งวัสดุคอมโพสิตไม่เป็นวัสดุชนิดนี้

### 3.1.2 ความแข็งแรงของวัสดุแบบ Orthotropic ในระบบ 3 มิติ

จากการที่วัสดุคอมพอสิตเป็นวัสดุแบบ Orthotropic จึงมีความแข็งแรงในแต่ละแกนของวัสดุต่างกันทั้ง 3 ทิศทาง แตกต่างกับ วัสดุแบบ Isotropic ที่มีความแข็งแรงไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางตามแกนของวัสดุ ดังนั้น จึงมีตัวแปรความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับทิศทางตามแนวแกนต่างๆ ดังนี้

$T_1$  คือ ความแข็งแรงดึงตามแนวยาวของไฟเบอร์ (Longitudinal tensile strength)

$T_2$  คือ ความแข็งแรงดึงตามแนวขวางของไฟเบอร์ (Transverse tensile strength)

$T_3$  คือ ความแข็งแรงดึงตามแนวของเมตริก (Through thickness tensile strength)

$C_1$  คือ ความแข็งแรงอัดตามแนวยาวของไฟเบอร์ (Longitudinal compressive strength)

$C_2$  คือ ความแข็งแรงอัดตามแนวขวางของไฟเบอร์ (Transverse compressive strength)

$C_3$  คือ ความแข็งแรงอัดตามแนวของเมตริก (Through thickness compressive strength)

$S_{12}$  คือ ความแข็งแรงเฉือนในแนวระนาบ 1-2 (Shear strength, 12 plane)

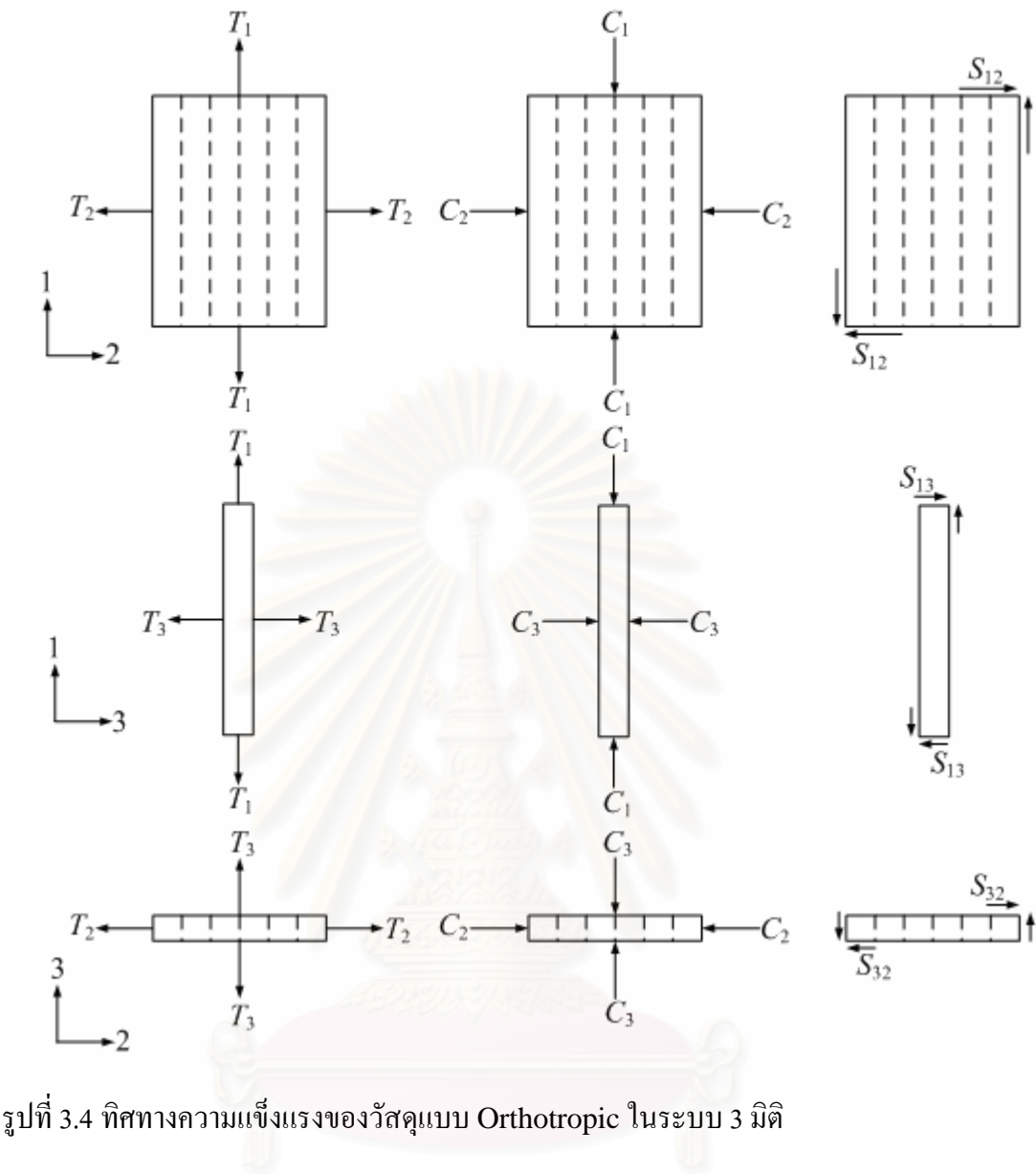
$S_{32}$  คือ ความแข็งแรงเฉือนในแนวระนาบ 3-2 (Shear strength, 32 plane)

$S_{13}$  คือ ความแข็งแรงเฉือนในแนวระนาบ 1-3 (Shear strength, 13 plane)

ซึ่งความเสียหายตามแนวแกนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.4

ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตตามแกนต่างๆ เหล่านี้ สามารถนำมาประกอบเป็นหลักความเสียหายตามทฤษฎีของคอมพอสิต เช่น หลักความเสียหายที่ความเค้นสูงสุด (Maximum stress failure criterion) หลักความเสียหายที่ความเครียดสูงสุด (Maximum strain failure criterion) หลักความเสียหายของ Tsai-Hill และหลักความเสียหายของ Tsai-Wu โดยทุกหลักความเสียหายวัสดุจะถูกพิจารณาเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้น จึงไม่สามารถพิจารณากลศาสตร์ความเสียหายระดับอนุภาค (Microscopic failure) ซึ่งได้แก่ การหลุดออกของไฟเบอร์ (Fiber pullout) การแตกหักของไฟเบอร์ (Fiber breakage) การโก่งงอของไฟเบอร์ (Fiber microbuckling) การแตกร้าวของเมตริก (Matrix cracking) และการแยกชั้นของ Larmina (Delamination)

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลองแบบ จึงไม่ได้ใช้หลักความเสียหายพื้นฐานต่างๆ ตามทฤษฎีของคอมพอสิตเหล่านี้ ดังนั้นจึงไม่ขออธิบายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรหรือสูตรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหลักความเสียหายเหล่านี้ ประกอบกับหลักความเสียหายเหล่านี้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตที่สามารถศึกษาได้จากหนังสือทฤษฎีของคอมพอสิตทั่วไป



รูปที่ 3.4 ทิศทางความแข็งแรงของวัสดุแบบ Orthotropic ในระบบ 3 มิติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods)

มีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องในการจำลองในเรื่องต่างๆ ต่อไปนี้

#### 3.2.1 แบบวัสดุสำหรับคอมพอสิตที่ใช้ในโปรแกรม LS-DYNA

แบบวัสดุโปรแกรม LS-DYNA ไม่ได้ใช้หลักความเสียหายตามทฤษฎีพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิต แต่ได้พัฒนาและประยุกต์ทฤษฎีความเสียหายของคอมพอสิตให้เหมาะสมกับการคำนวณโดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับวิธานิพนธ์นี้ แยกเป็นแบบวัสดุ ดังต่อไปนี้

1. แบบวัสดุชนิดที่ 22: Composite damage model. (Chang-Chang composite failure model) (Chang and Chang, 1987)

เป็นแบบวัสดุที่นิยมใช้กับวัสดุคอมพอสิตทั่วไปที่มีความเสียหายแบบยืดหยุ่น ซึ่งสามารถใช้ได้กับทั้งเอลิเมนต์แบบทรงหกหน้าและเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง โดยมีตัวแปรและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ตัวแปรของวัสดุที่ใช้ใน 3 ทฤษฎีความเสียหาย (John, 2005) มี 5 ตัว ได้แก่

$T_1$  คือ ความแข็งแรงดึงตามแนวยาว

$T_2$  คือ ความแข็งแรงดึงตามแนวขวาง

$S_{12}$  คือ ความแข็งแรงเฉือน

$C_2$  คือ ความแข็งแรงอัดตามแนวขวาง

$\alpha$ , คือ ตัวแปรไม่เชิงเส้นความเค้นเฉือน

โดย  $T_1, T_2, S_{12}$  และ  $C_2$  ได้จากการวัดความแข็งแรงของวัสดุโดยตรง ค่า  $\alpha$  กำหนดจากการวัดค่าความเค้น-ความเครียดเฉือน สำหรับ Plane Stress ค่าความเครียดถูกกำหนดในเทอมของความเค้นดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1\sigma_2) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2\sigma_1) \\ 2\varepsilon_{12} &= \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3\end{aligned}\tag{3.6}$$

ความเค้นเฉือนของไฟเบอร์เมตริกซ์ ในเทอมของโมเมนต์ความเสียหายได้แก่

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad (3.7)$$

ซึ่งเป็นสัดส่วนความเค้นเนื่องกับความแข็งแรงเฉือน

การแตกร้าวของเมตริกเกิดจาก

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_2}{T_2}\right)^2 + \bar{\tau} \quad (3.8)$$

เมื่อความเสียหายเกิดทุกครั้ง  $F_{matrix} > 1$ , ถ้า  $F_{matrix} > 1$  ค่าคงที่ของวัสดุ  $E_2, G_{12}, \nu_1$  และ  $\nu_2$  ถูก

กำหนดให้เป็นศูนย์

การเสียหายจากแรงอัดถูกกำหนดโดย

$$F_{comp} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau} \quad (3.9)$$

เมื่อความเสียหายเกิดทุกครั้ง  $F_{comb} > 1$ , ถ้า  $F_{comb} > 1$  ค่าคงที่ของวัสดุ  $E_2, \nu_1$  และ  $\nu_2$  ถูกกำหนดให้

เป็นศูนย์

การเสียหายสุดท้ายเนื่องจากการแตกหักของไฟเบอร์

$$F_{fiber} = \left(\frac{\sigma_1}{T_1}\right)^2 + \bar{\tau} \quad (3.10)$$

เมื่อความเสียหายเกิดทุกครั้ง  $F_{fiber} > 1$ , ถ้า  $F_{fiber} > 1$  ค่าคงที่ของวัสดุ  $E_1, E_2, G_{12}, \nu_1$  และ  $\nu_2$  ถูก

กำหนดให้เป็นศูนย์

ความเสียหายที่เกิด จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเค้นที่คำนวณได้จากโปรแกรมถูกนำมาตรวจสอบตามหลักความเสียหายและถึงค่าที่กำหนดไว้เป็นจริงตามสมการใดสมการหนึ่ง ตามหลักความเสียหายทั้ง 3 ข้างต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการหลักความเสียหายที่ 3.8, 3.9 และ 3.10 แล้วจะเห็นได้ว่าค่าความเค้นในระนาบเท่านั้นที่นำมาตรวจสอบความเสียหาย ซึ่งหลักความเสียหายทั้งสามสมการเหล่านี้ ได้ผสมรวมความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นแล้วค่าคงที่ของวัสดุต่างๆ ตาม

หลักความเสียหายแต่ละสมการ จะถูกเปลี่ยนให้เป็นศูนย์ นั่นคือ เอลิเมนต์นั้นๆ จะไม่ถูกนำมาคำนวณความเค้นความเครียดหรือค่าอื่นๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เอลิเมนต์ที่เสียหายนั้นๆ จะไม่ตอบสนองต่อการคำนวณอีกต่อไป

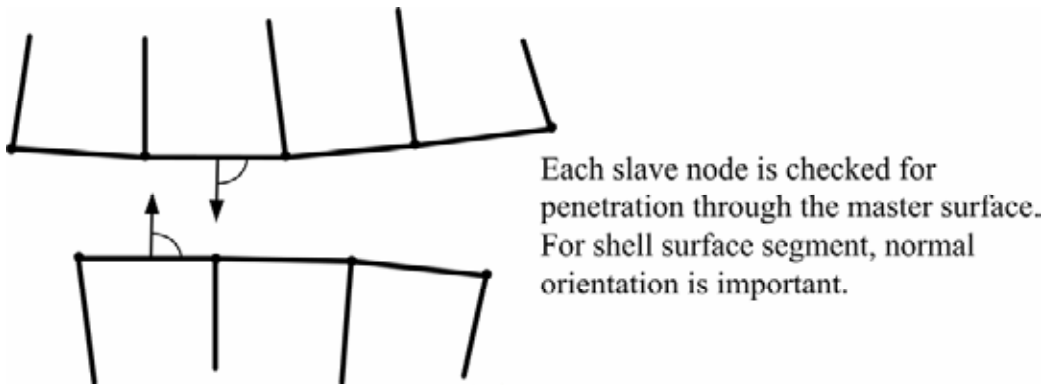
## 2. แบบวัสดุชนิดที่ 59: Composite failure shell or solid model.

แบบวัสดุชนิดนี้สามารถเลือกได้ว่าจะใช้เอลิเมนต์ชนิดใด โดยถ้าเลือกเป็นเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง การจำลองจะเป็นเพียงแบบ 2 มิติ ก็จะไม่มีการพิจารณาถึงความหนาของคอมพอสิตทำให้ตัวแปรที่ใส่ในโปรแกรมจะมีเพียงค่าในระนาบ แต่ถ้าเลือกเป็นเอลิเมนต์แบบมีปริมาตร (Solid elements) การจำลองจะเป็นแบบ 3 มิติ มีการพิจารณาถึงความหนาของแผ่นคอมพอสิตทำให้ต้องใส่ค่าตัวแปรในทุกแกนของวัสดุ ซึ่งหลักความเสียหายที่ใช้เป็นหลักความเสียหายที่โปรแกรม LS-DYNA ได้ประยุกต์จากหลักความเสียหายของ Tsai and Wu (1971) ให้มีความเหมาะสมกับวัสดุคอมพอสิตและการคำนวณของโปรแกรมมากขึ้น แต่ยังมีลักษณะความเสียหายที่เป็นรูปวงรี (Ellipsoidal) ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุแบบ Orthotropic มากกว่า (Schweizerhof *et al.*, 1998; Sriram and Vaidya, 2006)

### 3.2.2 การตรวจหาผิวสัมผัสของเอลิเมนต์

ผิวสัมผัส (Contact surface) ในโปรแกรม LS-DYNA มีหลายชนิด ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนแต่ละชนิดในแบบจำลอง แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้งานผิวสัมผัสชนิดที่ 3 หรือ ก็คือ Surface-to-Surface ซึ่งเป็นผิวสัมผัสแบบพื้นฐานที่นิยมใช้ทั่วไปอย่างกว้างขวางในแบบจำลองการกระแทก โดยแบบผิวสัมผัสชนิดนี้การไหลจะถูกคำนวณและต้านทานโดยแรงเสียดทาน (John, 2005)

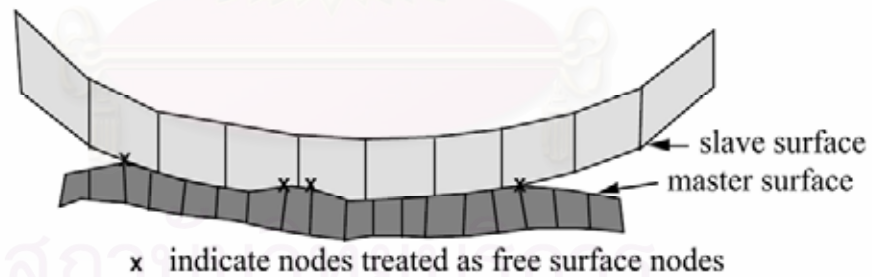
ในช่วงเริ่มต้นจุดต่อหลัก (Master node) จะค้นหาจุดต่อรอง (Slave node) ที่ใกล้ที่สุด และ จุดต่อรองจะถูกคำนวณไปกับส่วนประกอบหลักในแบบจำลอง (Master segments) เมื่อมีการตรวจพบผิวสัมผัสเป็นครั้งแรก ขั้นตอนนี้จะมีการทำซ้ำไปมาระหว่างจุดต่อหลักและจุดต่อรอง ต่อมาภายหลังจากนั้น การไหลจะทำให้จุดต่อเคลื่อนที่จากส่วนประกอบหนึ่งไปสู่อีกส่วนประกอบอื่น กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นและต่อเนื่องไปตามการติดต่อกันของกริด ทั้งเกิดไปพร้อมกับการตรวจสอบทุกส่วนของผิวสัมผัส ทั้งนี้เฉพาะส่วนที่ติดไปกับจุดต่อก่อนหน้านี้เท่านั้นที่จะได้รับการตรวจสอบและคำนวณ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะ Surface-to-surface ใน Contact surface (John, 2005)

ส่วนของผิวสัมผัส (Contact segments) หนึ่งอันจะถูกค้นพบด้วยจุดต่อแต่ละจุด จำนวนของการแทงทะลุของจุดต่อรองผ่านส่วนของส่วนประกอบหลัก จะถูกคำนวณและถูกด้านทานด้วยค่าความเค้นที่กำหนดให้มาทดแทน ขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำกลับไปมาระหว่างจุดต่อหลักและส่วนประกอบรอง

เนื่องจากว่ามีการป้องกันการสมมาตรของผิวสัมผัส จึงไม่มีปัญหาเรื่องของการกำหนดพื้นผิวหลักและพื้นผิวรอง ซึ่งอาจเป็นไปได้สำหรับจุดต่อของชิ้นส่วนที่มีหลากหลายความแตกต่างของหน้าสัมผัส ส่วนช่องว่างระหว่างพื้นผิวพื้นผิวหลักและพื้นผิวรองก็สามารถมีได้ แต่ก็ไม่ได้มีผลกระทบหรือมีความสำคัญอย่างไรสำหรับการคำนวณในแบบจำลอง เพราะทั้งนี้ตัวโปรแกรมก็จะกำหนดให้มีจุดต่อเฉพาะเจาะจง เพื่อให้ทราบถึงการสัมผัสกับผิวอิสระดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะการสัมผัสกับผิวอิสระ (John, 2005)

**3.2.3 สมดุลพลังงาน (Energy balance)**

ค่าสมดุลพลังงานสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์มีความสำคัญอย่างยิ่ง การเปรียบเทียบส่วนประกอบของค่าพลังงานสามารถใช้ในการวิเคราะห์ระบบในการจำลองได้ ซึ่งค่าของสมการควรมีค่าคงที่ในทุกเวลาที่คำนวณ (John, 2005) โดยค่าสมดุลพลังงานสำหรับทั้งแบบจำลองสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.11

$$E_{kin}^{\circ} + E_{int}^{\circ} + W_{ext} = E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg} = E_{total} \quad (3.11)$$

โดยที่  $E_{kin}$  คือ พลังงานจลน์เวลาปัจจุบัน (Current kinetic energy),  $E_{int}$  คือ พลังงานภายในเวลาปัจจุบัน (Current internal energy),  $E_{si}$  คือ พลังงานการไถลระหว่างการสัมผัสเวลาปัจจุบัน (ในกรณีที่มีแรงเสียดทาน) (Current sliding interface energy),  $E_{rw}$  คือ พลังงานจากการเกิดผนังแข็งเกร็ง (Current rigid wall energy),  $E_{damp}$  คือ พลังงานความหน่วงเวลาปัจจุบัน (Current damping energy),  $E_{hg}$  คือ พลังงานจาก Hourglass เวลาปัจจุบัน (Current hourglass energy),  $E_{kin}^{\circ}$  คือ พลังงานจลน์เวลาเริ่มต้น (Initial kinetic energy),  $E_{int}^{\circ}$  คือ พลังงานภายในเวลาเริ่มต้น (Initial internal energy) และ  $W_{ext}$  คือ งานจากภาวะภายนอก (External work) โดยแต่ละพลังงานยังประกอบไปด้วยพลังงานต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. พลังงานภายใน (Internal energy) ประกอบไปด้วยพลังงานอีลาสติกของความเครียด (Elastic strain energy) และงานที่กระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Work done in permanent deformation) ซึ่งพลังงานอีลาสติกของความเครียด คำนวณมาจาก ระยะยืด (Displacement) ที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุจากการเคลื่อนที่และถ่ายเทพลังงานระหว่างวัสดุหรือภาวะที่มากกระทำกับวัสดุ พลังงานอีลาสติกของความเครียดที่ได้จะนำมาคำนวณความเครียด และนำไปสู่การคำนวณความเค้นของแต่ละเอลิเมนต์โดยผ่านทาง Stiffness matrix ซึ่งเป็นสมการตั้งต้น ที่จะนำไปสู่การคำนวณความเสียหาย จากหลักความเสียหายที่กำหนดให้กับแบบจำลองต่อไป

2. พลังงานความหนืด (Viscous energy) เป็นพลังงานที่เกิดจากกระบวนการความหน่วง (Damping mechanisms) ซึ่งรวมทั้งความหนืดเชิงปริมาตร (Bulk viscosity) และ ความหน่วงในวัสดุ (Material damping)

3. งานภายนอกจากแรงที่มากกระทำ (External work of applied forces) ประกอบไปด้วย งานที่กระทำจากการประยุกต์แรงและความดัน เช่น งานที่กระทำจากความเร็ว ระยะการขจัด (การเคลื่อนตัว) หรือความเร่ง ที่ได้จากเนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4. พลังงานความเครียดเทียม (Hourglass energy) ในการอินทิเกรตแบบลดรูป (Reduced integration) มีข้อดีคือทำให้การคำนวณมีความถูกต้องช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณและประหยัดหน่วยความจำมากขึ้น แต่มีข้อเสียของการอินทิเกรตแบบลดรูป คือ ค่าความเค้น ณ ตำแหน่งจุดอินทิเกรชัน (Integration point) มีค่าเป็นศูนย์ทำให้เกิด ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “hourglassing” ทำให้การคำนวณไม่ถูกต้อง ปัญหานี้สามารถป้องกันเพื่อไม่ให้เอลิเมนต์เกิดการเสียรูปมากเกินไป (Excessive distortion) โดยการใส่ความแข็งเกร็งเทียม (Artificial Stiffness)



เข้าไปในเอลิเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้เอลิเมนต์เกิดการเสียรูปมากเกินไป ซึ่งวิธีการนี้เราเรียกว่า “Hourglass control”

### 3.2.4 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม (Flow chart)

ในการคำนวณของโปรแกรมเริ่มจากการคำนวณค่าต่างๆ ที่ได้จากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ในที่นี้ได้แก่ ความเร็วเริ่มต้นของกระสุน นำมาคำนวณได้พลังงานจลน์ (Kinetic energy) โดยคำนวณจากสมการพลังงานที่ 3.12 ซึ่งเป็นพลังงานเริ่มต้น (Initial energy) ของระบบ

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.12)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของกระสุน และ  $v$  คือ ความเร็วเริ่มต้นของกระสุน

ต่อมาโปรแกรมจะตรวจสอบและเก็บค่าตำแหน่งจุดต่อของเอลิเมนต์ต่างๆ ในแบบจำลอง (Process elements) ซึ่งต่อจากขั้นตอนนี้ก็จะเป็นการตรวจสอบผิวสัมผัส ถ้าไม่พบผิวสัมผัส การคำนวณก็จะข้ามไปที่การปรับตำแหน่งของและรูปร่างของแบบจำลอง (Update displacements and new geometry) จากนั้นโปรแกรมจะเขียนข้อมูลที่ได้ออกไปที่หน่วยความจำ ก่อนที่จะปรับเวลาขณะคำนวณ (Update current time) และตรวจสอบการสิ้นสุดของเวลาที่คำนวณ (Check for terminations) ถ้ายังไม่ถึงกำหนดเวลาสิ้นสุดการคำนวณ โปรแกรมจะกลับไปเริ่มต้นคำนวณใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก แต่ถ้าถึงเวลาสิ้นสุดที่กำหนดไว้ การคำนวณก็จะสิ้นสุดลง

ในการตรวจสอบผิวสัมผัส ถ้าพบผิวสัมผัส โปรแกรมก็จะคำนวณโดยใช้ความสมดุลพลังงานของระบบ (Energy balance) พลังงานเริ่มต้นซึ่งเป็นพลังงานจลน์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือพลังงานอีลาสติกของความเครียดที่เกิดจากการเสียรูปของวัสดุ พลังงานการไถล (Sliding energy) ที่เกิดจากสัมผัสของผิวส่วนประกอบในแบบจำลอง และพลังงานความเครียดเทียม (Hourglass energy) เพื่อรักษาการเสียรูปของวัสดุไม่ให้มากเกินไป และสำหรับปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้ สมการที่ 3.12 ลดรูปเหลือ สมการที่ 3.13

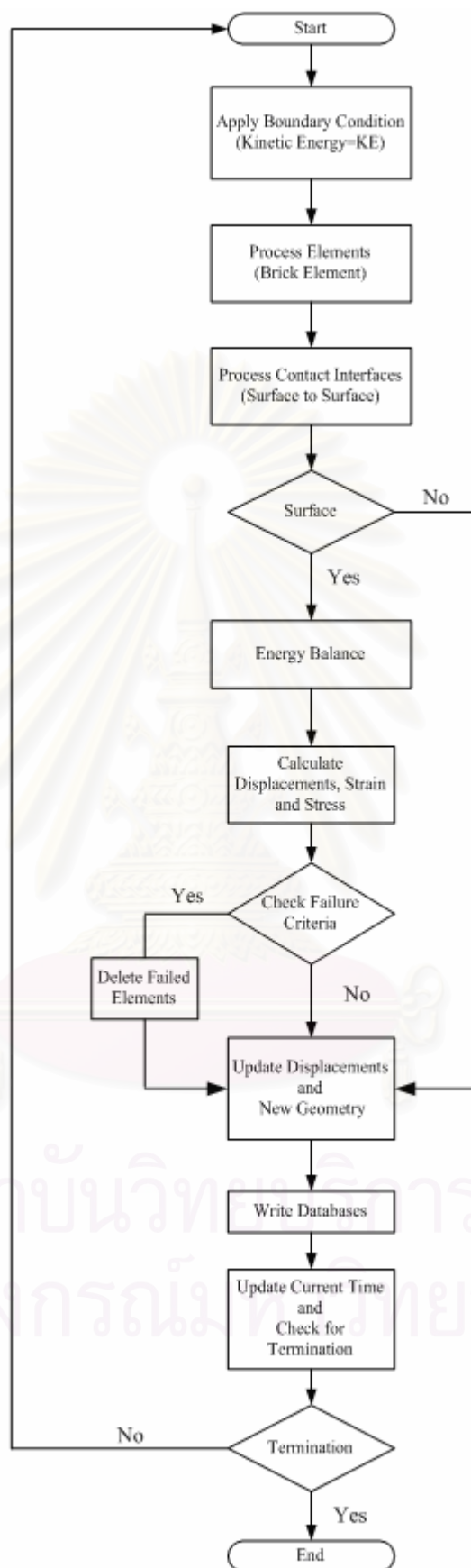
$$E_{kin}^o = E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{hg} = E_{total} \quad (3.13)$$

การคำนวณระยะยืดจะคำนวณจากตำแหน่งของจุดต่อในเอลิเมนต์ที่เคลื่อนเข้ามาสัมผัส ในที่นี้ได้แก่ กระสุนซึ่งเป็นผิวสัมผัสหลัก จากนั้นจะคำนวณระยะเคลื่อนตัวของผิวสัมผัสรอง นำมาคำนวณความเครียด และความเค้น โดยผ่านทาง Stiffness matrix จากค่าอีลาสติกต่างๆ คือ

มอดูลีความยืดหยุ่น, อัตราส่วนปิวของและค่ามอดูลีความเค้นเฉือน ที่เป็นคุณสมบัติของวัสดุใน  
เอลิเมนต์ที่ถูกสัมผัสในที่นี่ได้แก่ แผ่นเป่าหมาย ความเค้นที่ได้จะนำมาตรวจสอบหลักความเสียหาย  
ที่กำหนดค่าไว้ในที่นี่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 และ 59 ซึ่งถ้าถึงค่าตามหลักความเสียหายที่กำหนดไว้  
เอลิเมนต์นั้นๆ จะเกิดการเสียหายและจะถูกกลบออกไปจากแบบจำลอง (เฉพาะแบบวัสดุชนิดที่ 59)  
เมื่อเอลิเมนต์รอบๆ จุดต่อทุกเอลิเมนต์ถูกลบไปทั้งหมด จุดต่ออื่นๆ ก็จะถูกกลบออกจากแบบจำลอง  
เช่นกัน แต่ถ้าตรวจสอบแล้วค่าความเสียหายไม่ถึงค่าที่กำหนดไว้ เอลิเมนต์นั้นๆ จะไม่เสียหาย เมื่อ  
ผ่านการตรวจสอบหลักความเสียหายเหล่านี้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการปรับตำแหน่งและรูปร่าง  
ของแบบจำลองเหมือนกับขั้นตอนการตรวจสอบที่ไม่พบผิวสัมผัสดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้า โดย  
รูปแผนผังการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 (John, 2005)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แผนผังการคำนวณของโปรแกรม (Flow chart)

### 3.3 ข้อควรระวังในการจำลองแบบ

การจำลองแบบทางด้านการเคลื่อนที่ (Dynamic simulation) นั้น มีปัจจัยหลายอย่างในการทำให้ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนหรือถูกต้อง ซึ่งปัจจัยหลักๆ ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ ได้แก่ คลื่นความเค้น และ Courant number โดยสามารถแยกอธิบายได้ดังนี้

#### 3.3.1 คลื่นความเค้น (Stress wave)

ในปัญหาทางด้านพลศาสตร์การกระแทก (Impact dynamic) จะมีการเคลื่อนที่ของคลื่นความเค้นไปในตัวกลาง เช่นเดียวกับการเกิดคลื่นในของไหลแต่จะมีความเร็วสูงกว่ามาก ดังตัวอย่างเช่น เมื่อเรือไปเจอกับการระเบิดใต้น้ำจะทำให้เกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) เคลื่อนไปในน้ำด้วยความเร็วประมาณ 1,500 เมตร/วินาที (Siribodhi *et al.*, 2003) เมื่อคลื่นมากระทบกับตัวเรือแล้วจะเกิดการส่งผ่านพลังงานมายังตัวเรือซึ่งเป็นโลหะโดยความเร็วของคลื่นความเค้นในโลหะจะมีค่าสูงถึง 5,000 เมตรต่อวินาที จากการที่คลื่นความเค้นสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วยังทำให้เกิดการสะท้อนและการรวมตัวของคลื่นความเค้นซึ่งมีความซับซ้อนและมีอิทธิพลต่อการจำลองทางพลวัต ยิ่งรูปร่างของวัสดุที่ถูกคลื่นความเค้นมีความซับซ้อนหรือไม่เหมาะสมยิ่งทำให้การรวมตัวและสะท้อนของคลื่นความเค้นเกิดขึ้นสูง ดังนั้น ในการจำลองแบบการปะทะทางจิปเนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง และมีการเคลื่อนที่ของคลื่นความเค้นจากการปะทะของกระสุน ถ้าแผ่นเป้าหมายมีรูปร่างหรือขนาดที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดการสะท้อนและรวมตัวของคลื่นความเค้นทำให้ผลการคำนวณคลื่นความเค้นที่ออกมามีความซับซ้อนมากขึ้น

ความเร็วคลื่นตามยาว (Longitudinal wave speed) ในตัวกลางแต่ละชนิดนั้นมีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางนั้นๆ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \text{ หรือ } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ เมื่อ } \nu = 0 \quad (3.14)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วของคลื่นความเค้นในตัวกลาง (Stress wave speed)  $E$  คือ ค่ายังมอดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus)  $\nu$  คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio)

### 3.3.2 Courant number

การคำนวณทางพลศาสตร์ ซึ่งขึ้นกับเวลานั้น คลื่นความเค้น (Stress wave) ในวัสดุมีความสำคัญ (Vanichayangkuranont *et al.*, 2005) เนื่องจากคลื่นความเค้นในวัสดุที่เป็นของแข็งส่วนมาก มีความเร็วสูงกว่าคลื่นเสียงในอากาศมาก

การที่จะจำลองคลื่นความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุได้แม่นยำนั้นจำเป็นต้องใช้การเพิ่มของเวลาที่ใช้คำนวณ (Step time increment) ที่มีค่าน้อยเพียงพอโดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาการเพิ่มของเวลาที่ใช้คำนวณ ได้แก่ Courant number (Co) ซึ่งก็คือ เศษส่วนของขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดที่คลื่นความเค้นเคลื่อนที่ได้ใน 1 Step time แสดงได้ดังสมการ

$$Co = \frac{C\Delta t}{\Delta x} \quad (3.15)$$

โดย  $C$  คือ ความเร็วของคลื่นความเค้นในตัวกลาง (Stress wave speed)  $\Delta t$  คือ การเพิ่มของเวลาที่ใช้คำนวณ (Step time increment) และ  $\Delta x$  คือขนาดของ เอลิเมนต์ ที่เล็กที่สุด

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ทำให้ทราบถึงประเภทของวัสดุคอมพิวเตอร์ชนิดต่างๆ รวมทั้งตัวแปรจากสมการโครงสร้าง และหลักความเสียหาย ของวัสดุคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม LS-DYNA ที่มีความสำคัญในการจำลองทางชิปนาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งข้อจำกัดและสมมูลพลังงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบการจำลองแบบการกระแทกทางชิปนา เพื่อเป็นพื้นฐานทฤษฎีรองรับการจำลองในบทที่จะกล่าวต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### การจำลองต้นแบบ

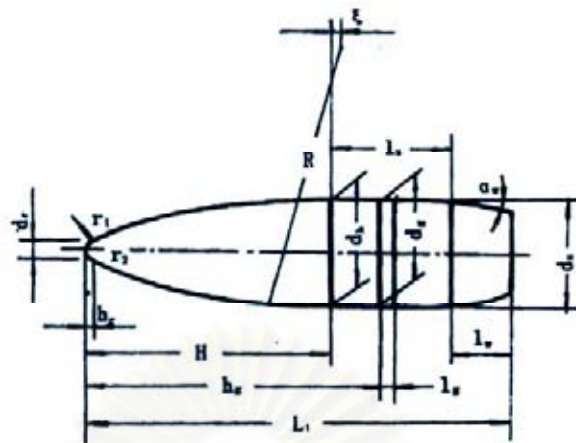
ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม LS-DYNA ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบในการจำลอง โดยต้นแบบการจำลองนี้ได้เทียบผลกับการทดลองของ Gu and Xu (2004) และ Gu and Li (2005) เนื่องจากมีรูปแบบและชนิดของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งลักษณะการจำลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

ส่วนที่สำคัญในบทนี้ ประกอบไปด้วยรายละเอียดของแบบการจำลองเริ่มต้น และผลการจำลองเริ่มต้นซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องและเหมาะสมกับผลการทดลองและผลการจำลองของ Gu and Xu (2004) โดยได้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของแบบจำลองเริ่มต้นมากน้อยเพียงใด ทั้งได้มีการเลือกแบบของวัสดุชนิดใหม่ในโปรแกรม LS-DYNA ที่มีความเหมาะสมมากกว่า เพื่อใช้เป็นแบบจำลองต้นแบบ โดยนำผลการจำลองใหม่ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) และผลการจำลองเริ่มต้น นอกจากนี้แล้วยังได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองต้นแบบกับผลการทดลองและการจำลองแบบ Microstructure ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นด้านคอมพอสิตของ Gu and Li (2005)

#### 4.1 แบบจำลองเริ่มต้น

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ซึ่งแบบจำลองได้สร้างโดยใช้รูปร่างลักษณะ ขนาดแบบจำลอง (Geometry) และคุณสมบัติของวัสดุตามแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) ซึ่งแบบจำลองประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ ส่วนหัวกระสุน และส่วนของแผ่นเป้าหมาย โดยกระสุนมีคุณสมบัติเป็นเหล็กมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกรวยเรียวยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 มิลลิเมตร และยาว 26.8 มิลลิเมตร มีมวล 7.95 กรัม และความหนาแน่นเท่ากับ 7860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรุ่นที่ 56 จากมาตรฐานและผลิตโดยกองทัพสาธารณรัฐประชาชนจีน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การควบคุมความเร็วปะทะในการทดลองของ Gu and Xu (2004) ควบคุมโดยการปรับน้ำหนักของดินปืนในลูกกระสุน ซึ่งจะวัดความเร็วปะทะและความเร็วตกค้างของกระสุนโดยใช้เลเซอร์แบบไดโอดคู่

เนื่องจากผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) กระสุนมีการเสียรูปน้อยมาก ในแบบจำลองจึงกำหนดให้กระสุนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) หรือใช้แบบวัสดุชนิดที่ 20 (Mat 20) ในโปรแกรม LS-DYNA สำหรับกระสุน และเอลิเมนต์ใช้แบบ 6 หน้า 8 จุดต่อ (8-nodes hexahedron) โดยความเร็วเริ่มต้นกำหนดตามความเร็วกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายจากการทดลอง



Parameters of projectile profile

R (mm)	40	$h_1$ (mm)	0.25
$\xi$ (mm)	0	$h_2$ (mm)	16.60 <sub>-0.30</sub>
R (mm)	1.5	$l_w$ (mm)	3.7 <sup>+0.6</sup>
$r_1$ (mm)	0.35	$L_1$ (mm)	26.8 <sub>-0.52</sub>
$d_r$ (mm)	1.45 <sub>-0.30</sub>	$\alpha_n$ (°)	9
$d_h$ (mm)	7.87 <sub>-0.05</sub>	H (mm)	11.99
$d_g$ (mm)	7.82 <sub>-0.15</sub>	$l_g$ (mm)	Obliquity: 5
$d_z$ (mm)	7.92 <sub>-0.05</sub>		

รูปที่ 4.1 ลักษณะและขนาดของหัวกระสุนที่ใช้ในการจำลอง (Gu and Xu, 2004)

แผ่นเป้าหมายมีขนาดกว้าง 45 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร ใช้ไฟเบอร์ Twaron® ชนิด CT1000, 3360 dtex/2000f ผลิตโดยบริษัท Akzo Nobel ซึ่งเป็นไฟเบอร์แบบ Polyaramid (Polyparaphenylene terephthalamide, PPTA) มีคุณสมบัติคล้าย Kevlar® ที่ผลิตโดยบริษัท Du Pont และเมตริกที่ใช้ชนิดอีพอกซี

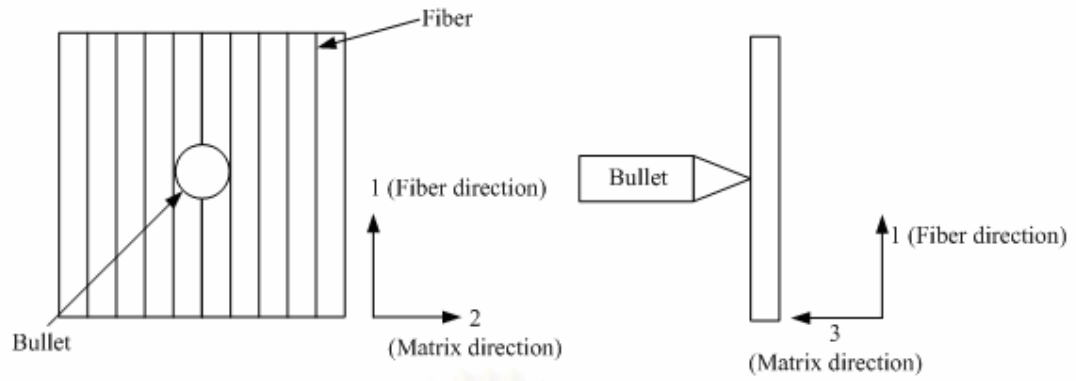
การจำลองใช้ชนิดของวัสดุแบบ Composite damage model หรือ วัสดุชนิดที่ 22 ในโปรแกรม LS-DYNA โดยใช้คุณสมบัติของ Twaron®/epoxy คุณสมบัติของคอมพอสิตถูกคำนวณโดยใช้กฎของส่วนผสม (Rule of Mixture) ซึ่งไฟเบอร์ถูกพิจารณาให้เป็นวัสดุแบบ Transversely isotropic มีคุณสมบัติแบบ Elastic ส่วนเมตริกถูกพิจารณาให้เป็น Isotropic material ซึ่งการจำลองในที่นี้กำหนดให้แผ่นเป้าหมายเป็นแบบคอมพอสิตความแข็งแรงทิศทางเดียว (Unidirectional) โดยผลการคำนวณคุณสมบัติของวัสดุ แสดงดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแผ่นเป่าหมายซึ่งเป็นวัสดุคอมพอสิต (Gu and Xu, 2004)

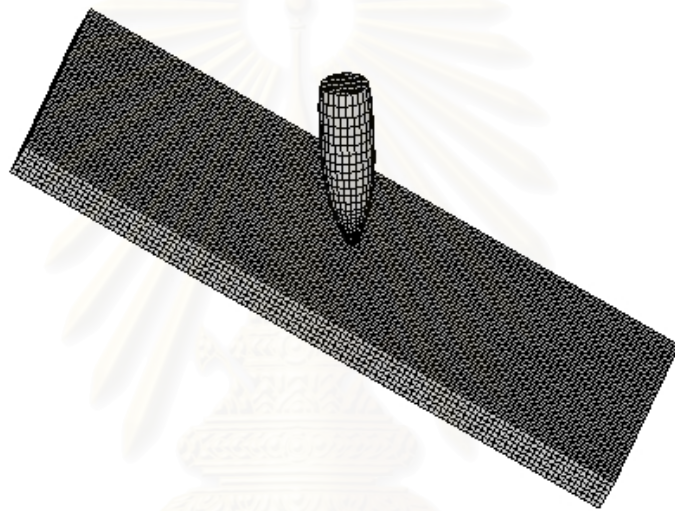
คุณสมบัติ	ค่า
$E_1$ (Young's modulus-Longitudinal direction), GPa	20.44
$E_2$ (Young's modulus-Transverse direction), GPa	8.9
$E_3$ (Young's modulus-Normal direction), GPa	8.9
$\nu_{21}$ (Poisson's ratio 21)	0.31
$\nu_{31}$ (Poisson's ratio 31)	0.31
$\nu_{32}$ (Poisson's ratio 32)	0.49
$G_{12}$ (Shear modulus12), GPa	1.64
$G_{23}$ (Shear modulus23), GPa	3.03
$G_{31}$ (Shear modulus31), GPa	1.64
$T_1$ (Longitudinal tensile strength), GPa	1.145
$T_2$ (Transverse tensile strength), GPa	0.13
$C_2$ (Transverse compressive strength), GPa	0.65
$S_{12}$ (In plane shear strength), GPa	0.39
$\rho$ (Mass density), kg/m <sup>3</sup>	1230

แผ่นเป่าหมายใช้เอลิเมนต์แบบ 6 หน้า 8 จุดต่อ โดยทั้งแบบจำลองใช้เอลิเมนต์จำนวน 40,475 เอลิเมนต์ และ 48,580 จุดต่อ ในขณะที่ Gu and Xu (2004) ใช้ 37,728 เอลิเมนต์ และ 46,950 จุดต่อ ซึ่งการสร้างแบบจำลองในที่นี้ได้กำหนดให้เอลิเมนต์ของกระสุนมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นเพื่อลดปัญหาเรื่องผิวสัมผัสบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง โดยในแบบจำลองกำหนดให้ทิศทางที่ 1 และ 2 เป็นทิศทางในแนวระนาบของแผ่นเป่าหมายโดยทิศทางที่ 1 เป็นทิศทางของไฟเบอร์ ทิศทางที่ 2 เป็นทิศทางของเมตริก และทิศทางที่ 3 เป็นทิศทางด้านความหนาและเป็นทิศทางของเมตริกด้วย ซึ่งลักษณะการวางตัวของไฟเบอร์แสดงดังในรูปที่ 4.2 โดยในแบบจำลองเริ่มต้นได้กำหนดให้แผ่นเป่าหมายถูกตรึงรอบขอบ วางเอียงทำมุม 30 องศากับแนวตั้ง แสดงดังในรูปที่ 4.3 และแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) แสดงดังรูปที่ 4.4

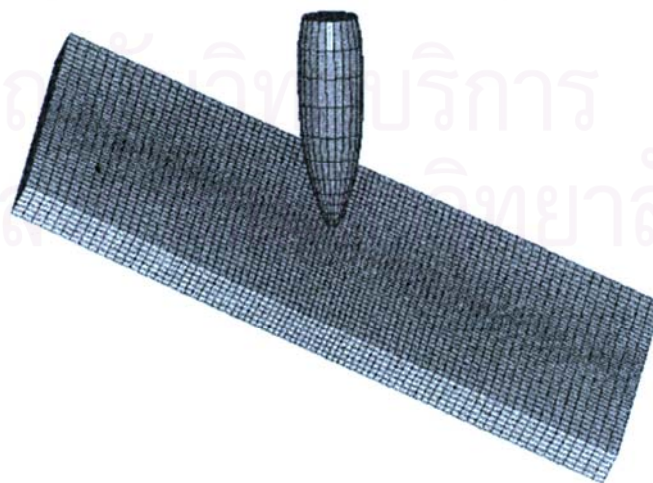
การจำลองไม่พิจารณาถึงพลังงานความร้อนรวมทั้งพลังงานการสูญเสียอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลองจริง เนื่องจากพลังงานความร้อนและพลังงานการสูญเสียอื่นๆ เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานการเสียรูปของแผ่นเป่าหมาย รวมทั้งเพื่อความเหมาะสม ลดความซับซ้อนและข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลอง



รูปที่ 4.2 ทิศทางของไฟเบอร์และเมทริกในแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว

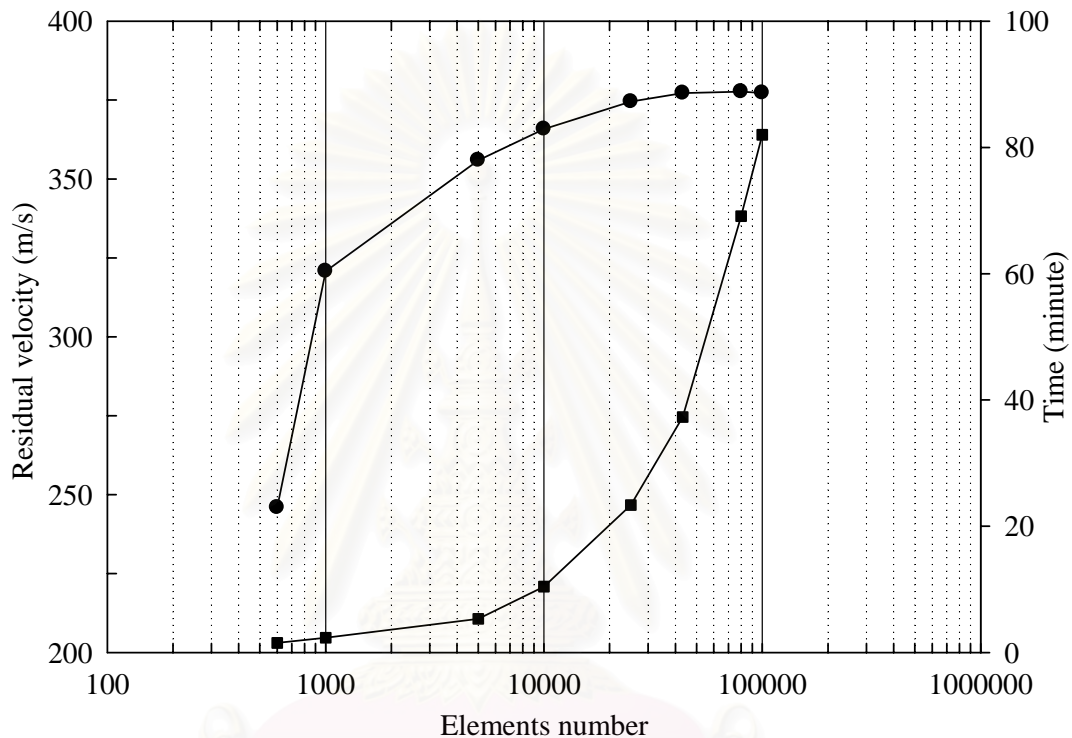


รูปที่ 4.3 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh ของแบบจำลองเริ่มต้น



รูปที่ 4.4 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh ของแบบจำลองของ Gu and Xu (2004)

ในที่นี้ได้ตรวจสอบความคงที่ของกริดโดยพิจารณาความเร็วตกค้างของกระสุนจากความเร็วที่ปะทะ 390 เมตรต่อวินาที ซึ่งแกนนอนเป็นการแสดงกราฟแบบลอการิทึมของจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 500 เอลิเมนต์ จนถึง 100,000 เอลิเมนต์ โดยแกนตั้งทางด้านซ้ายเป็นความเร็วตกค้างของกระสุน และแกนตั้งทางด้านขวาเป็นเวลาที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ กับจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่เอลิเมนต์จำนวนประมาณ 500 เอลิเมนต์ ถึงประมาณ 25,000 เอลิเมนต์ ความเร็วตกค้างของกระสุนหลังจากทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น เป็นสัดส่วนกับจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ที่เอลิเมนต์ประมาณ 40,000 80,000 และ 100,000 เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าความเร็วของกระสุนเริ่มมีค่าคงที่ ที่ประมาณ 377 เมตรต่อวินาที โดยที่ประมาณ 40,000 เอลิเมนต์ ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 40 นาที แต่ที่ 80,000 และ 100,000 เอลิเมนต์ ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 70 นาที และ 80 นาที ดังนั้นในที่นี้จึงได้เลือกใช้เอลิเมนต์ที่ ประมาณ 40,000 เอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดของเอลิเมนต์ คือ  $0.0833 \times 0.0833 \times 0.075$  ลูกบาศก์เซนติเมตร



#### 4.2 ผลการจำลองแบบเริ่มต้นและการเปรียบเทียบ

การจำลองต้นแบบเป็นเพียงการจำลองของชั้น Laminar หนึ่งในสี่ชั้นของ Laminate ในการทดลองจริง ซึ่งใช้ชั้นของ Laminar ถึงสี่ชั้น เนื่องจาก Gu and Xu (2004) ได้สมมติให้ Laminar หนึ่งชั้นรับพลังงานการกระแทกหนึ่งในสี่ของพลังงานทั้งหมดที่แผ่นเป้าหมายรองรับ หรือพลังงานจลน์ของกระสุนถูกที่ดูดซับมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ของชั้น Laminar ทั้งสี่ชั้นดูดซับ โดยกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการที่ 4.1 ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าการทดลองจากการจำลอง ทั้งนี้เพื่อลดขนาดของหน่วยความจำสำรอง (Ram) ในการคำนวณและระยะเวลาการคำนวณ เป็นการลดขนาดของปัญหา

$$\frac{1}{2}m(v_i^2 - v_r^2) = 4 \times \frac{1}{2}m(v_i^2 - v_{1/4r}^2) \quad (4.1)$$

หรือ

$$v_r = \sqrt{4v_{1/4r}^2 - 3v_i^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $v_i$  คือ ความเร็วปะทะของหัวกระสุน  $v_r$  คือ ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ผ่าน Laminate และ  $v_{1/4r}$  คือ ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ผ่าน Laminar ชั้นเดียว

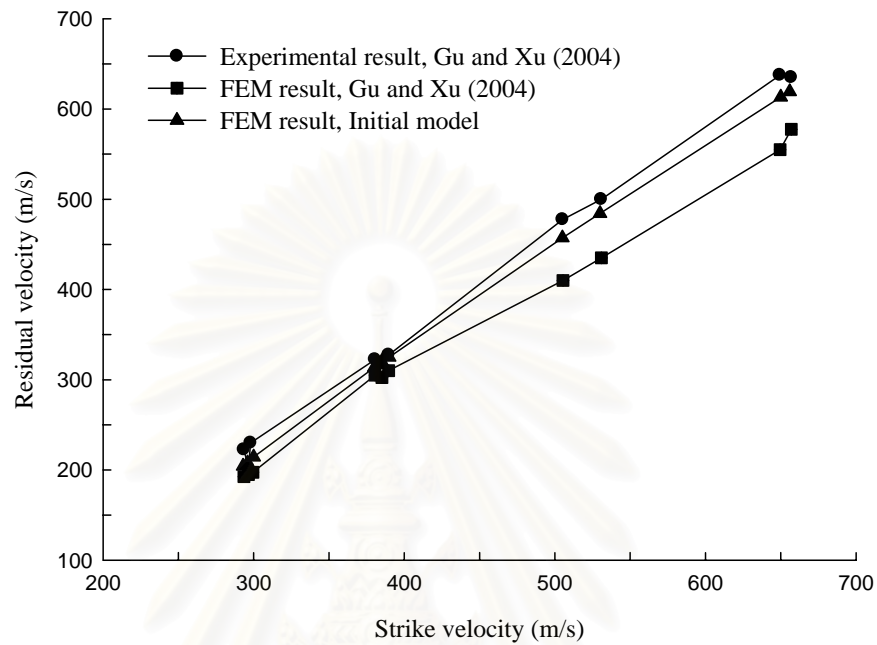
โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วขณะการแทงทะลุผ่านของกระสุน หรือความเร็วตกค้างหลังจากกระสุนทะลุผ่าน คำนวณจากสมการที่ 4.3

$$\frac{V_{\text{Initial model}} - V_{\text{Gu\&Xu(2004)}}}{V_{\text{Gu\&Xu(2004)}}} \times 100 \quad (4.3)$$

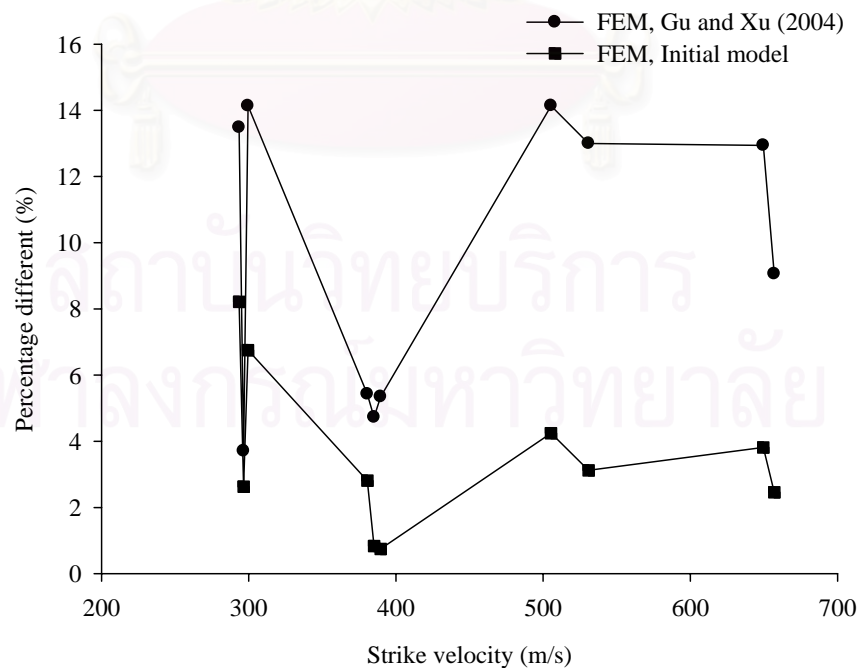
เมื่อ  $V_{\text{Initial model}}$  คือ ความเร็วของกระสุนในแบบจำลองเริ่มต้นไม่ว่าจะเป็นความเร็ว ณ เวลาต่างๆ หรือความเร็วปลายหลังจากกระสุนแทงทะลุผ่าน,  $V_{\text{Gu\&Xu(2004)}}$  คือ ความเร็วกระสุนของ Gu and Xu (2004) ซึ่งอาจเป็นความเร็วตกค้างจากผลการทดลอง หรือความเร็วกระสุน ณ เวลาต่างๆ หรือความเร็วตกค้างหลังกระสุนทะลุผ่านจากผลการจำลอง ตามแต่กรณีการเปรียบเทียบ

ความเร็วตกค้างของกระสุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 และการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบเริ่มต้นกับการทดลองและจำลองของ Gu and Xu (2004) แสดงดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งผลการจำลองเริ่มต้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลการจำลองของ Gu and Xu (2004) โดยที่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับผลการทดลอง คำนวณจากสมการที่ 4.3 เฉลี่ยประมาณ 4

เปอร์เซ็นต์ และสูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การจำลองของ Gu and Xu (2004) ให้ค่าความแตกต่างกับผลการทดลอง เฉลี่ยที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุดไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความแตกต่างเปรียบเทียบที่ความเร็วต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7

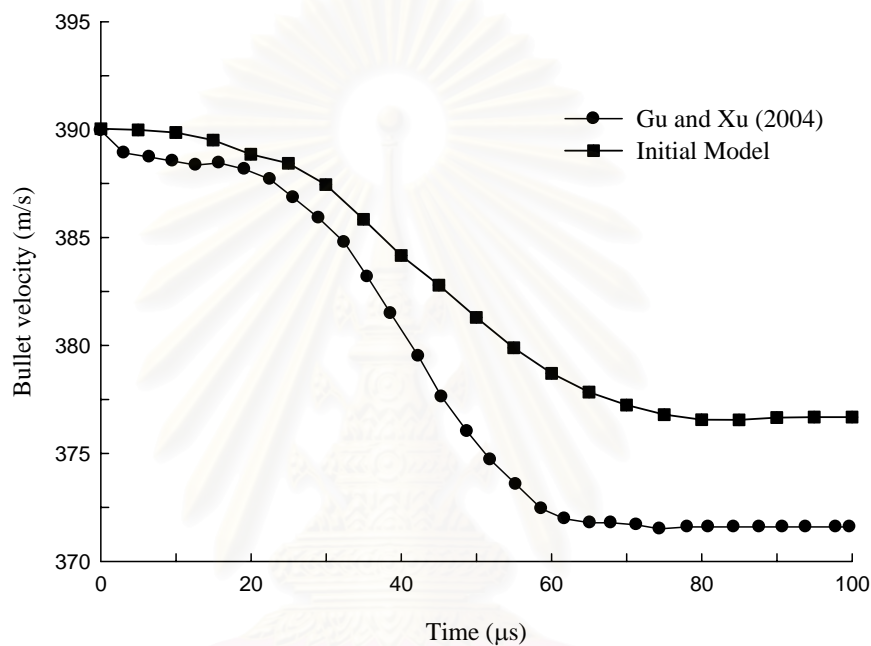


รูปที่ 4.6 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองเริ่มต้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองและการจำลองของ Gu and Xu (2004)



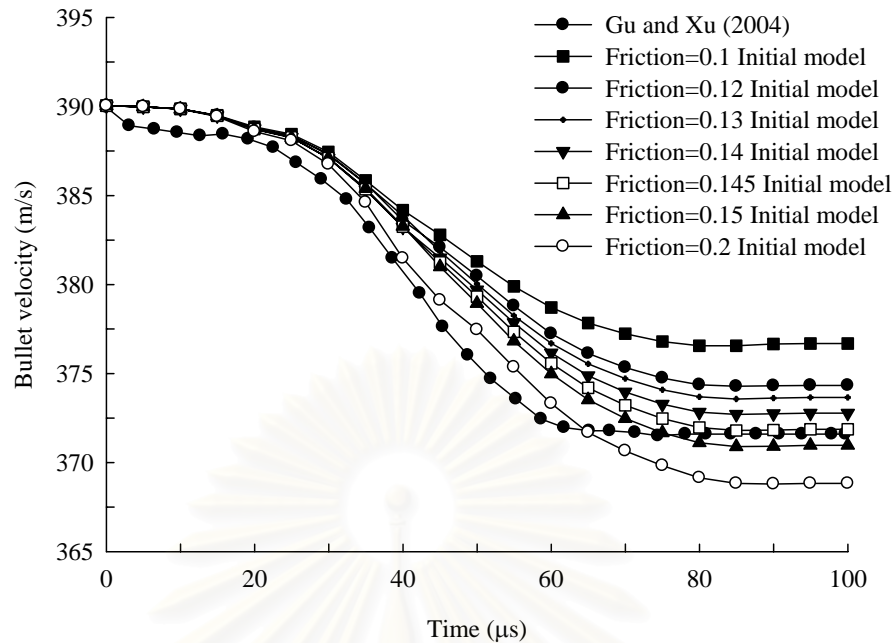
รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการจำลองแบบเริ่มต้น กับแบบจำลองและผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ

การเปรียบเทียบผลการจำลองเริ่มต้นกับแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) แสดงโดยรูป ความเร็วของกระสุนที่ลดลงขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูป ถ้าพิจารณาความเร็วดกต่างช่วงแรกที่กระสุนเพิ่งเริ่มแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายจะเห็นได้ว่า ลักษณะของเส้นกราฟจะมีความใกล้เคียงกันกับ Gu and Xu (2004) และเมื่อพิจารณาเฉพาะความเร็วดกต่างหลังจากที่หัวกระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายไปแล้ว ความเร็วดกต่างของแบบจำลองเริ่มต้นมีค่าสูงกว่าแบบจำลองของ Gu and Xu (2004)



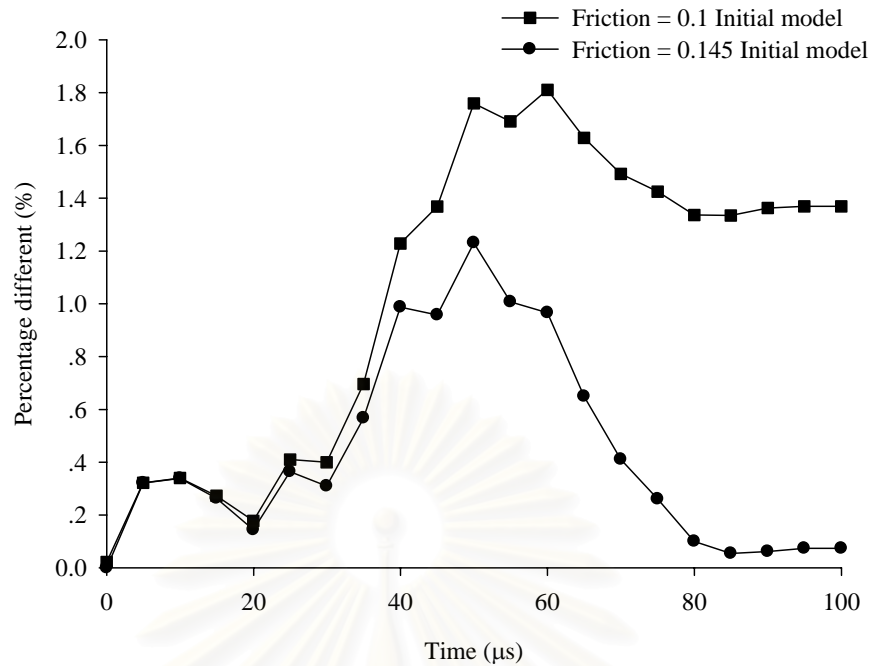
รูปที่ 4.8 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที

สาเหตุที่ทำให้การจำลองเริ่มต้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลการจำลอง Gu and Xu (2004) เนื่องมาจากการสร้างแบบจำลองที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่ไม่เหมือนกัน หรือการจำลองเริ่มต้นได้กำหนดให้จำนวนเอลิเมนต์ของกระสุนมีขนาดเล็กกว่า เพื่อให้ส่วนโค้งของกระสุนมีความละเอียดมากขึ้นลดปัญหาด้านผิวสัมผัส หรือแม้กระทั่งการกำหนดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของกระสุนกับแผ่นเป้าหมายซึ่ง Gu and Xu (2004) ไม่ได้แสดงไว้อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อลองปรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานให้มากขึ้นเพื่อจะให้ได้ค่าความเร็วดกต่างใกล้เคียงกับผลการจำลองของ Gu and Xu (2004) ปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใกล้ที่สุด คือ 0.145 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ดังนี้ จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ทำให้ผลการจำลองเริ่มต้นแตกต่างกับแบบจำลองของ Gu and Xu (2004)



รูปที่ 4.9 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาทีโดยเปรียบเทียบที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่าต่างๆ

อย่างไรก็ตามในที่นี้ได้เลือกใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.1 เป็นแบบจำลองเริ่มต้น เนื่องจากให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) มากกว่าการใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.145 หรือมากกว่าผลการจำลองของ Gu and Xu (2004) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างในแบบจำลองเริ่มต้นที่ใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.1 และ 0.145 กับผลการจำลองของ Gu and Xu (2004) แสดงดังในรูปที่ 4.10 ทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้ยังเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ โดยในที่นี้สามารถทำนายค่าเพื่อให้ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองได้จากผลการจำลองในแบบจำลองเริ่มต้นดังกล่าว

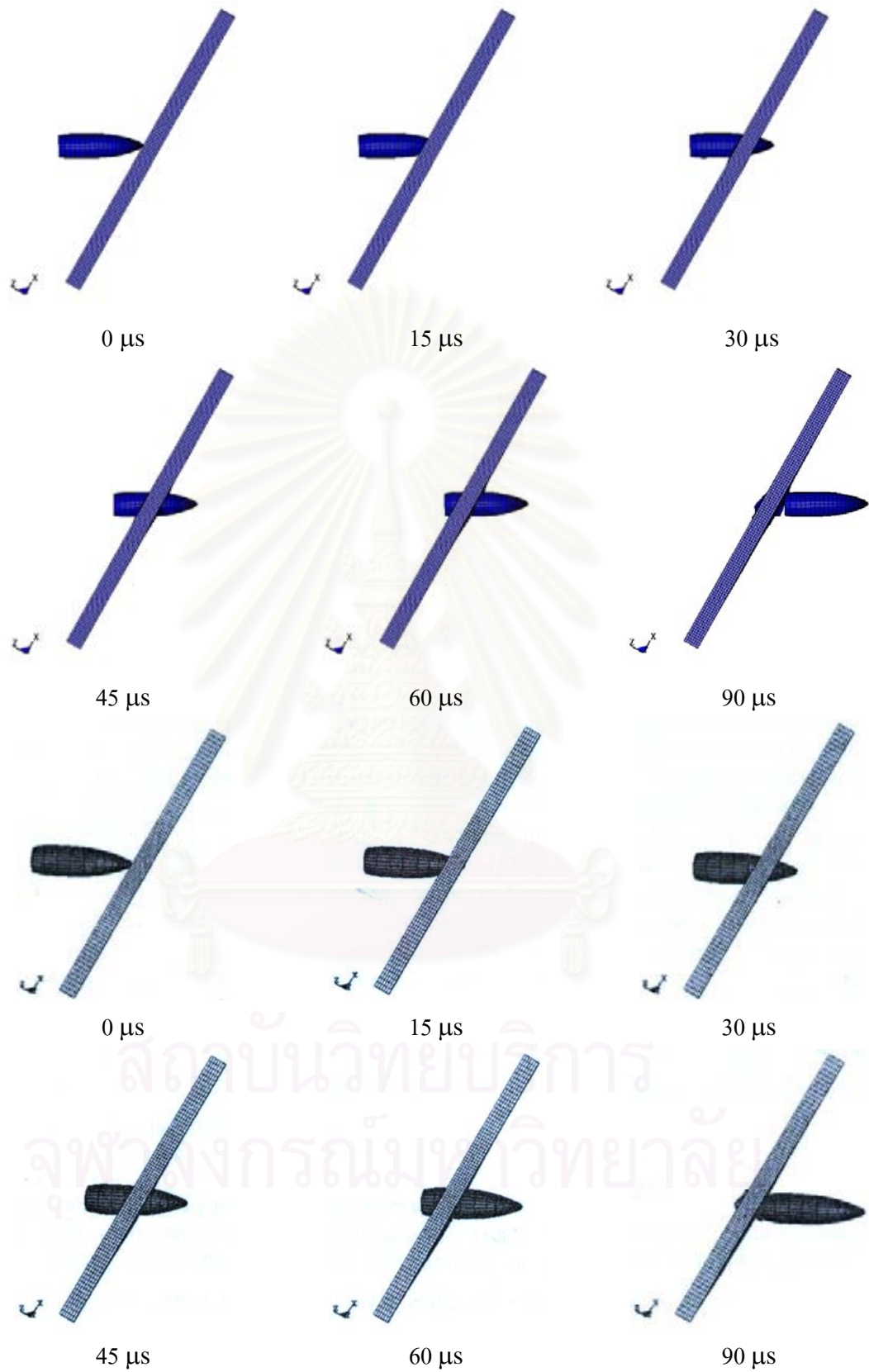


รูปที่ 4.10 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) กับแบบจำลองเริ่มต้น

จากรูปจะเห็นได้ว่า เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของแบบจำลองเริ่มต้นที่ใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.1 กับแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) มีค่าสูงสุดไม่เกิน 2 เปรอ์เซ็นต์ บริเวณก่อนช่วงที่กระสุนจะมีความเร็วคงที่และหลุดออกจากแผ่นเป้าหมาย และที่คล้ายกันกับแบบจำลองซึ่งใช้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.145 แต่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุดไม่เกิน 1.5 เปรอ์เซ็นต์ และที่ความเร็วหลังกระสุนทะลุผ่าน เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างไม่เกิน 0.2 เปรอ์เซ็นต์

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการแทงทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ของแบบจำลองเริ่มต้นกับแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) สามารถแสดงได้อย่างชัดเจนว่าผลการจำลองมีความใกล้เคียงกัน

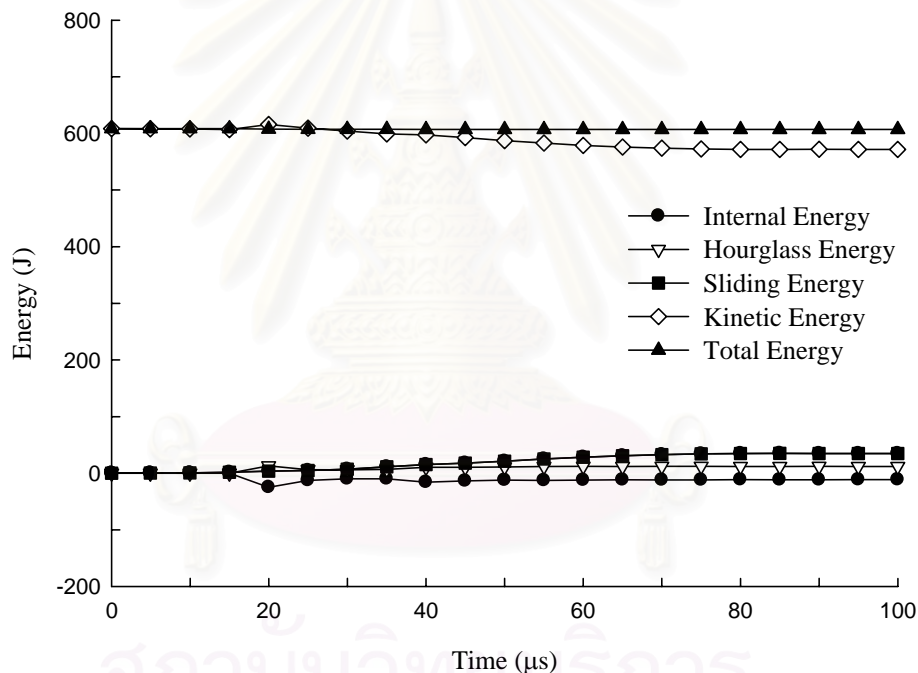




รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ของแบบจำลองเริ่มต้น (บน) กับ Gu and Xu (2004) (ล่าง) ที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที

### 4.3 ความเหมาะสมของแบบจำลองเริ่มต้น

ถ้าพิจารณาแค่เพียงความเร็วตกค้างและรูปการแทงทะลุผ่านของกระสุน ณ.เวลาต่างๆ จากที่ได้กล่าวและแสดงมาแล้วนั้น จะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันกับผลการทดลองและการจำลองของ Gu and Xu (2004) แล้ว แต่ถ้าจะพิจารณาถึงความถูกต้องของแบบจำลองเริ่มต้นในการคำนวณในเชิงหลักของการคำนวณทางตัวเลขและวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการพิจารณาถึงพลังงานของระบบระหว่างการคำนวณแล้ว ปรากฏว่าพลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายที่เกิดขึ้นไม่น่าจะเป็นไปได้ กล่าวคือ พลังงานภายในหรือพลังงานความเครียดจากการเสียรูปของวัสดุ (Strain Energy) ของแผ่นเป้าหมายขณะกระสุนแทงทะลุผ่านมีค่าเป็นลบทั้งพลังงานการไถล (Sliding Energy) มีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 4.12 แม้ว่าพลังงานรวมของระบบจะมีค่าคงที่และพลังงานจลน์จะมีค่าลดลงตามการลดลงของความเร็วกระสุนก็ตาม



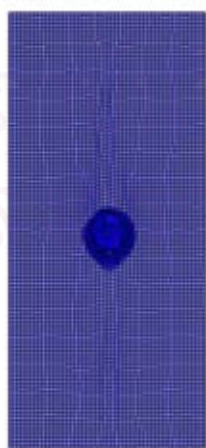
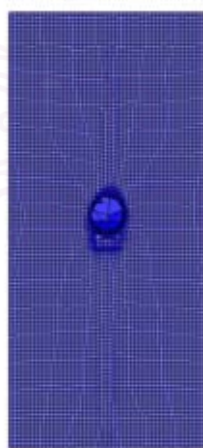
รูปที่ 4.12 พลังงานรวมทั้งระบบขณะกระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าพลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายมีค่าเป็นลบ แม้จะมีค่าที่เป็นลบน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานรวมของทั้งระบบแต่ไม่น่าจะถูกต้อง ซึ่งพลังงานที่เป็นลบเนื่องจากการที่แบบวัสดุชนิดที่ 22 ไม่มีหลักการลบเอลิเมนต์ เมื่อกระสุนวิ่งเข้าปะทะแผ่นเป้าหมาย เอลิเมนต์บริเวณที่โดนปะทะจะเกิดความเค้นสูงมากจนถึงหลักความเสียหายที่กำหนดไว้ แต่เอลิเมนต์ที่เสียหายแล้วกลับไม่ถูกลบจากแบบจำลอง ทำให้กระสุนเคลื่อนที่ผ่านเกิดความเสียหายขึ้นสูง พลังงานการไถลจึงเกิดขึ้นสูงมาก จากเดิมพลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายที่ควรจะเป็นบวก เพื่อ

รักษาพลังงานของระบบให้สมดุล กลับกลายต้องเป็นลบจากเหตุผลดังกล่าว และสังเกตได้ว่า พลังงานความเครียดเทียม (Hourglass Energy) จะมีลักษณะที่คล้ายกับพลังงานภายในเพียงแต่เป็นส่วนกลับบวกลบเท่านั้น ซึ่งนั่นหมายความว่า ขณะคำนวณตัวโปรแกรมพยายามสร้างพลังงานความเครียดเทียมขึ้นมาชดเชย พลังงานภายในของแผ่นเป่าหมายที่เป็นลบจากการคำนวณที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากการใช้รูปแบบของวัสดุที่ไม่เหมาะสม เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณโดยรักษาสมดุลของพลังงานรวมทั้งระบบต่อไปได้ โดยที่พลังงานรวมทั้งระบบมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ และพลังงานจลน์ของกระสุนลดลงเป็นลำดับ

จากลักษณะพื้นฐานของปัญหาการกระแทกเช่นนี้ พลังงานภายในของแผ่นเป่าหมายควรมีค่าเป็นบวกขณะรับแรงกระแทกและแทงทะลุผ่านของกระสุน เพราะได้รับการถ่ายเทพลังงานจลน์จากกระสุน และพลังงานการไหลควรจะมีค่าน้อย เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกระสุนกับแผ่นเป่าหมายเกิดขึ้นน้อย เมื่อเกิดการลอบเอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Gu and Xu (2004) ปรากฏว่า Gu and Xu (2004) ไม่ได้พิจารณาถึงพลังงานของระบบที่เกิดขึ้นระหว่างการคำนวณ (Gu, 2007)

นอกจากข้อพิสูจน์เรื่องพลังงานแล้ว ยังมีเรื่องของการลอบเอลิเมนต์ที่แผ่นเป่าหมายบริเวณที่โคนปะทะอีก ซึ่งในแบบวัสดุชนิดที่ 22 หรือ Chang-Chang Model ในโปรแกรม LS-DYNA ไม่มีหลักของการลอบเอลิเมนต์อย่างชัดเจนและแท้จริง ซึ่งในคู่มือและทฤษฎีของโปรแกรมไม่ได้อธิบายไว้อย่างชัดเจน โดยในที่นี้สามารถพิสูจน์จากผลการคำนวณว่า โปรแกรมไม่สามารถลอบเอลิเมนต์ที่เกิดความเสียหายเมื่อถึงหลักความเสียหายที่กำหนดไว้ได้จาก รูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงรูปด้านหน้าบริเวณและด้านหลังบริเวณที่กระสุนปะทะและทะลุผ่านไป จะเห็นได้ว่าบริเวณที่กระสุนปะทะ เอลิเมนต์ยังไม่ถูกลบไปจากแบบจำลอง

90  $\mu$ s ด้านหน้า90  $\mu$ s ด้านหลัง

รูปที่ 4.13 หลังการทะลุผ่านของกระสุน โดยที่เอลิเมนต์ไม่ถูกลบ (ไม่แสดงรูปกระสุน)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เพื่อเป็นข้อพิสูจน์ว่า แบบวัสดุชนิดที่ 22 ไม่มีความเหมาะสมที่เพียงพอกับการจำลองแบบสำหรับวัสดุแบบ Orthotropic ที่เป็นสามมิติมีความหนาและรับแรงกระทำที่ความเร็วสูง ทั้งนี้เป็นเพราะไม่มีหลักความเสียหายที่จะทำให้มีการลบเอลิเมนต์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีของแบบวัสดุชนิดนี้ จะเห็นได้ว่าไม่มีหลักความเสียหายในทิศทางที่สาม ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เป็นทิศทางความหนาของแผ่นคอมพอสิต ที่เป็นทิศทางหลักในการรับแรงปะทะ

#### 4.4 การเลือกแบบวัสดุสำหรับการจำลองต้นแบบ

เพื่อให้ได้แบบจำลองมีความถูกต้องและเหมาะสมมากกว่า ซึ่งจะใช้เป็นแบบการจำลองต้นแบบในการจำลอง เพื่อหาผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ต่อไป จึงจำเป็นต้องเลือกแบบของวัสดุชนิดใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการจำลองแบบสำหรับการรับแรงกระทำที่ความเร็วสูงของวัสดุแบบ Orthotropic ซึ่งจำลองแบบเป็นสามมิติ โดยตารางที่ 4.2 แสดงแบบวัสดุคอมพอสิตที่อยู่ในโปรแกรม LS-DYNA เปรียบเทียบลักษณะการใช้งานในการจำลองแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.2 แบบวัสดุคอมพอสิตที่อยู่ในโปรแกรม LS-DYNA เปรียบเทียบลักษณะการใช้งานในการจำลองแบบต่างๆ (John, 2005)

Material Model	Type of Elements	Failure	Element removable	3 Dimension
Mat 2 Orthotropic Elastic	Bricks, Shell	No	No	Yes
Mat 22 Composite Damage	Bricks, Shell	Yes	No	Yes
Mat 23 Temperature Dependent Orthotropic	Bricks, Shell	No	No	Yes
Mat 32 Laminated Glass	Shell	Yes	Yes	No
Mat 40 Nonlinear Orthotropic	Shell	Yes	Yes	No
Mat 54 Composite Damage with Change Failure	Shell	Yes	Yes	No
Mat 55 Composite Damage with Tsai -Wu Failure	Shell	Yes	Yes	No
Mat 58 Laminated Composite Fabric	Shell	No	No	No
Mat 59 Composite Failure	Bricks, Shell	Yes	Yes	Yes
Mat 103 Anisotropic Viscoplastic	Shell	No	No	No
Mat 116 Composite Layup	Shell	No	No	No
Mat 117 Composite Matrix	Shell	No	No	No
Mat 118 Composite Direct	Shell	No	No	No

จากแบบวัสดุในโปรแกรม LS-DYNA ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองวัสดุส่วนใหญ่รองรับการจำลองแบบคอมพอสิตที่เป็นแผ่นบาง (Shell element) กล่าวคือ การจำลองแบบที่ให้แผ่นคอมพอสิตรับแรงในแนวระนาบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุคอมพอสิต ที่ไม่มีการให้วัสดุรับแรงในทิศทางด้านความหนา

ส่วนแบบวัสดุซึ่งสามารถถอดแบบให้เป็น 3 มิติ รับแรงในทิศทางของความหนา มีหลักความเสียหายและมีการลบเอลิเมนต์ด้วยนั้น ถ้าไม่รวมแบบวัสดุชนิดที่ 22 ด้วยนั้น มีแบบวัสดุเพียง 1 ชนิดเท่านั้น คือ แบบวัสดุชนิดที่ 59 (Composite Failure Model) ซึ่งจากความไม่เหมาะสมในส่วนก่อนหน้าที่ไม่สามารถใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 สำหรับจำลองแบบเพื่อศึกษาพารามิเตอร์เชิงกลได้นั้น ดังนั้นในที่นี้จึงได้เลือกแบบวัสดุชนิดที่ 59 ที่สามารถถอดแบบให้แผ่นคอมพอสิตเป็น 3 มิติ มีความหนาและรับแรงในทิศทางของความหนาได้ จากหลักความเสียหายที่มีทั้งสามทิศทาง และเป็นหลักความเสียหายที่มีการนำความเสียหายในแต่ละทิศทางมาผสมกันคล้ายกับหลักความเสียหายของ Tsai and Wu ซึ่งเป็นหลักความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตโดยเฉพาะ โดยหลักความเสียหายนี้ยังคล้ายกับหลักของ Von Mises stress ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงรี แต่ได้ประยุกต์ให้เหมาะสมกับวัสดุแบบ Orthotropic สำหรับการจำลองแบบที่มีความเสียหายของวัสดุและมีการลบเอลิเมนต์ในโปรแกรม LS-DYNA มากขึ้น (Schweizerhof *et al.*, 1998; Sriram and Vaidya, 2006)

#### 4.5 การจำลองต้นแบบ

แบบจำลองใหม่ที่จะทำการจำลองต่อไปนี้ รูปร่างลักษณะภายนอกทุกอย่างเหมือนกับแบบจำลองเริ่มต้นทุกประการ ไม่ว่าจะเป็น จำนวนและชนิดของเอลิเมนต์ รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ยกเว้นเพียงแต่แบบวัสดุของแผ่นเป้าหมายซึ่งเป็นวัสดุคอมพอสิตจากเดิมที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 เปลี่ยนไปใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 แต่ยังคงใช้ค่าคุณสมบัติตามเดิม

อย่างไรก็ตามเนื่องจากแบบวัสดุชนิดที่ 59 มีหลักความเสียหายในทิศทางที่ 3 จึงต้องการคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุในทิศทางที่ 3 เพิ่มเติม แต่ค่าคุณสมบัติของ Gu and Xu (2004) มีเพียงแต่คุณสมบัติความแข็งแรงในแนวระนาบเท่านั้น ดังนั้นจึงได้กำหนดให้มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในทิศทางที่ 3 ซึ่งเป็นทิศทางด้านความหนาเพิ่มเติม ตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ความแข็งแรงดึงในทิศทางที่ 3 กำหนดให้เท่ากับความแข็งแรงดึงในทิศทางที่ 2 เนื่องจากการจำลองแบบกำหนดให้วัสดุเป็นคอมพอสิตแบบความแข็งแรงทิศทางเดียว ซึ่งทิศทางที่ 1 ได้กำหนดให้เป็นความแข็งแรงในทิศทางของไฟเบอร์ ดังนั้นทิศทางที่ 2 และทิศทางที่ 3 จึงเป็นทิศทางของเมตริกและควรมีค่าเท่ากัน



2. จากข้อมูลคุณสมบัติคอมพอสิตของ Gu and Xu (2004) ที่มีเพียงค่าความแข็งแรงอัดในทิศทางที่ 2 ซึ่งเป็นความแข็งแรงอัดในทางของเมตริก ดังนั้น ความแข็งแรงอัดในทิศทางที่ 3 ซึ่งเป็นทิศทางของเมตริก จึงกำหนดให้เท่ากับความแข็งแรงอัดในทิศทางที่ 2 คล้ายกับเหตุผลในข้อที่ 1

เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาให้รับแรงดึงในแนวระนาบ (แนวไฟเบอร์) ได้มากกว่าการรับแรงอัด การรับแรงอัดส่วนใหญ่ เมตริกจึงเป็นตัวรับแรงมากกว่าไฟเบอร์ ดังนั้น ความแข็งแรงอัดในทิศทางที่ 1 แม้จะเป็นความแข็งแรงในทิศทางของไฟเบอร์ จึงควรมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงอัดในทิศทางในทิศทางที่ 2 ซึ่งเป็นทิศทางของเมตริก (Fawaz *et al.*, 2004) โดยในที่นี้ได้กำหนดให้เท่ากัน

3. ความแข็งแรงเฉือนนอกระนาบกำหนดให้เท่ากับความแข็งแรงเฉือนในแนวระนาบ เนื่องจากในการรับแรงเฉือนของวัสดุคอมพอสิตส่วนใหญ่ เมตริกจะเป็นตัวรับแรงในการแยกชั้น (Delaminate) ของชั้นคอมพอสิตผ่านความหนา ดังนั้น ความแข็งแรงเฉือนนอกระนาบจึงกำหนดให้เท่ากับความแข็งแรงเฉือนในระนาบ (Gama *et al.*, 2001; Fawaz *et al.*, 2004)

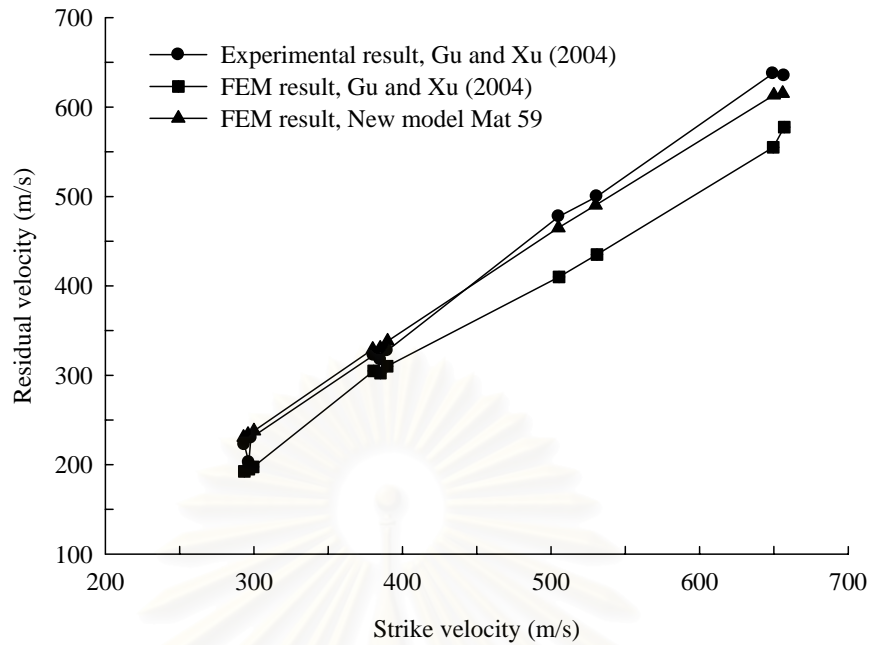
การเพิ่มเติมค่าคุณสมบัติความแข็งแรงในทิศทางที่ 3 ซึ่งเป็นทิศทางด้านความหนาและเป็นทิศทางของเมตริก จากแบบวัสดุชนิดที่ 22 เป็นแบบวัสดุชนิดที่ 59 แสดงดังในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเพิ่มเติมคุณสมบัติความแข็งแรงในทิศทางที่ 3 จากแบบวัสดุชนิดที่ 22 ไปเป็นแบบวัสดุชนิดที่ 59

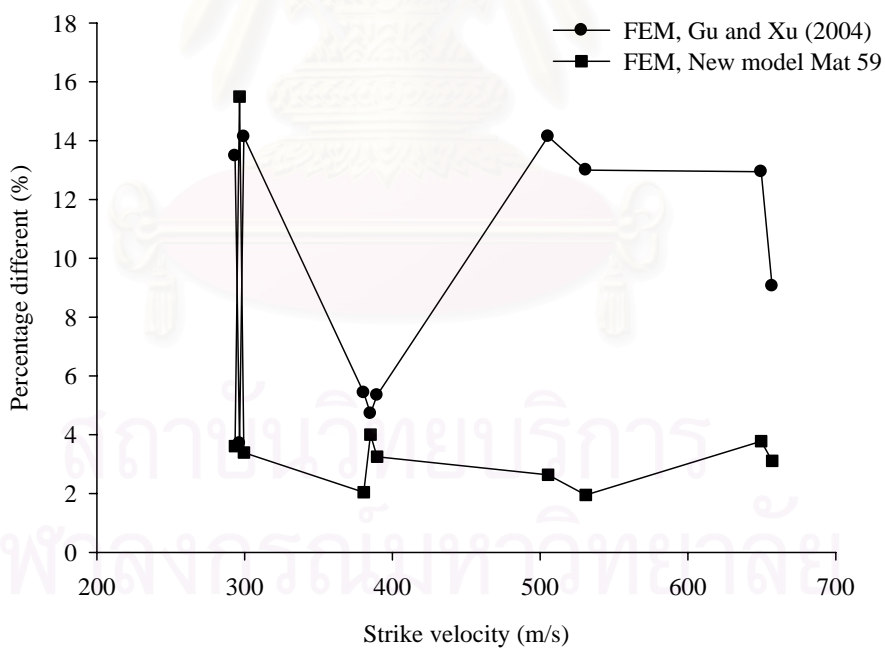
Properties	Mat 22	Mat 59
$E_1$ (Young's modulus-Longitudinal direction), GPa	20.44	20.44
$E_2$ (Young's modulus-Transverse direction), GPa	8.9	8.9
$E_3$ (Young's modulus-Normal direction), GPa	8.9	8.9
$\nu_{21}$ (Poisson's ratio 21)	0.31	0.31
$\nu_{31}$ (Poisson's ratio 31)	0.31	0.31
$\nu_{32}$ (Poisson's ratio 32)	0.49	0.49
$G_{12}$ (Shear modulus12), GPa	1.64	1.64
$G_{23}$ (Shear modulus23), GPa	3.03	3.03
$G_{31}$ (Shear modulus31), GPa	1.64	1.64
$T_1$ (Longitudinal tensile strength), GPa	1.145	1.145
$T_2$ (Transverse tensile strength), GPa	0.13	0.13
$T_3$ (Normal tensile strength), GPa	-	0.13
$C_1$ (Longitudinal compressive strength), GPa	-	0.65
$C_2$ (Transverse compressive strength), GPa	0.65	0.65
$C_3$ (Normal compressive strength), GPa	-	0.65
$S_{12}$ (In plane shear strength), GPa	0.39	0.39
$S_{31}$ (Shear strength ,31 plane), GPa	-	0.39
$S_{32}$ (Shear strength ,32 plane), GPa	-	0.39
Mass density, $\text{kg/m}^3$	1230	1230

#### 4.6 ผลการจำลองของแบบจำลองต้นแบบและการวิเคราะห์ผล

ความเร็วตกค้างจากการจำลองที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Gu & Xu (2004) ปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง มากกว่าแบบจำลองของ Gu & Xu (2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเดิม คือ จากการสร้างแบบจำลองที่แตกต่างกัน ทั้งการเลือกใช้แบบวัสดุในการคำนวณที่แตกต่างกัน และผลของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับผลการทดลองของ Gu & Xu (2004) แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองต้นแบบโดยใช้แบบวัสดุที่ 59 เปรียบผลการทดลองและจำลองของ Gu and Xu (2004)

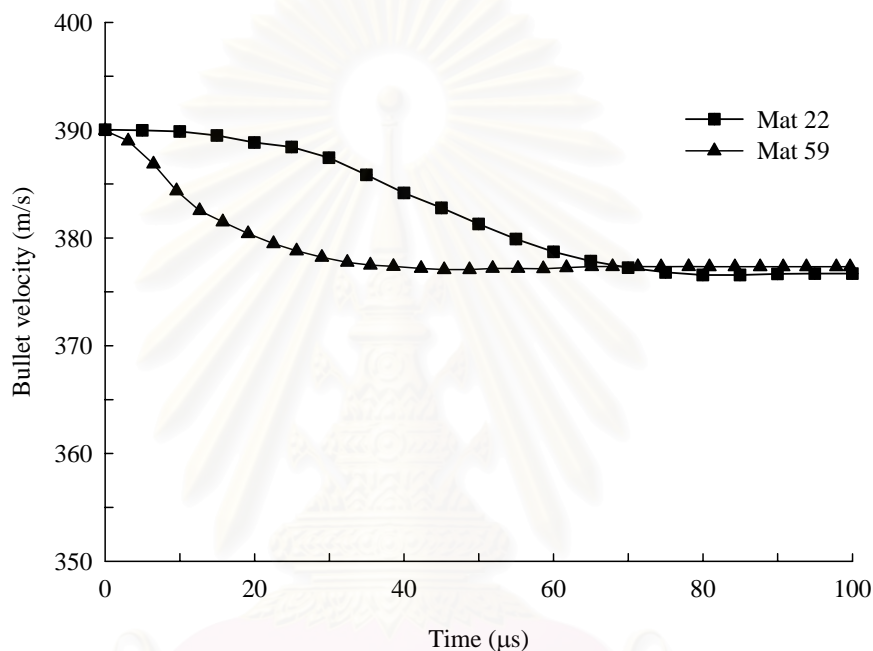


รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการจำลองแบบต้นแบบโดยใช้แบบวัสดุที่ 59 กับแบบจำลองและผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ

ค่าความแตกต่างของแบบจำลองต้นแบบกับผลการทดลองของ Gu & Xu (2004) สูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยที่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นสูงสุดนี้เกิดจากความผิดพลาดจากการทดลอง เนื่องจากค่าบริเวณที่เกิดความแตกต่างเกิดขึ้นสูงสุดแตกต่างจากค่าบริเวณ

อื่นๆ มาก (ค่าที่ได้จากการทดลองเกิดการแกว่งจนแตกต่างไปจากค่าอื่นๆ) ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตามความเร็วปะทะต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผิดพลาดไปจากกลุ่มจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเกิดขึ้นสูง

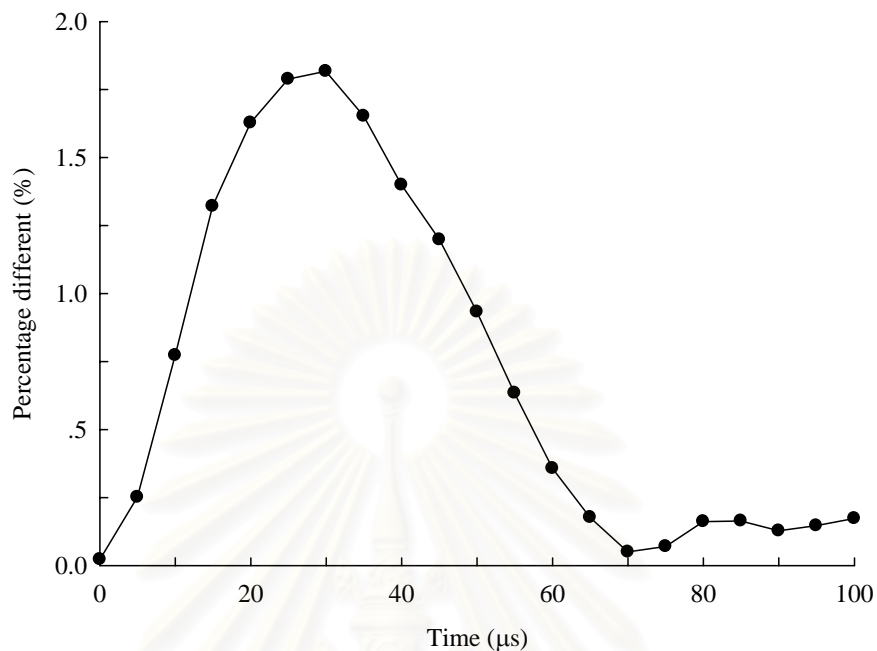
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองต้นแบบกับผลการจำลองเริ่มต้นปรากฏว่า ลักษณะเส้นความเร็วของกระสุนมีความแตกต่างจากแบบจำลองเริ่มต้นในช่วงที่กระสุนเริ่มแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมาย และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในช่วงที่กระสุนเริ่มทะลุและผ่านออกจากแผ่นเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับแบบจำลองเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ความเร็วของกระสุนขณะทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.16 เส้นความเร็วในช่วงที่กระสุนกำลังแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายมีความแตกต่างกับแบบจำลองเริ่มต้น ประมาณสูงสุดไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ทั้งนี้ สาเหตุมาจากแบบของวัสดุชนิดที่ 59 มีหลักความเสียหายที่สามารถลบเอลิเมนต์ได้ ถ้าความเสียหายนั้นถึงจุดที่หลักความเสียหายกำหนดไว้ จึงทำให้ความเร็วระหว่างการแทงทะลุผ่านของกระสุนต่ำกว่าแบบของวัสดุชนิดที่ 22 ที่ไม่สามารถลบเอลิเมนต์เมื่อความเสียหายถึงหลักที่กำหนดไว้ได้ สังเกตได้จากเส้นความเร็วของกระสุนที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 ที่มีการลดลงของความเร็วเพียงเล็กน้อยในขณะที่กระสุนเริ่มแทงทะลุผ่านเทียบกับที่ตำแหน่งเวลาเดียวกัน ในช่วงแรกของการปะทะกับแบบจำลองต้นแบบที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบวัสดุชนิดที่ 59 ดูซับแรงปะทะได้ดีกว่า โดยเมื่อพิจารณาความเร็วของกระสุนในแบบจำลองที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 จะเห็นว่าเริ่มลดลงหลังจากเวลาผ่านไป 20 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พลังงานการไหลเริ่มเพิ่มขึ้นสูง เป็นการแสดงให้เห็นว่าความเร็วของกระสุนที่ลดลงส่วนใหญ่เป็นผลจากพลังงานการ

ไถล ไม่ได้เกิดจากการดูดซับแรงกระแทกด้วยพลังงานภายในของวัสดุที่มีค่าเป็นลบ ด้วยเหตุผลใน ส่วนของเรื่องพลังงานซึ่งได้อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า



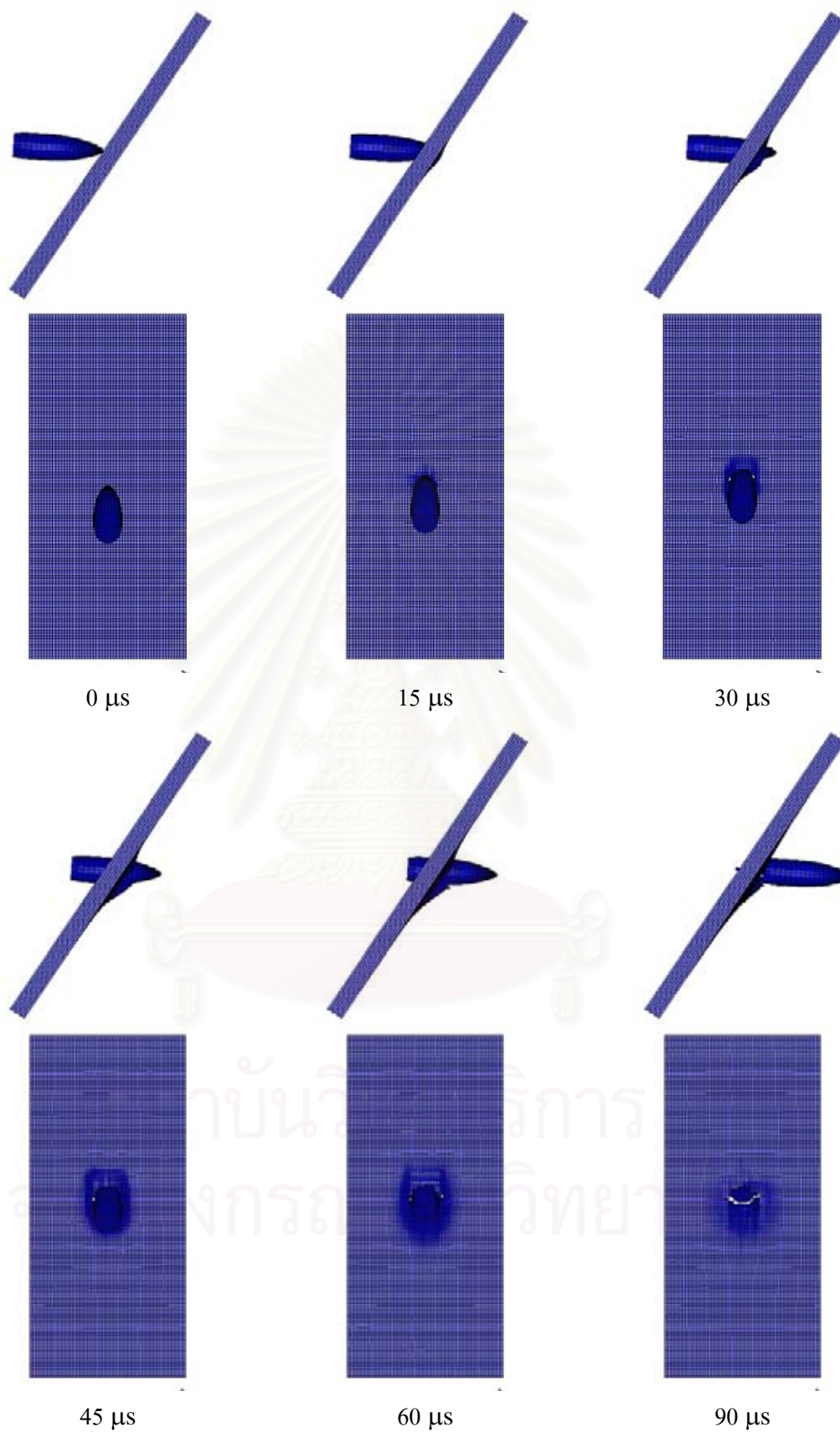
รูปที่ 4.17 เปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองเริ่มต้น กับแบบจำลองค้นแบบ

ส่วนความเร็วตกค้างหลังจากกระสุนทะลุผ่านไปแล้ว มีค่าประมาณเท่ากัน ต่างกันที่ ทศนิยมไม่เกิน 0.2 เปอร์เซนต์ แสดงดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากในช่วงนี้ไม่มีการลบเอลิเมนต์เพราะ กระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายออกไปแล้ว

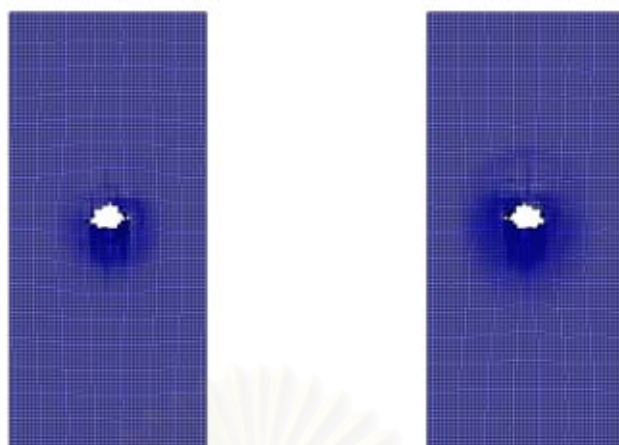
รูปการแทงทะลุผ่านที่เวลาต่างๆ ทั้งด้านข้างและด้านหน้าแสดงดังในรูปที่ 4.18 จากรูปจะ เห็นได้ว่าที่ด้านข้างลักษณะยังใกล้เคียงกับแบบจำลองเริ่มต้น (รูปที่ 4.11) แต่เริ่มเห็นลักษณะการฉีก ขาดของเอลิเมนต์ได้มากขึ้น ซึ่งต่อมาเป็นการเปรียบเทียบรูปจากด้านหน้าและด้านหลังแผ่น เป้าหมาย จะเห็นได้ว่าเอลิเมนต์ของแผ่นเป้าหมายบริเวณที่โดนปะทะจะถูกลบออกเป็นรู ดังแสดง ในรูปที่ 4.19 ณ เวลาที่กระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายออกไปแล้วโดยไม่แสดงรูปในส่วนของ กระสุน แตกต่างกับแบบของวัสดุชนิดที่ 22 ดังรูปที่ 4.13 ที่กระสุนทะลุผ่านไปแล้ว บริเวณที่ปะทะ นั้นเอลิเมนต์ยังไม่โดนลบออกไปจากแบบจำลอง ซึ่งไม่ถูกต้อง

ในเรื่องของพลังงาน ปรากฏว่าพลังงานของระบบมีความถูกต้องและเหมาะสมมากขึ้น กล่าวคือ พลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายมีค่าเป็นบวก โดยมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นใน ขณะที่กระสุนกำลังแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมาย เนื่องจากมีการถ่ายเทพลังงานจลน์ของกระสุน ให้กับแผ่นเป้าหมายเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความเครียดในวัสดุหรือพลังงานภายใน ซึ่งมีความ ถูกต้องมากกว่าแบบจำลองเริ่มต้นที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 ซึ่งให้ค่าพลังงานภายในเป็นลบ แสดงดัง ในรูปที่ 4.20

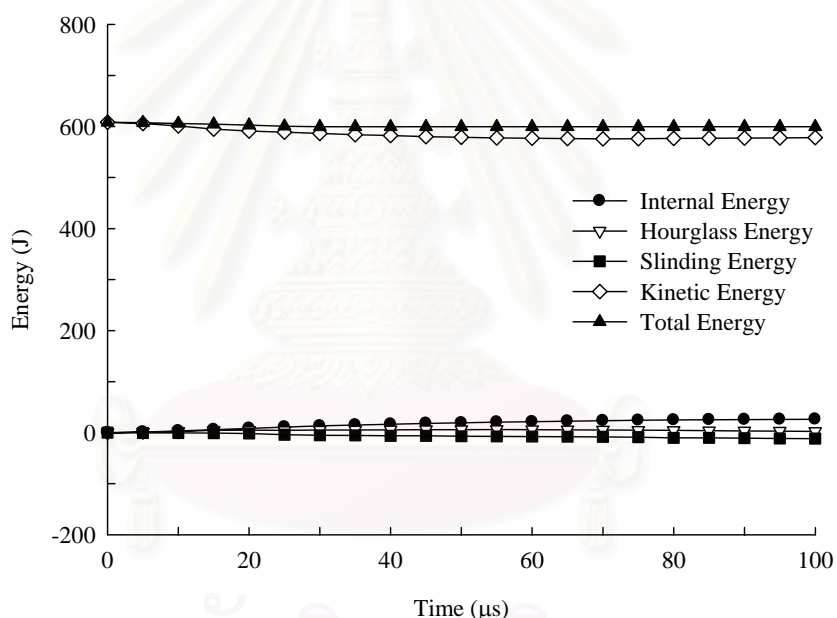




รูปที่ 4.18 การทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ทั้งรูปด้านข้างและด้านหน้าความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที ของแบบจำลองต้นแบบด้วยแบบวัสดุชนิดที่ 59

90  $\mu$ s ด้านหน้า90  $\mu$ s ด้านหลัง

รูปที่ 4.19 หลังการทะลุผ่านของกระสุนโดยที่เอลิเมนต์ถูกลบ (ไม่แสดงรูปกระสุน)



รูปที่ 4.20 พลังงานรวมของทั้งระบบขณะกระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความเร็วปะทะ 390 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA

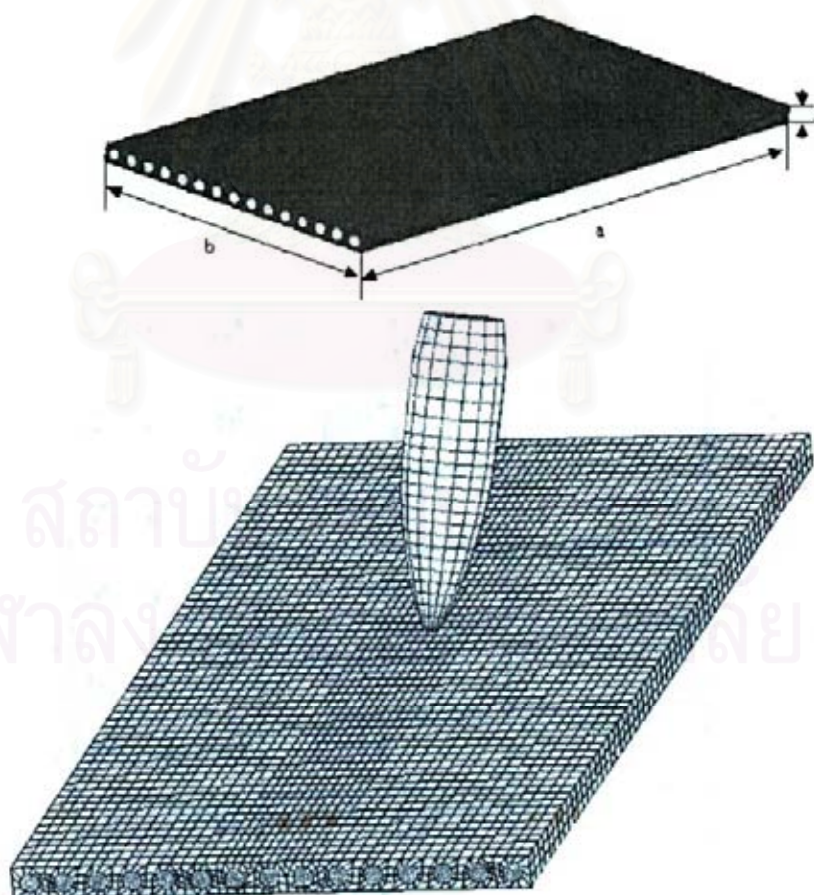
จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าพลังงานการไถลเกิดขึ้นน้อยมาก จากการที่ผิวสัมผัสระหว่างกระสุนและแผ่นเป้าหมายเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากมีการลบเอลิเมนต์ที่เสียหายจากการที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ส่วนพลังงานความเครียดเทียมมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่กระสุนเริ่มแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมาย เนื่องจากมีการเสีรูปของเอลิเมนต์มากในช่วงแรกของการปะทะและลบเอลิเมนต์ และพลังงานความเครียดเทียมจะลดลงหลังจากที่กระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายไปแล้วเนื่องจากช่วงนี้ไม่มีการลบเอลิเมนต์

#### 4.7 แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ Microstructure

การจำลองในหัวข้อนี้ได้นำการจำลองต้นแบบ มาจำลองแบบเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และผลการจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ซับซ้อนขึ้น กล่าวคือ จะทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองซึ่งใช้วิธีแบบ Microstructure โดยในแบบจำลองจะมีรูปร่างลักษณะภายนอกและคุณสมบัติของวัสดุแยกกันอย่างชัดเจนระหว่าง เมตริก และไฟเบอร์

##### 4.7.1 การจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005)

การจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005) นี้ เป็นการพิจารณาความเสียหายระดับอนุภาคของไฟเบอร์และเมตริกแยกกัน แต่คำนวณในแบบจำลองเดียวกัน เพราะไฟเบอร์ในแบบจำลองชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นกลมยาว วางตามยาวในเมตริก ซึ่งกำหนดให้เป็นแผ่นคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว โดยรูปร่างลักษณะของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.21



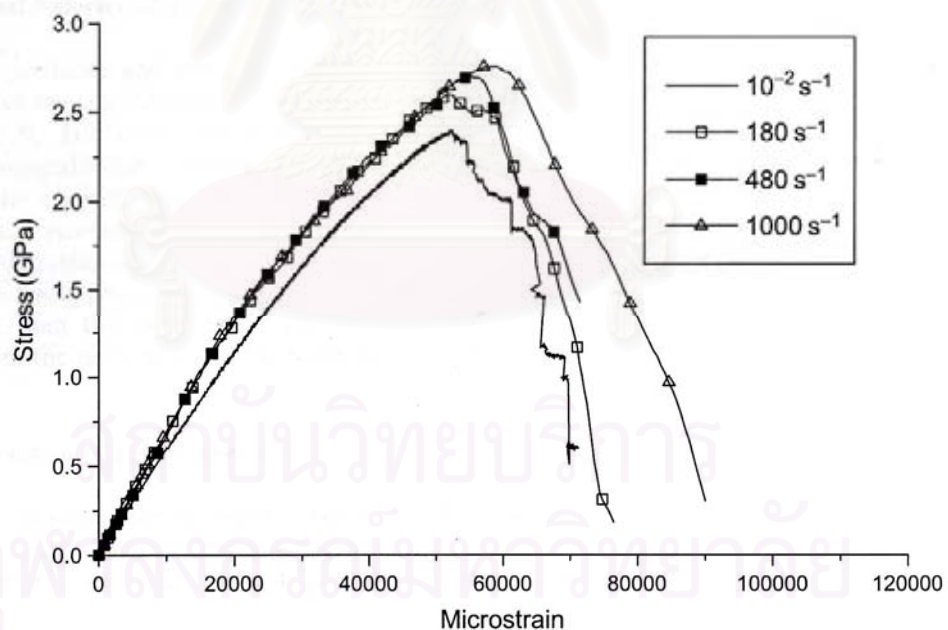
รูปที่ 4.21 ลักษณะและโครงสร้าง Mesh จากการจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005)

ในแบบจำลองของ Gu and Li(2005) ใช้เมตริกแบบ อีพอกซี โดยกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ พลาสติก-คิเนมาติก (Plastic-kinematics) มีความหนาแน่นเท่ากับ 1170 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus)  $E = 5$  GPa, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratios)  $\nu = 0.35$ , ค่าความเค้นคราก (Yield stress)  $\sigma_y = 0.35$  GPa และเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่จุดเสียหาย (Failure strain)  $\varepsilon_f = 4.5$  %

ส่วนไฟเบอร์กำหนดให้เป็นคุณสมบัติของ Twaron® ชนิด CT1000, 3360 dtex/2000f ซึ่งเป็นไฟเบอร์ชนิดเดียวกับกับหัวข้อที่ 4.1 แต่เปลี่ยนให้แบบของวัสดุให้เป็นแบบ Strain rate ที่  $1000 \text{ s}^{-1}$  โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ (Gu, 2004)

$$\sigma = 72\varepsilon \cdot \exp \left[ - \left( \frac{72\varepsilon}{12.103} \right)^{1.139} - \left( \frac{72\varepsilon}{5.560} \right)^{6.098} \right], \quad \dot{\varepsilon} = 1000 \text{ s}^{-1} \quad (4.4)$$

สมการที่ 4.4 ได้มาจากการประมาณเส้นกราฟจากการทดลองดึงเส้นใย Twaron® ของ Gu (2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้ Strain rate ที่  $1000 \text{ s}^{-1}$  เนื่องจากเป็นอัตราการดึงที่ใกล้เคียงกับการรับแรงปะทะจากความเร็วของกระสุน



รูปที่ 4.22 กราฟแรงดึงของ Twaron® ที่อัตราการดึงต่างกัน จากการทดลองของ Gu, (2004)

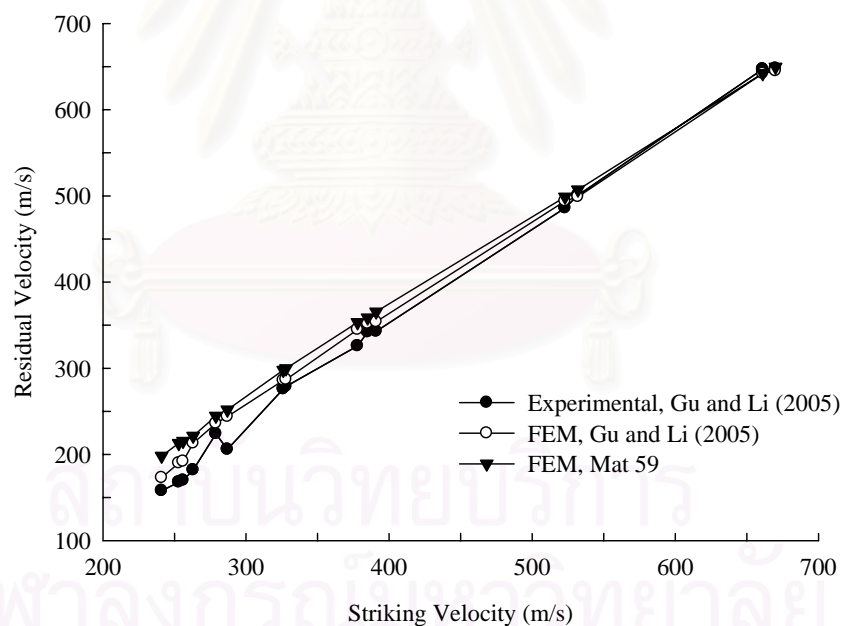
การกำหนดคุณสมบัติแบบนี้ต้องใช้คำสั่งพิเศษเข้าไปในโปรแกรม นั่นคือ ผู้ใช้ต้องเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutines) เข้าไปในโปรแกรมหลัก เพื่อกำหนดลักษณะความยืดหยุ่นและเป็นหลักความเสียหายในการคำนวณของแบบจำลองในส่วนของไฟเบอร์



#### 4.7.2 แบบจำลองต้นแบบเปรียบเทียบการจำลองแบบ Microstructure และผลการจำลอง

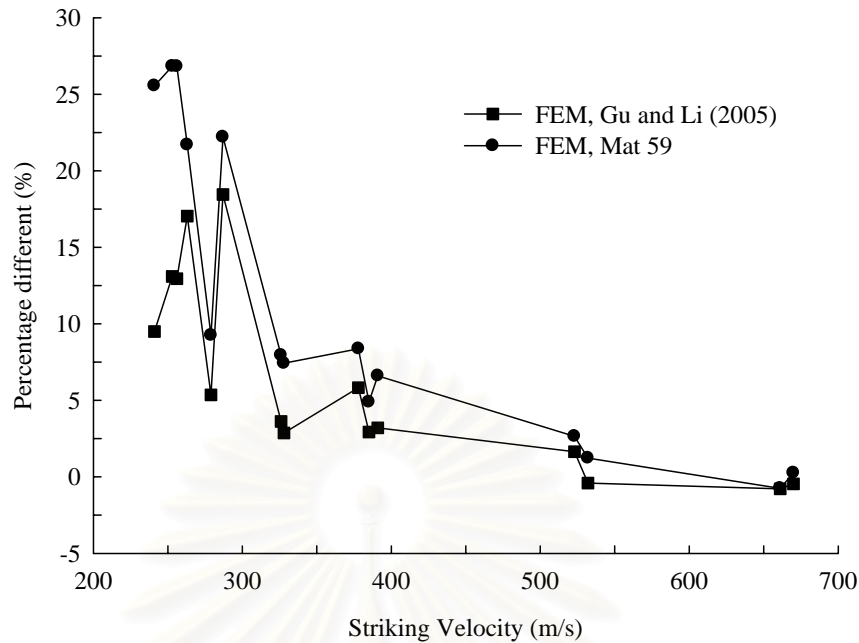
รูปร่างลักษณะของแบบจำลองไม่ว่าจะเป็นกระสุนหรือแผ่นเป้าหมาย รวมทั้งแบบวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุยังใช้เหมือนกับแบบจำลองต้นแบบในหัวข้อที่ 4.5 เพียงแต่ปรับเปลี่ยนลักษณะของรูปร่างของแผ่นเป้าหมายเล็กน้อยโดยการลดความหนาของแผ่นเป้าหมายจากเดิม 5 มิลลิเมตร เป็น 3 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองและผลการทดลองของ Gu and Li (2005)

ผลการจำลองปรากฏว่าแบบจำลองต้นแบบที่ใช้ Mat 59 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งเป็นผลของความเร็วดก้างที่ความเร็วปะทะต่างๆ โดยเฉพาะที่ความเร็วปะทะสูงๆ แสดงดังในรูปที่ 4.23 ซึ่งแตกต่างกับผลการทดลองไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ สูงสุดที่ความเร็วต่ำไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ โดยรูปเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง แสดงดังในรูปที่ 4.24 จากรูปเส้นความเร็วดก้างของผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนสูงในช่วงความเร็วต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้มีความแตกต่างกับผลการจำลองต้นแบบที่มีลักษณะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตามความเร็วปะทะที่สูงขึ้น และแม้ว่าแบบจำลองของ Gu and Li (2005) จะให้ผลที่ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองต้นแบบ แต่เฉลี่ยแล้วไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์



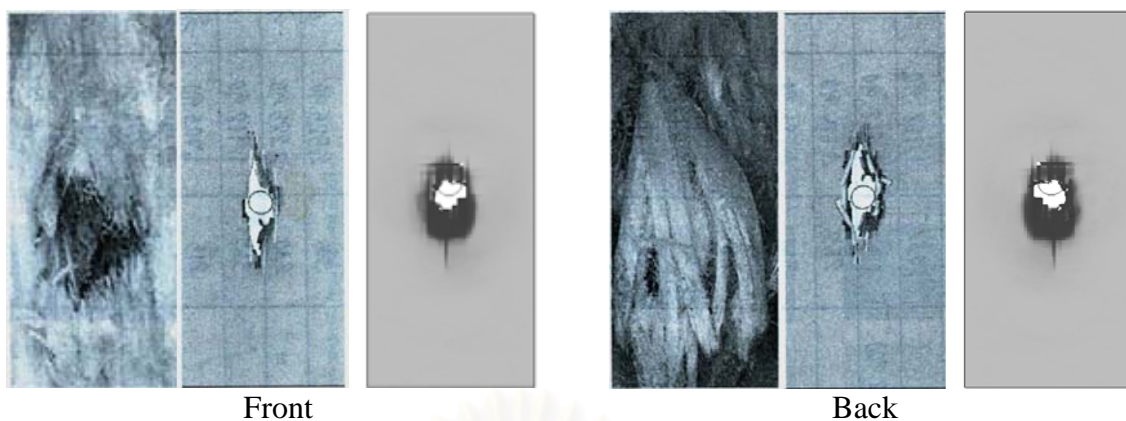
รูปที่ 4.23 ความเร็วดก้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทกต่างๆ ของการจำลองต้นแบบเปรียบเทียบผลการทดลองและจำลองของ Gu and Li (2005)





รูปที่ 4.24 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของการจำลองต้นแบบ และการจำลองของ Gu and Li (2005) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Gu and Li (2005) ที่ความเร็วกระแทกต่างๆ

การเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายจากผลการจำลองต้นแบบกับผลการทดลองของ Gu and Li (2005) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ถ้าพิจารณาระดับอนุภาค ผลปรากฏว่าลักษณะความเสียหายมีความแตกต่างกันพอสมควร โดยที่ลักษณะความเสียหายจากผลการทดลอง ในส่วนของด้านหน้าเส้นใยไฟเบอร์จะขาดออกจากกันและหลุดหายไปบริเวณการปะทะ ส่วนด้านหลังไฟเบอร์จะขาดแต่ไม่หลุดออกจากแผ่นเป้าหมายโดยยังติดส่วนปลายของเส้นใยไฟเบอร์อีกด้านหนึ่ง แตกต่างกับผลการจำลองที่เอลิเมนต์ซึ่งโดนปะทะจากกระสุนจะขาดและหลุดออกจากแบบจำลองไม่ว่าผลการจำลองของ Gu and Li (2005) หรือ แบบจำลองต้นแบบ แต่ลักษณะความเสียหายในแบบจำลองของ Gu and Li (2005) จะมีลักษณะการขาดเป็นแนวยาวตามการวางตัวของไฟเบอร์ มากกว่าแบบจำลองต้นแบบ ที่แม้ว่าแนวโน้มจะมีลักษณะความเสียหายตามแนวของไฟเบอร์ก็ตาม โดยบริเวณสี่เทาที่กระสุนปะทะแสดงถึงลักษณะการเสียรูปและความเข้มข้นของความเค้นที่สูง ทั้งนี้เป็นเพราะการที่กำหนดให้ไฟเบอร์มีคุณสมบัติแบบ Strain rate dependent วางตามยาวของเมตริกที่มีคุณสมบัติแบบ Isotropic มีลักษณะใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของวัสดุระดับอนุภาคมากกว่า แบบจำลองต้นแบบที่พิจารณาวัสดุระดับมหภาคทั้งแผ่น จึงให้ผลแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาในระดับอนุภาค ซึ่งการจำลองต้นแบบในงานวิจัยนี้ไม่ได้กำหนดให้แผ่นเป้าหมายมีคุณสมบัติแบบ Strain rate dependent เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติด้าน Strain rate dependent ในแผ่นคอมพอสิตทั้งแผ่น รวมทั้งการพิจารณาแบบวัสดุแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าแต่ให้ผลของความเร็วตกค้างมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

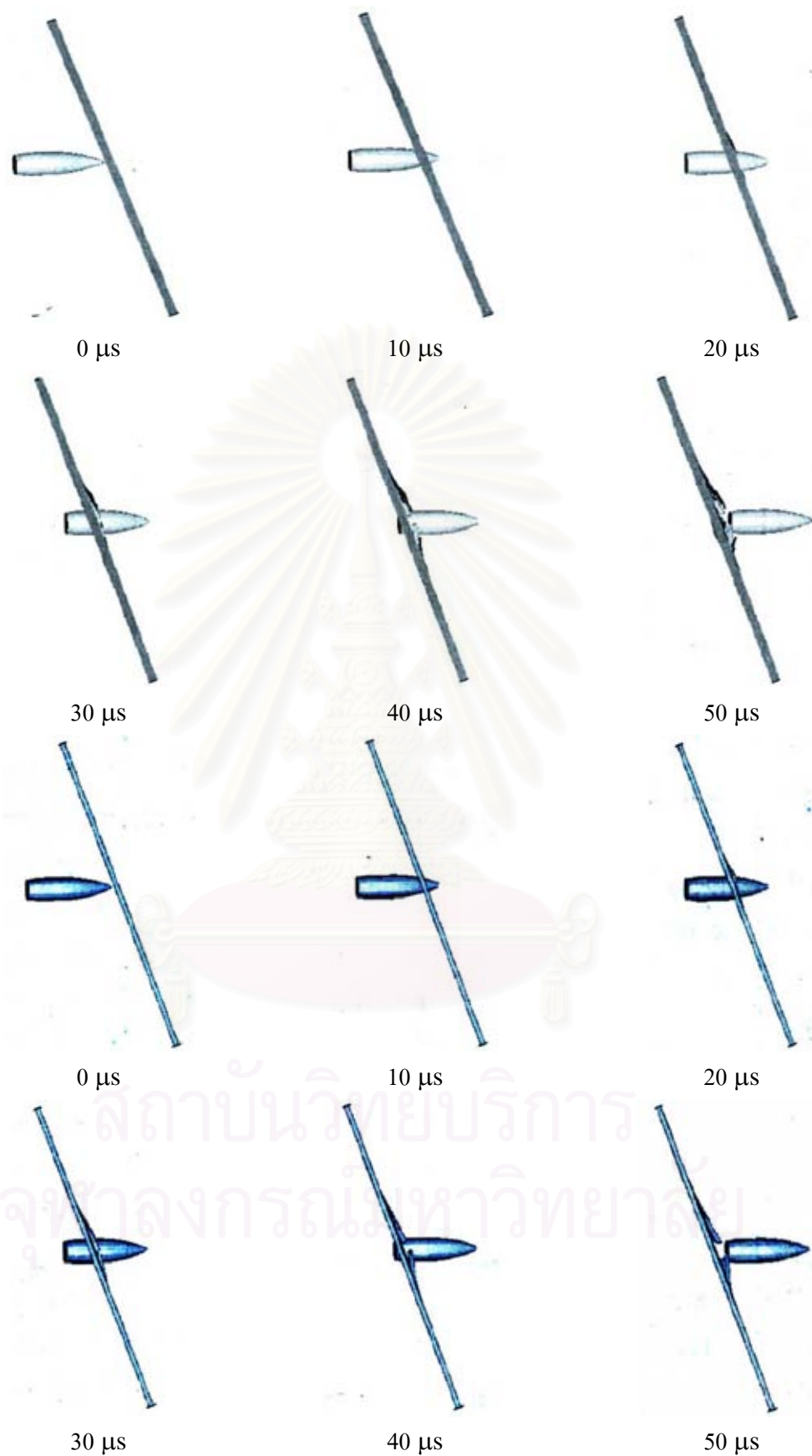


รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบความเสียหายของแผ่นเป่าหมายจากการทดลอง (ซ้าย) กับผลการจำลองของ Gu and Li (2005) (กลาง) และการจำลองต้นแบบ (ขวา) ที่ด้านหน้าและด้านหลัง

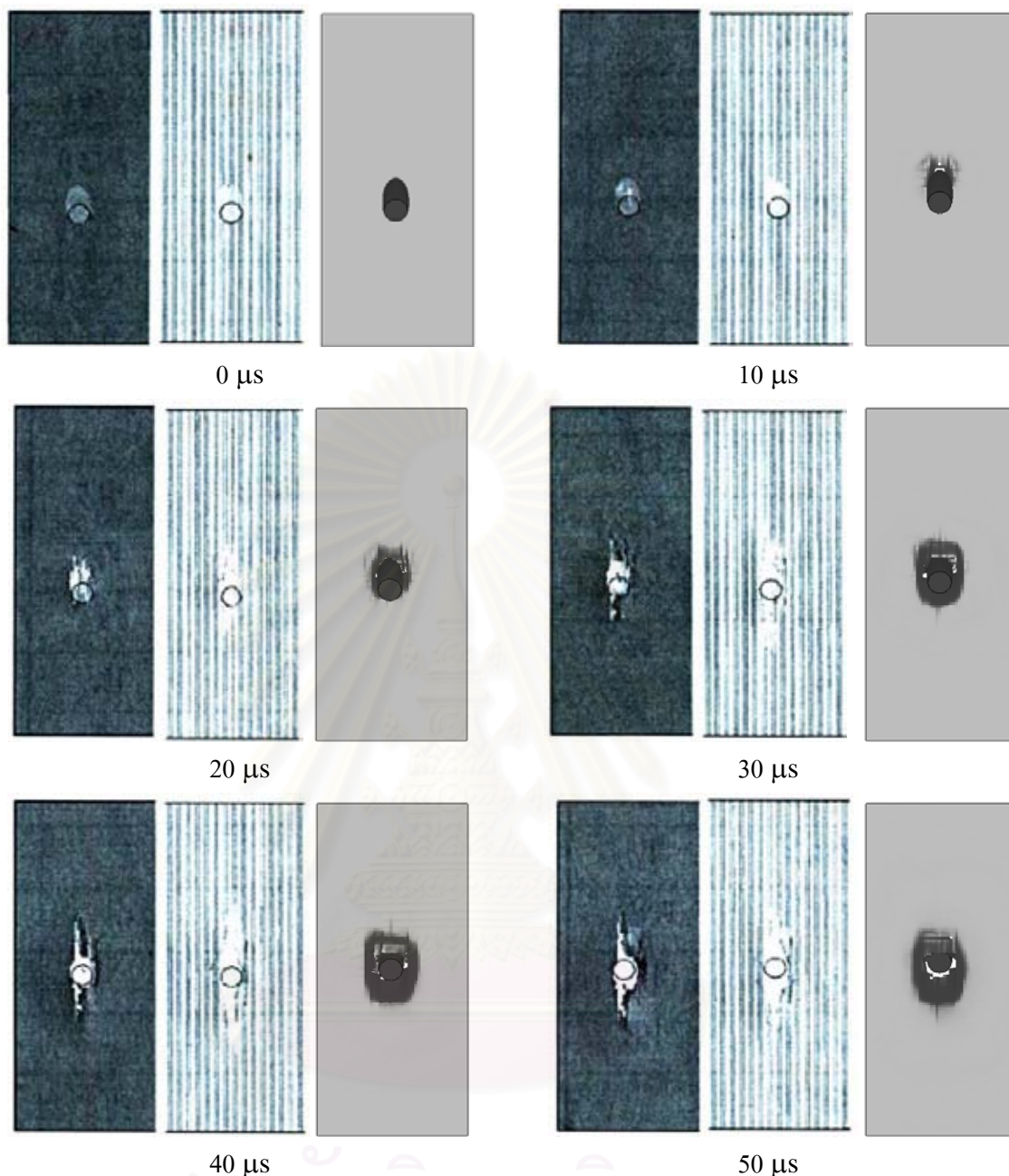
ถ้าเปรียบเทียบการจำลองต้นแบบกับแบบจำลองของ Gu and Li (2005) ระดับมหภาคแสดงดังในรูปที่ 4.26 แบบการจำลองต้นแบบอยู่ด้านบนพิจารณาเป็นคอมพอสิตเนื้อเดียวกันทั้งแผ่น และจากการจำลองที่พิจารณาแยกส่วนกันชัดเจนระหว่างไฟเบอร์และเมตริกของ Gu and Li (2005) แสดงรูปตรงกลางจะเป็นส่วนของเมตริก ส่วนด้านล่างจะเป็นส่วนของเส้นใยไฟเบอร์ในแบบจำลองของ Gu and Li (2005) จะเห็นได้ว่าลักษณะการทะลุผ่านของกระสุนมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ณ เวลาการปะทะต่างๆ



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของ หัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ของแบบจำลองต้นแบบ(บน)



รูปที่ 4.26 (ต่อ) การเปรียบเทียบการทะลุผ่านของกระสุนที่เวลาต่างๆ ของ Gu and Li (2005) โดย ความเสียหายของแผ่นเมตริก (กลาง) และความเสียหายของไฟเบอร์ (ล่าง)



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบความเสียหายของแผ่นเป้าหมายระหว่างการจำลองที่เวลาต่างๆ ของ Gu and Li (2005) (ซ้ายและกลาง) กับการจำลองต้นแบบ (ขวา)

ส่วนความเสียหายที่แสดงดังรูปที่ 4.27 เป็นความเสียหายของแผ่นเป้าหมายจากการจำลองต้นแบบ เปรียบเทียบกับการจำลองของ Gu and Li (2005) แสดงด้านหน้าที่โดนปะทะ ซึ่งแยกเป็นแบบจำลองของเมตริก (ซ้าย) แบบจำลองของไฟเบอร์ (กลาง) และแบบจำลองต้นแบบ (ขวา) เนื่องจากเป็นแผ่นคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว (ตามยาวของแผ่นเป้าหมาย) จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะความเสียหายของแผ่นเป้าหมายจะเกิดตามแนวยาวของแผ่นเมตริกและไฟเบอร์ และเกิดมากกว่าแบบจำลองต้นแบบ ทั้งนี้เหตุผลความแตกต่างเหมือนกับการพิจารณาความแตกต่างระดับ



อนุภาคที่ Gu and Li (2005) พิจารณาวัสดุเป็นแบบ Strain rate dependent จึงทำให้เกิดความเสียหายของวัสดุเป็นแนวยาวตามการตัวของไฟเบอร์มากกว่าการจำลองต้นแบบที่ไม่ได้พิจารณาวัสดุเป็นแบบ Strain rate dependent

พิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นแนวยาวนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยไฟเบอร์ที่วางตัวเป็นแนวตามยาวของแผ่นเป้าหมาย เพราะถ้าพิจารณาเมตริกความเสียหายไม่น่าจะเกิดเป็นแนวยาวได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นแบบ Isotropic ทั้งความแข็งแรงของคอมพอสิตส่วนใหญ่ยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยไฟเบอร์ จึงทำให้ลักษณะความเสียหายเป็นแนวยาวตามทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์ ต่างกับแบบจำลองต้นแบบที่ลักษณะความเสียหายยังมีการกระจายออกไปด้านข้างเล็กน้อย

#### 4.8 การประยุกต์ใช้ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดลองสำหรับการจำลองแบบ

จากที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในโครงการพัฒนาเกราะแข็งน้ำหนักเบาของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ผลิตเกราะพอลิเมอร์คอมพอสิตขึ้นเอง ซึ่งจากการทดลองหาค่าคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในภาคผนวก ก ที่ให้ผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนและไม่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก จนไม่อาจจะนำค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้มาประยุกต์ใช้สำหรับการจำลองแบบได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้มาจากทดลองในภาคผนวก ก สำหรับจำลองแบบได้ ดังนั้น การจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลจึงได้ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุคอมพอสิต จากงานวิจัยของ Gu and Xu (2004)

#### 4.9 สรุป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองต้นแบบที่ใช้แบบของวัสดุชนิดที่ 59 สามารถใช้เป็นต้นแบบการจำลองได้เป็นอย่างดี เนื่องจากให้ผลการจำลองที่มีแนวโน้มใกล้เคียงผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) ที่มีแนวโน้มของความเร็วตกค้างของกระสุนใกล้เคียงกับผลการทดลองและผลการจำลองแบบ Microstructure ของ Gu and Li (2005) เป็นการแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ที่ไม่ต้องพิจารณาถึงขั้น Microstructure แต่สามารถให้ผลการจำลองในส่วนของคุณภาพตกค้างของกระสุนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบ Microstructure และผลการทดลองของ Gu and Li (2005) เพื่อใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานในการศึกษาพารามิเตอร์เชิงกลต่างๆ ต่อไป



## บทที่ 5

### ผลกระทบของมุมปะทะ เงื่อนไขขอบเขต ขนาดและความหนาของแผ่นคอมพอลิต

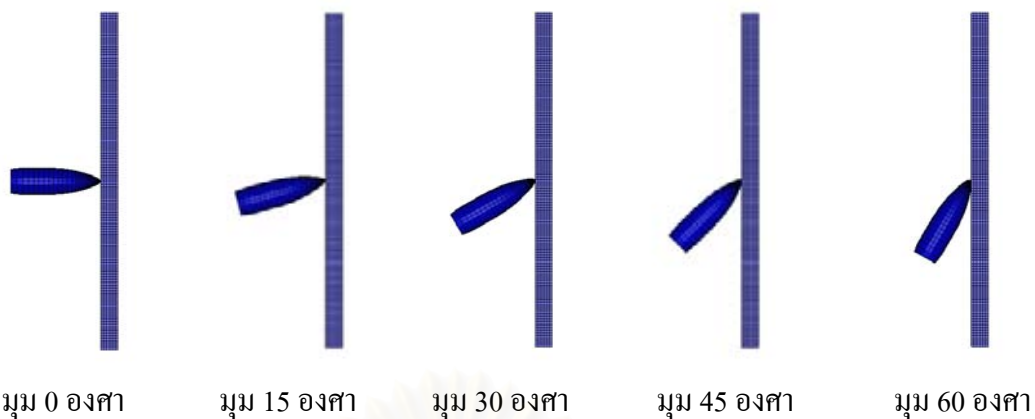
จากบทที่ 4 แม้จะได้แบบการจำลองต้นแบบที่สามารถให้ผลการจำลองที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองและการจำลองของ Gu and Xu (2004) และ Gu and Li (2005) แล้ว แต่อาจจะมีหลายจุดที่ยังไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้ในการจำลองเปรียบเทียบกับแนวโน้มการทดลองจริง เช่น ตำแหน่ง หรือ มุมปะทะของหัวกระสุน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและขนาดของแผ่นเป้าหมาย ซึ่งโดยทั่วไปเงื่อนไขขอบเขตการจำลองทางจิปนจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของหัวกระสุน ความเร็วเริ่มต้นของหัวกระสุน รูปร่างและความหนาของแผ่นเป้าหมาย (Jovicic, 2003) ดังนั้นในบทนี้จึงได้มีการปรับเปลี่ยนการวางตำแหน่งมุมปะทะ เงื่อนไขขอบเขต ขนาดและความหนาของแผ่นเป้าหมายให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปเป็นแบบจำลองต้นแบบมากขึ้น

#### 5.1 ผลกระทบของมุมปะทะของหัวกระสุน

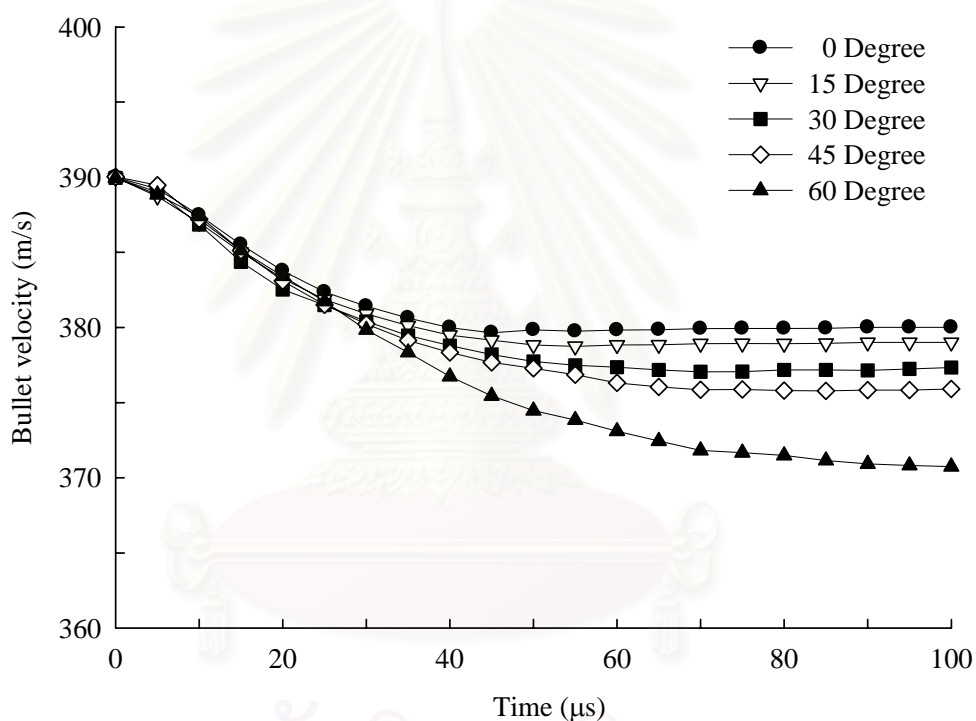
ส่วนใหญ่การทดสอบยิงเกราะกันกระสุน มุมปะทะของหัวกระสุนจะเป็นแนวตั้งฉากกับแผ่นเป้าหมาย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้มีการปรับมุมปะทะของหัวกระสุน จากเดิม ประมาณ 30 องศา เป็นแนวตั้งฉาก รวมทั้งมีการปรับให้ปะทะที่มุม 15, 45 และ 60 องศา เพื่อศึกษาความแตกต่างของความเร็วตกค้างและผลกระทบอื่นๆ ที่เกิดขึ้น โดยมุมปะทะที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 5.1

ผลการจำลองปรากฏว่าที่มุม 0 องศา ความเร็วตกค้างมีค่าน้อยที่สุด และเริ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามขนาดของมุมที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเอียงของมุมที่ปะทะที่ยิ่งเอียงมากจะทำให้กระสุนทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายได้ยากยิ่งขึ้น เนื่องจากพื้นที่ที่กระสุนสัมผัสแผ่นเป้าหมาย (ด้านความหนา) มีมากขึ้น หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า มุมปะทะที่ตั้งฉากกระสุนจะทะลุได้ง่ายที่สุด (Goat, 1982, Kumrungsie *et al.*, 2007)

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้าง มุมปะทะแนวตั้งฉากกับมุม 30 องศา มีค่าประมาณไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งรูปที่ 5.3 นี้เป็นการแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างที่มุมปะทะต่างๆ กับมุม 30 องศา ซึ่งเป็นมุมปะทะในแบบจำลองต้นแบบ โดยที่มุมปะทะยิ่งเข้าใกล้มุม 30 องศา จะยิ่งให้ค่าความแตกต่างที่น้อยมาก โดยเฉพาะในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 45 องศา แต่ที่ 60 องศา ความเร็วตกค้างของกระสุนมีความแตกต่างกับมุมน้อยกว่า 30 องศา ในช่วงแรกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างกระสุนกับแผ่นเป้าหมายมีมากขึ้น กระสุนจึงไหลไปบนแผ่นเป้าหมาย

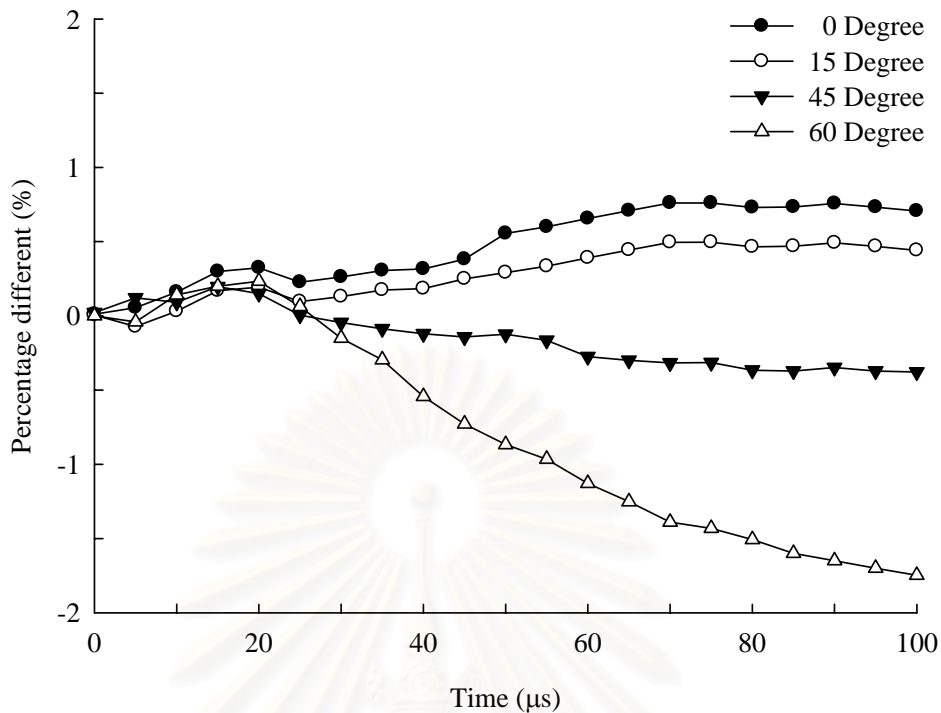


รูปที่ 5.1 การปะทะของหัวกระสุนกับแผ่นเป้าหมายที่มุมต่างๆ



รูปที่ 5.2 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่มุมปะทะต่างๆ โดยความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



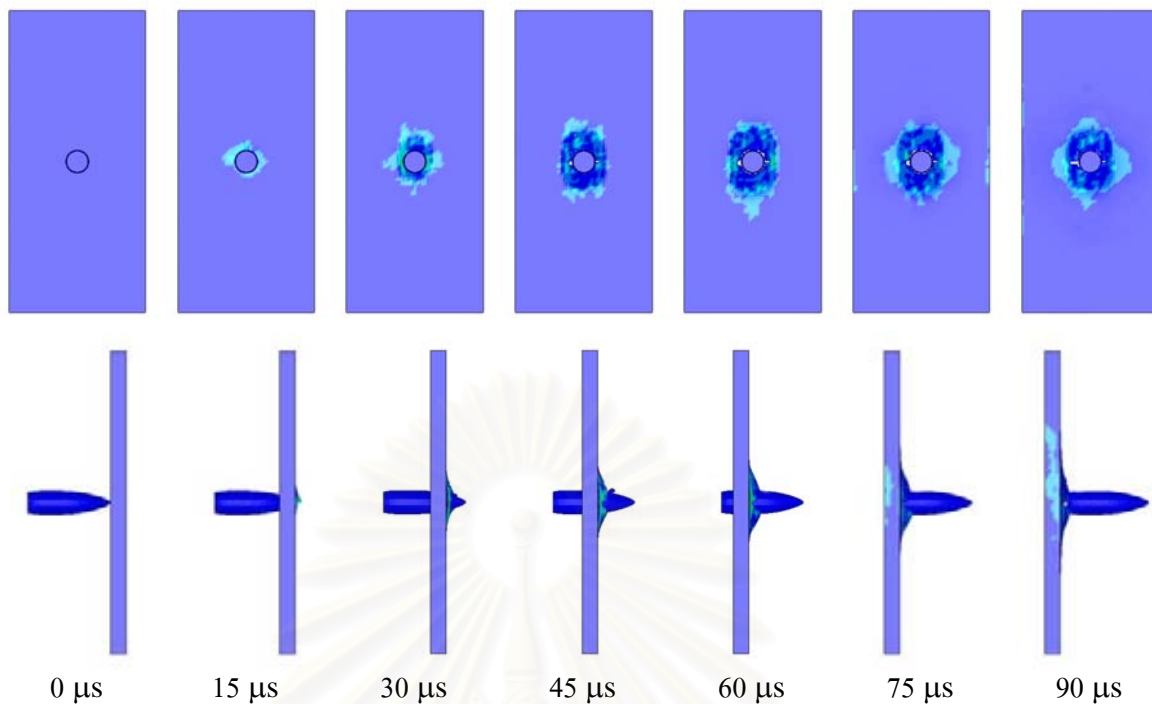
รูปที่ 5.3 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างระหว่างมุมปะทะต่างๆ กับมุม 30 องศา

อย่างไรก็ตามในการทดลองจริง ถ้ามุมปะทะของหัวกระสุนมีค่าสูงๆ อาจเป็นไปได้ว่าหัวกระสุนอาจจะเฉลหรือไถลไปบนแผ่นเป้าหมายก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสและความยืดหยุ่นของแผ่นเป้าหมาย

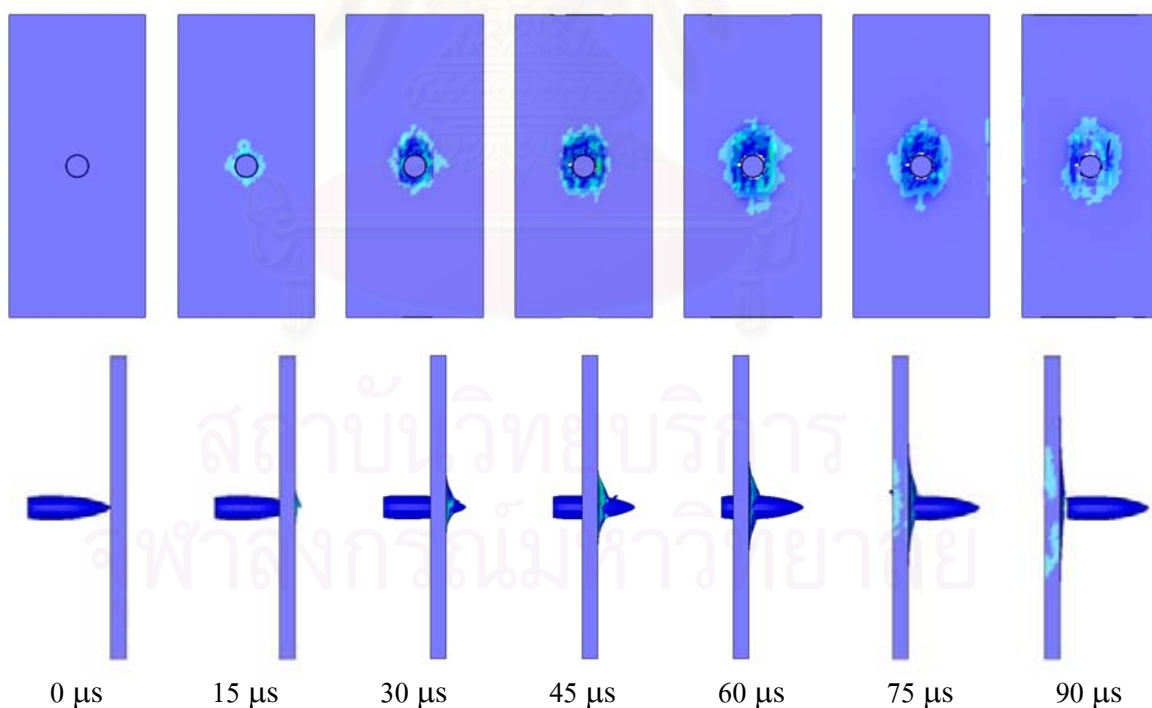
## 5.2 ผลกระทบของเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นเป้าหมาย

จากหัวข้อที่ 5.1 มุมปะทะของหัวกระสุนที่มีผลต่อความเร็วตกค้าง มีค่าน้อยมากเพียงไม่เกิน 1 เปรอ์เซ็นต์ ระหว่างมุมปะทะแนวตั้งฉากกับมุมเอียง 30 องศา (กรณีความหนาและโมเมนต์ตัมของกระสุนเฉพาะเท่าที่กำหนดในหัวข้อที่ 5.1) ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้และต่อไป จึงได้ใช้มุมปะทะแบบแนวตั้งฉาก เพราะมุมปะทะลักษณะนี้เป็นมุมปะทะที่ก่อให้เกิดความเสียหายมากกว่ามุมปะทะอื่น

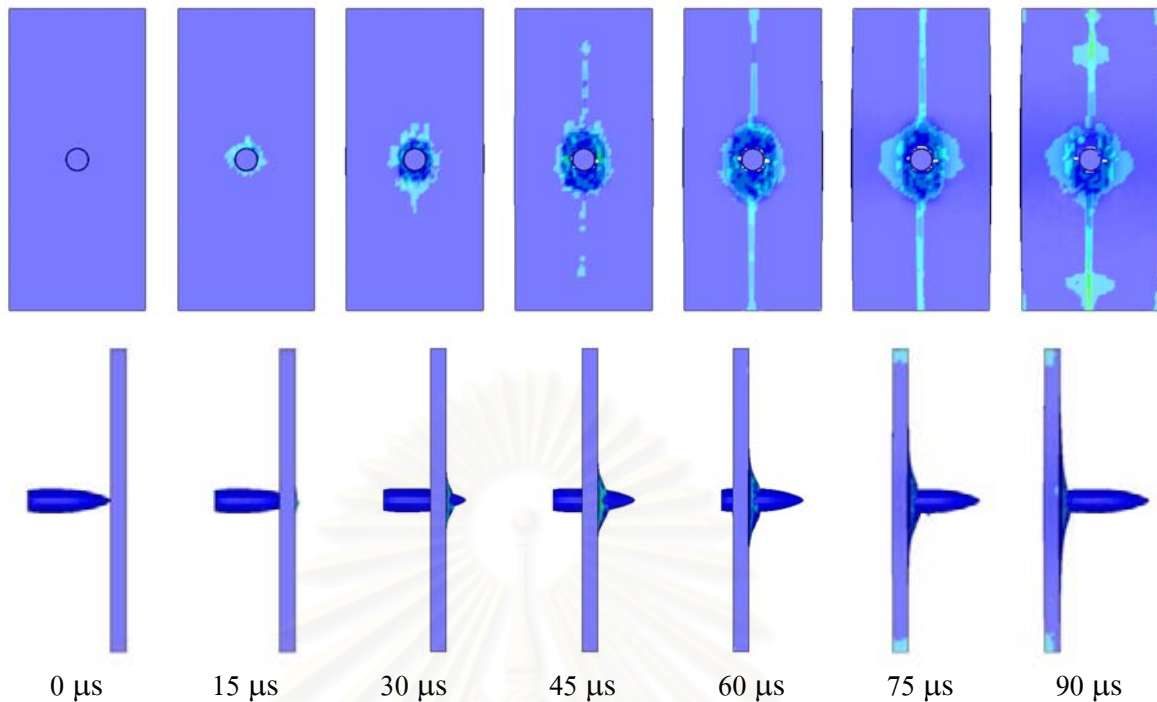
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของเงื่อนไขขอบเขต และขนาดของแผ่นเป้าหมาย โดยจะสังเกตจากลักษณะการกระจายตัวของคลื่นความเค้นที่เกิดจากการปะทะของหัวกระสุนและการสะท้อนกลับจากขอบ ซึ่งจะเริ่มเปรียบเทียบจากแบบจำลองต้นแบบที่มีการตรึงรอบขอบ โดยเปลี่ยนเป็นการตรึงเพียงขอบด้านยาวทั้งสองข้างกรณีหนึ่ง และตรึงด้านบนและด้านล่างอีกกรณีหนึ่ง ผลการจำลองแสดงเปรียบเทียบกันทั้ง 3 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตริงรอบขอบ



รูปที่ 5.5 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตริงขอบซ้ายและขอบขวา

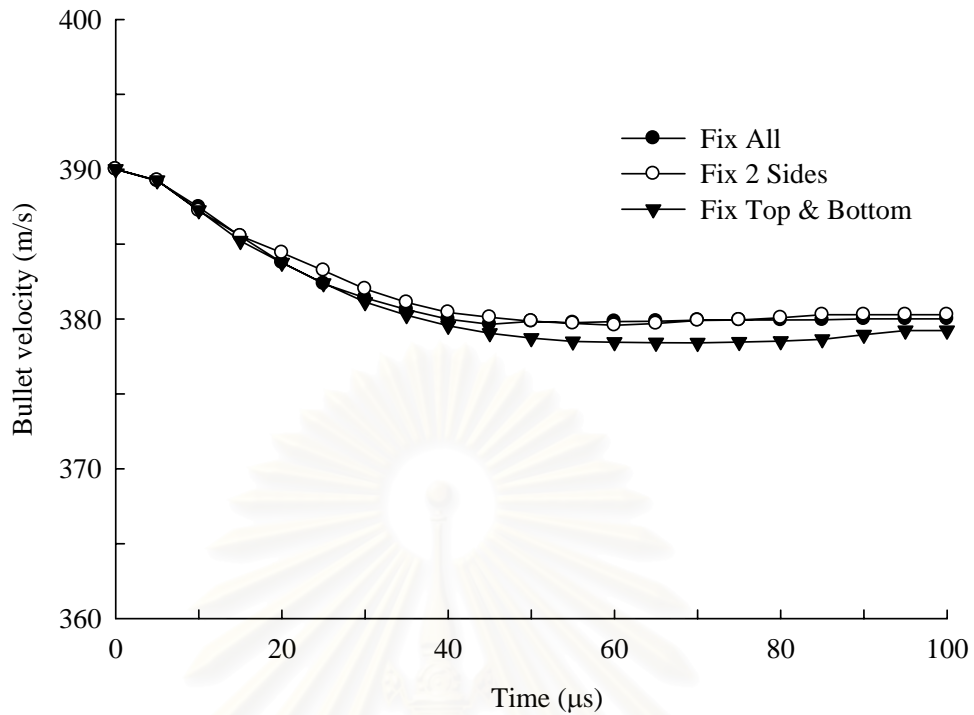


รูปที่ 5.6 Mises stress contours และการทะลุผ่านของหัวกระสุนที่เวลาต่างๆ ที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที โดยการตรึงขอบบนและขอบล่าง

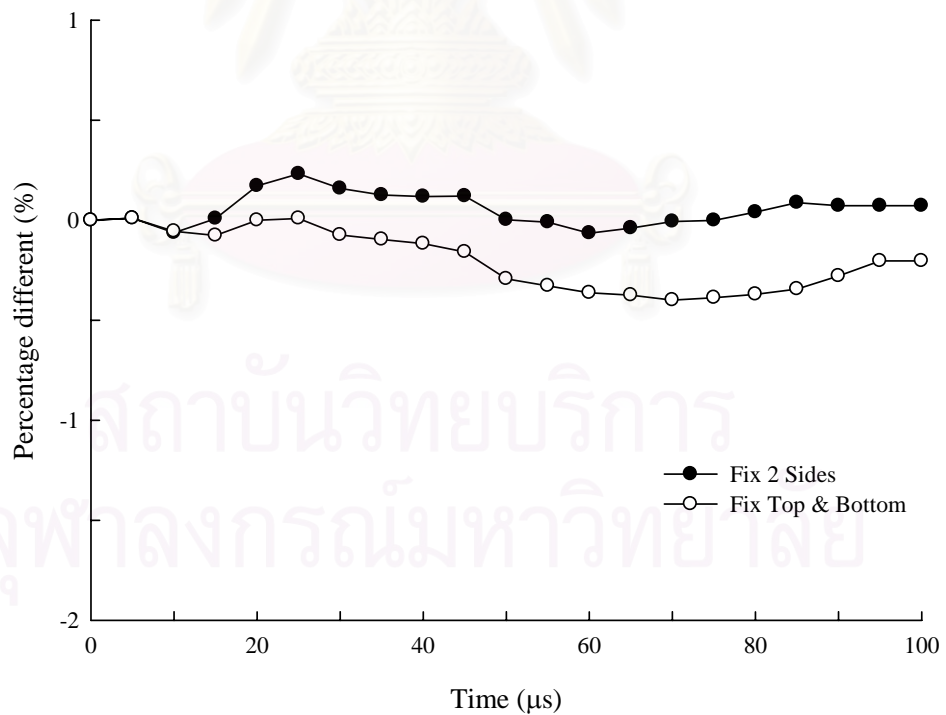
เมื่อพิจารณาการกระจายของคลื่นความเค้นในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ปรากฏว่าการกระจายของคลื่นความเค้นในแผ่นเป้าหมายที่มีการตรึงรอบขอบและตรึงขอบด้านข้างทั้งสอง มีลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก โดยกระจายออกไปจากจุดที่กระสุนปะทะลักษณะคล้ายวงรี ทั้งนี้จากการที่แผ่นเป้าหมายมีความกว้างที่น้อยกว่าความยาว การกระจายของคลื่นความเค้นจึงกระจายไปจากจุดที่กระสุนปะทะ ไปถึงขอบด้านข้างก่อนที่จะถึงขอบด้านบนหรือขอบด้านล่าง ในลักษณะที่เหมือนกันทั้งสองแบบการจำลอง แตกต่างกับแบบจำลองที่ตรึงขอบบนและขอบล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ที่การกระจายของคลื่นความเค้น มีการกระจายไปตามแนวยาวของแผ่นเป้าหมาย ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เป็นทิศทางของไฟเบอร์ ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นในสมการที่ 3.21 ถ้าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่ความหนาแน่นเท่ากัน ความเร็วคลื่นจะสูงไปในทิศทางนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองนี้ที่ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของแผ่นเป้าหมายในทิศทางตามยาวซึ่งเป็นทิศทางของไฟเบอร์มีค่าสูงกว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางตามความกว้างและตามความหนา ซึ่งเป็นทิศทางของเมตริก

ส่วนรูปการแทงทะลุผ่าน ณ เวลาต่างๆ ของกระสุน ทั้งสามแบบการจำลองมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นความหนาแน่นของความเค้นบริเวณการตรึงของแบบจำลองที่ตรึงขอบด้านบนและด้านล่างซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบการจำลองที่มีการตรึงลักษณะอื่นๆ โดยรูปความเร็วตกค้างของกระสุนเปรียบเทียบลักษณะการตรึงขอบแต่ละแบบ แสดงดังในรูปที่ 5.7 และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง แสดงดังรูปที่ 5.8





รูปที่ 5.7 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบที่การตั้งตามขอบแบบต่างๆ



รูปที่ 5.8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างระหว่างการตั้งขอบแบบต่างๆ กับแบบการตั้งรอบขอบ

จากรูปที่ 5.7 ความเร็วตกค้างของแบบจำลองที่มีการตรึงรอบขอบกับแบบจำลองที่ตรึงด้านข้างสองด้านมีค่าใกล้เคียงกันมากจนประมาณเป็นเส้นเดียวกัน โดยความแตกต่างของความเร็วตกค้างในกรณีการตรึงแบบต่างๆ มีค่าต่างกันน้อยมาก เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีการตรึงรอบขอบ ปรากฏว่าไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 5.8 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโมเมนต์คัม ขนาดรูปร่างของหัวกระสุน รวมทั้งความบาง รูปร่างและความยืดหยุ่นของวัสดุค้ำที่ได้กล่าวมาแล้ว

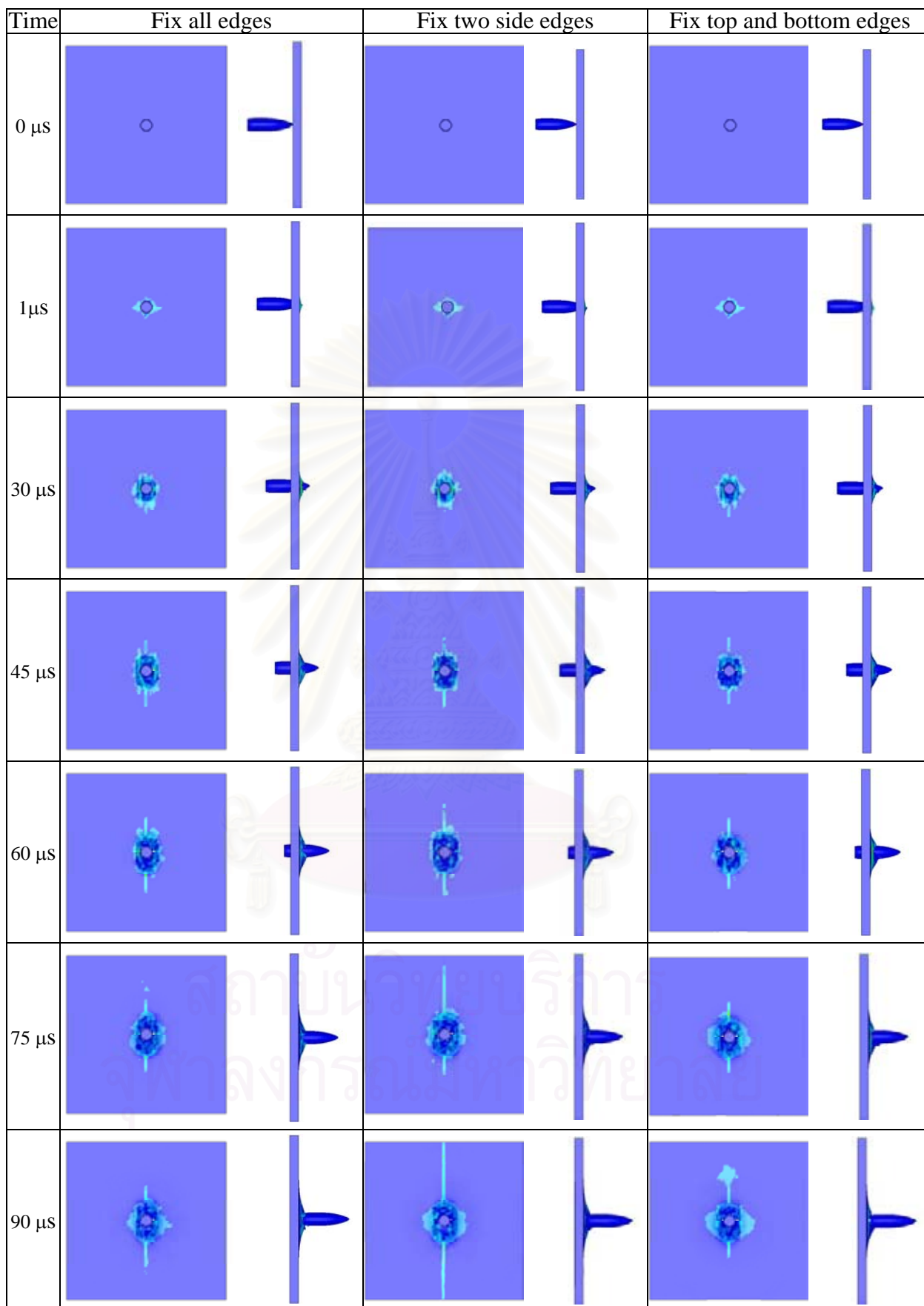
จากการที่แผ่นเป้าหมายมีความกว้างที่น้อยกว่าความยาว จนทำให้คลื่นความเค้นกระจายไปยังขอบด้านความกว้างและสะท้อนกลับก่อนที่จะกระจายไปถึงขอบด้านความยาว ทำให้เกิดการรวมกันของคลื่นความเค้น เกิดความซับซ้อน ไม่เป็นไปตามพฤติกรรมจริงของวัสดุ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้เพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเป้าหมายให้เท่ากับความยาวในที่นี้ คือ กว้างขนาด 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งได้แสดงลักษณะการกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความแข็งแรงของไฟเบอร์ทิศทางเดียว การเคลื่อนที่ของความเค้นจะเคลื่อนไปในทิศทางที่มีค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นมากกว่า (ตามยาว) ซึ่งเป็นทิศทางของไฟเบอร์ที่ได้กำหนดคุณสมบัติไว้ในแบบจำลอง (Fawaz *et al.*, 2004)

จากรูปที่ 5.9 การตรึงขอบของแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใหญ่กว่ามีผลต่อการกระจายความเค้นน้อยกว่าแผ่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือไม่ว่าจะตรึงแบบใด ทิศทางการกระจายของคลื่นความเค้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด นั่นคือกระจายไปตามทิศทางของไฟเบอร์(ตามยาว) มากกว่าทิศทางของเมตริก (ตามขวาง)

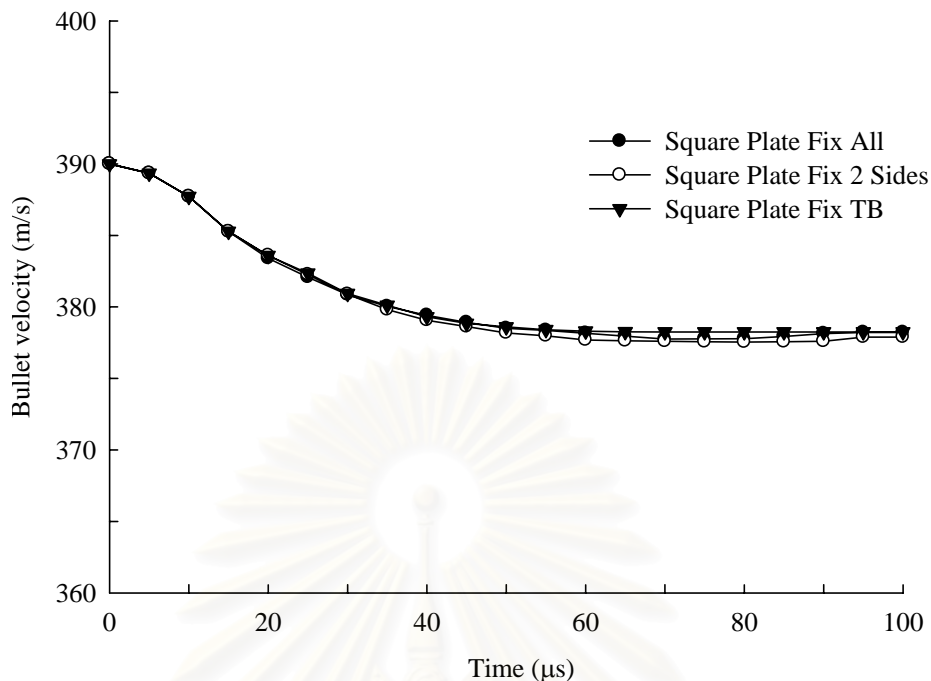
การกระจายของคลื่นความเค้นในแผ่นเป้าหมายที่มีการตรึงรอบขอบเมื่อเทียบที่เวลาเดียวกันกับการตรึงแบบอื่นๆ ปรากฏว่าการตรึงรอบขอบมีการกระจายและสะท้อนของคลื่นความเค้นน้อยกว่าการตรึงแบบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.9

ซึ่งถ้าพิจารณาความเร็วตกค้างทั้ง 3 กรณีนี้ แตกต่างกันน้อยมาก คิดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ โดยรูปความเร็วตกค้างทั้ง 3 กรณี และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างแสดงดังรูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.11

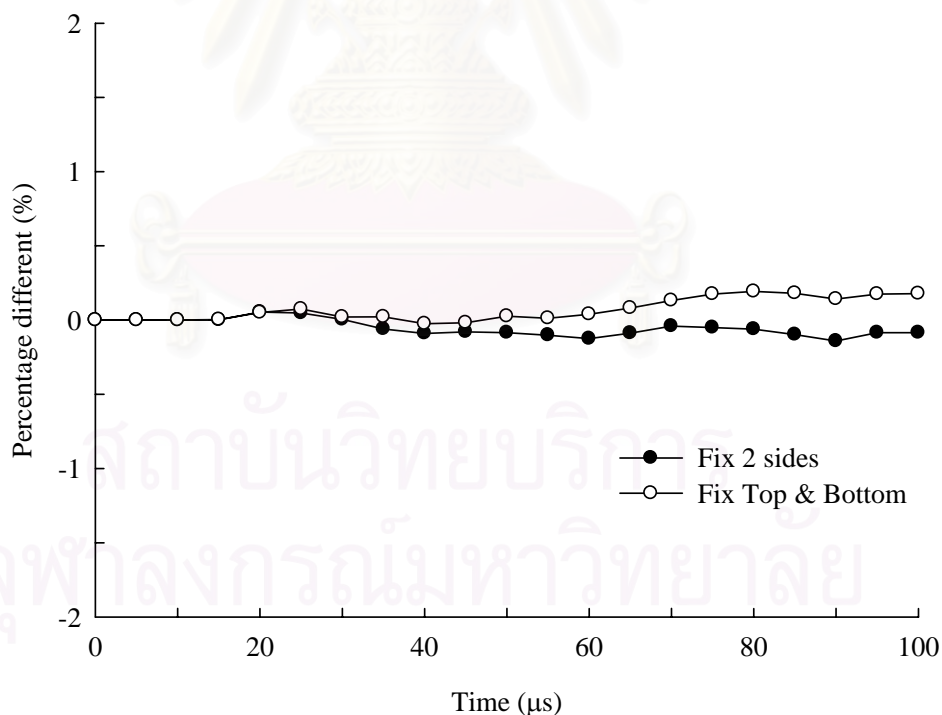
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบจัตุรัสที่การตรึงขอบแตกต่างกัน



รูปที่ 5.10 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่การตรึงตามขอบต่างๆ



รูปที่ 5.11 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างการตรึงขอบแบบต่างๆ กับแบบการตรึงรอบขอบ

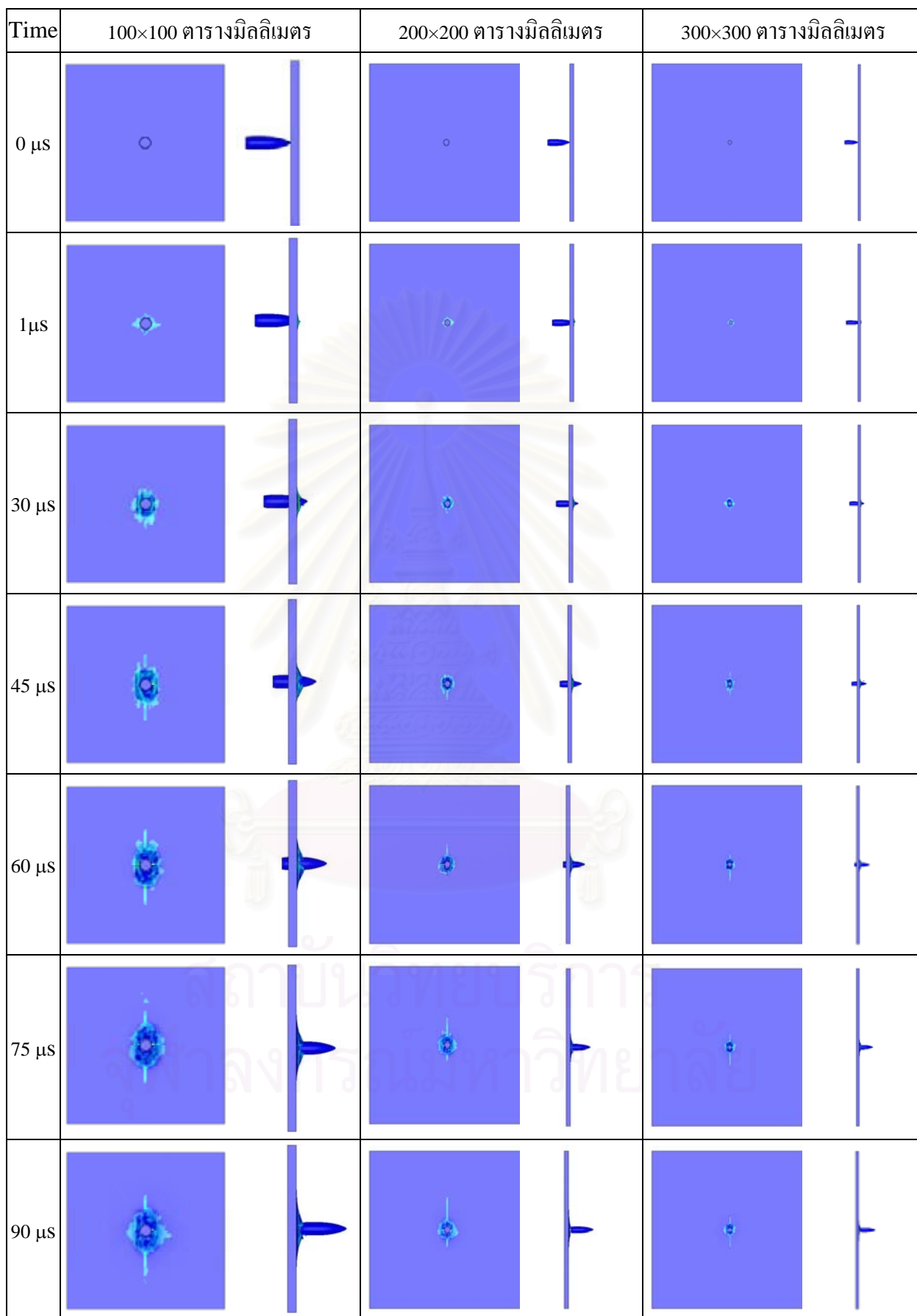
### 5.3 ผลกระทบจากขนาดและความหนาของแผ่นเป้าหมาย

จากหัวข้อที่ 5.2 ผลกระทบจากเงื่อนไขขอบเขตแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นและการเปรียบเทียบที่ผ่านมา ปรากฏว่าแผ่นเป้าหมายสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการตรึงรอบขอบมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากระยะที่อ่อนของคลื่นความเค้นเกิดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการตรึงรอบขอบอื่นๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้และต่อไปจึงใช้การตรึงแบบรอบขอบ

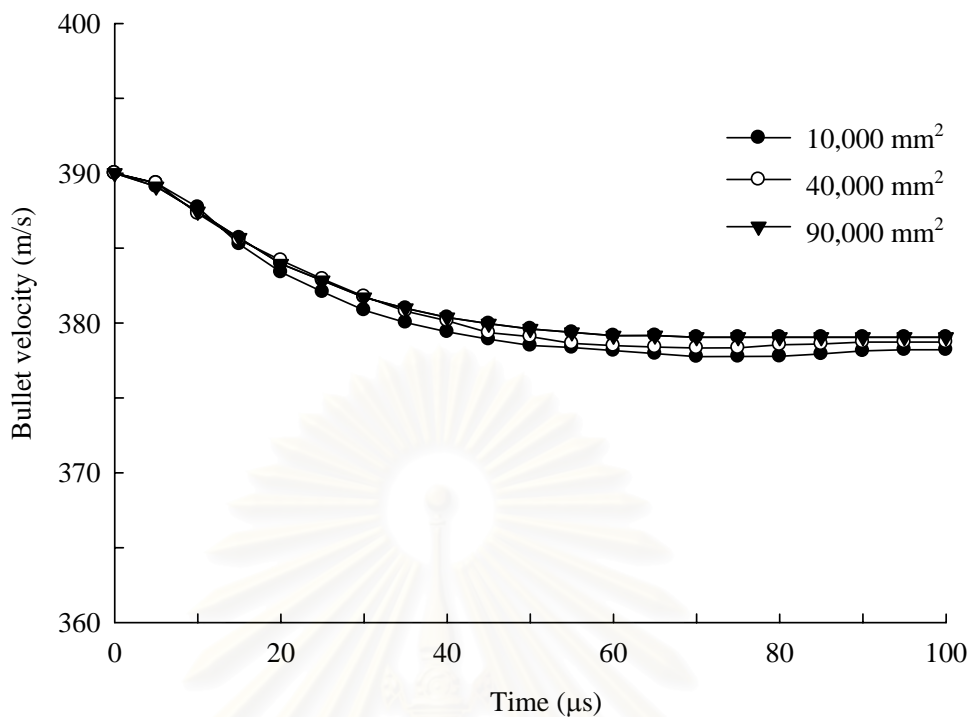
หัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลกระทบจากขนาดและความหนาของแผ่นคอมพอสิต โดยในขั้นแรกจะหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นเป้าหมายแล้วตามด้วยการปรับความหนา ซึ่งเริ่มจากเพิ่มขนาดของแผ่นเป้าหมายจัตุรัสจาก  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร เป็น  $200 \times 200$  ตารางมิลลิเมตร และ  $300 \times 300$  ตารางมิลลิเมตร ผลปรากฏว่าลักษณะแนวโน้มของคลื่นความเค้นแตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ส่วนความเร็วตกค้างแต่ละแบบการจำลองแตกต่างกับแบบจำลองที่แผ่นเป้าหมายขนาด  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร เพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดแผ่นคอมพอสิตเพียง  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับขนาดของแผ่นเป้าหมายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งแผ่นเป้าหมายขนาดที่เล็กกว่าจะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแผ่นเป้าหมายขนาดใหญ่หลายเท่า เนื่องจากการใช้ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากัน จำนวนเอลิเมนต์ของแผ่นเป้าหมายขนาดใหญ่จึงมีค่ามากขึ้นเป็นเท่าทวีคูณของแผ่นเป้าหมายขนาดเล็ก

จากเรื่องขนาดที่กล่าวมาแล้ว การเพิ่มความหนาของแผ่นเป้าหมาย จึงใช้แผ่นขนาด  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร และเพิ่มความหนาเป็น 10 มิลลิเมตร, 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงการกระจายของคลื่นความเค้น และการแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมาย ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ความหนา 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร คลื่นความเค้นเกิดน้อยกว่า ที่ความหนา 10 มิลลิเมตร เนื่องจากที่ความหนาของแผ่นเป้าหมายมากขึ้น จะช่วยลดซับพลังงานการกระแทกผ่านไปยังความหนาช่วยลดความเร็วของหัวกระสุนดังรูปที่ 5.16 แสดงความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ลดลงหลังจากทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายที่ความหนาต่างๆ เป็นสัดส่วนกับความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยที่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเปรียบเทียบกับความหนา 5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5.17 ความแตกต่างสูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของหัวกระสุน รวมทั้งความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของแผ่นเป้าหมาย ซึ่งผลการจำลองที่ความหนา 20 มิลลิเมตร ความเร็วตกค้างก็ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) และ Gu and Li (2005) โดยที่ไม่ใช้สมการอนุพันธ์พลังงานมาใช้ในการคำนวณ แต่ส่วนนี้ต่างกันที่มุมปะทะและขนาดของแผ่นเป้าหมาย จึงทำให้ผลของความเร็วตกค้างแตกต่างกันเล็กน้อย

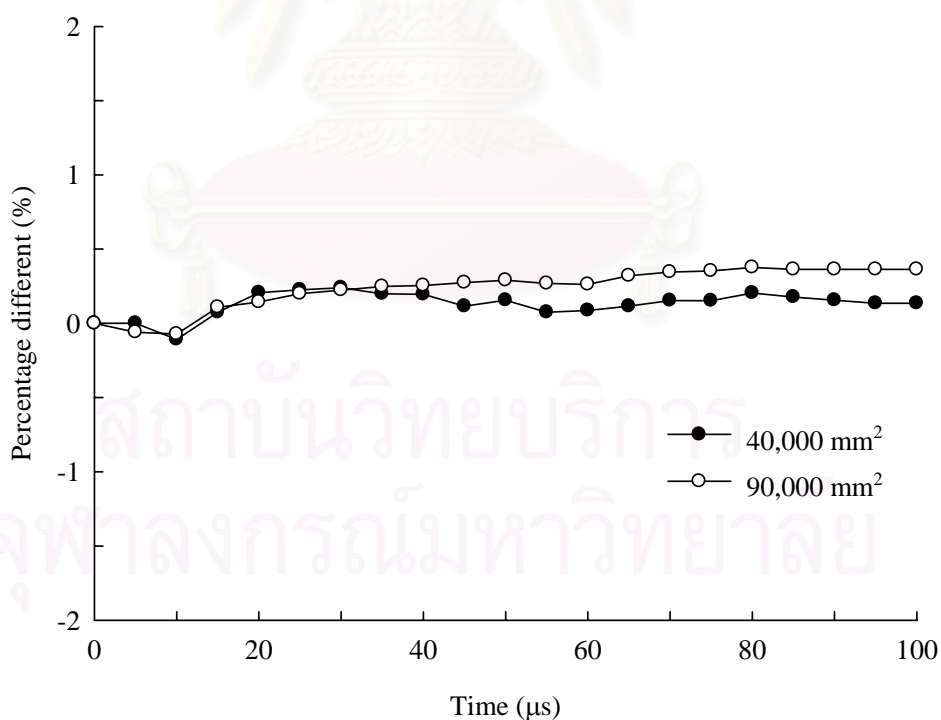




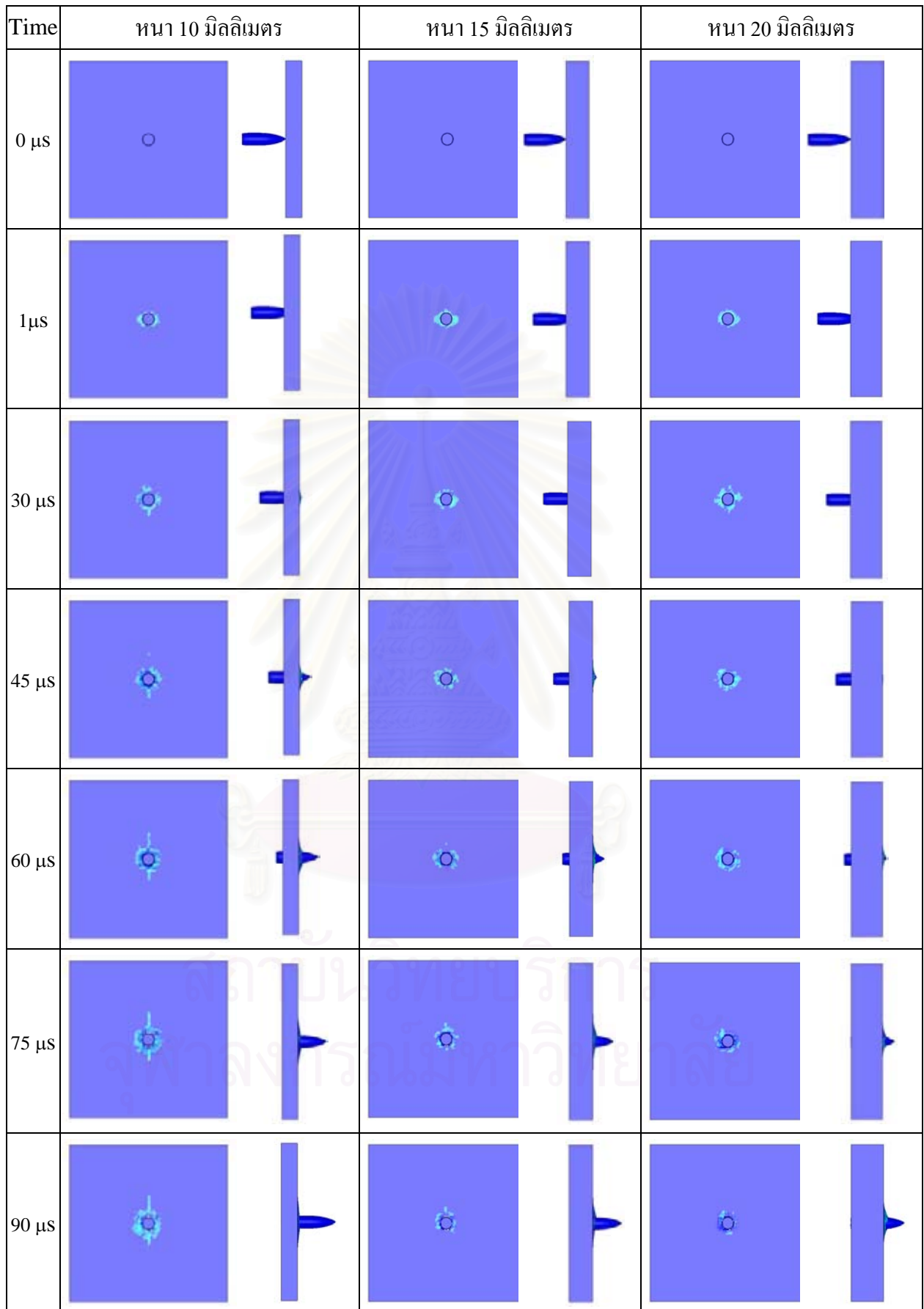
รูปที่ 5.12 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาดแตกต่าง



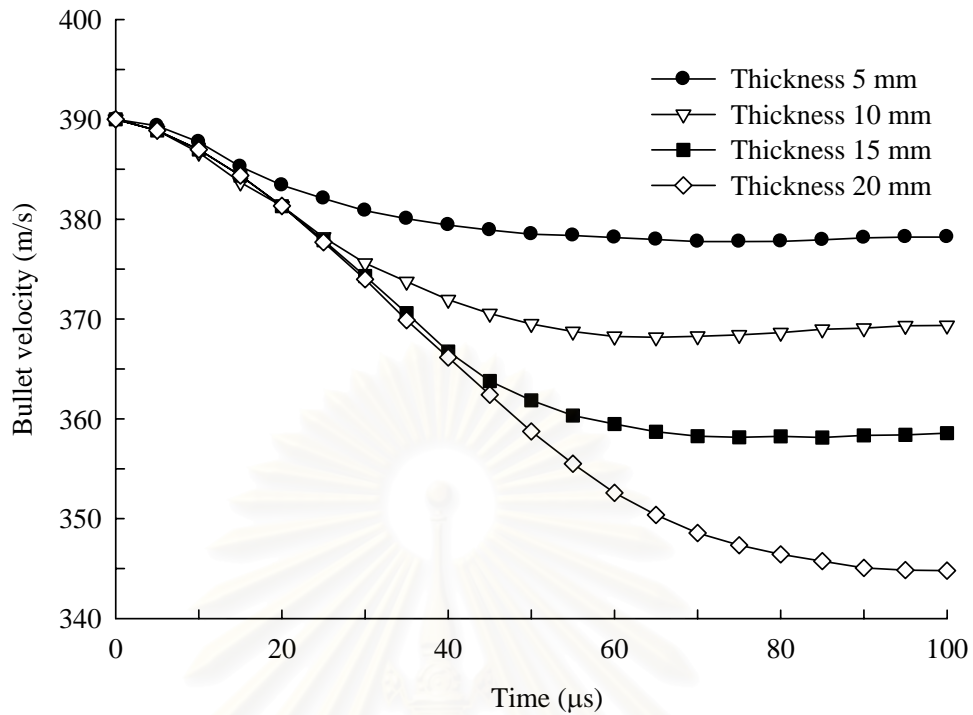
รูปที่ 5.13 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่ขนาดแตกต่างกัน



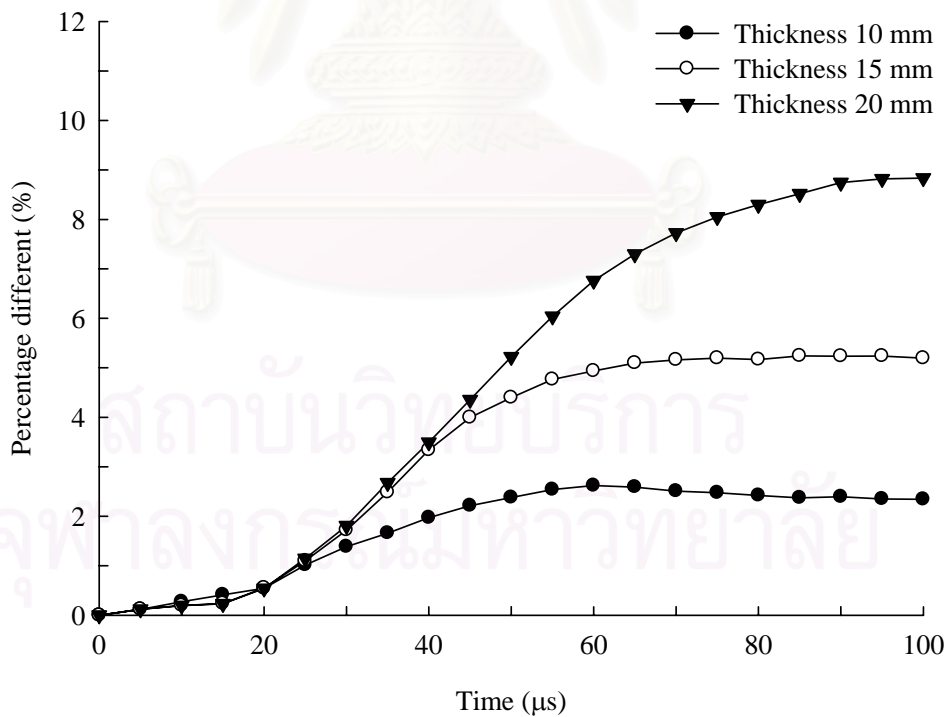
รูปที่ 5.14 เปอร์เซนต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างขนาด 200×200 ตารางมิลลิเมตร และ 300×300 ตารางมิลลิเมตร กับขนาด 100×100 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 5.15 การกระจายของคลื่นความเค้นบนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ความหนาต่างกัน



รูปที่ 5.16 ความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ความเร็วกระแทก 390 เมตรต่อวินาที บนแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปรียบเทียบที่ความหนาแตกต่างกัน



รูปที่ 5.17 เปอร์เซนต์ความแตกต่างความเร็วตกค้างของหัวกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสระหว่างความหนา 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร กับความหนา 5 มิลลิเมตร

## 5.4 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากรูปร่างหรือปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองทางชีวเคมีว่ามีผลมากน้อยเพียงใดโดยได้สรุปเป็นข้อต่างๆ ดังนี้

1. ความเร็วตกค้างมีค่าสูงขึ้นเมื่อมุมปะทะระหว่างกระดูกกับแผ่นเป่าหายใจเข้าใกล้มุมตั้งฉาก เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างกระดูกกับแผ่นเป่าหายใจเข้ามีค่าน้อยลง

2. การตรึงรอบขอบแผ่นเป่าหายใจเข้ามีความเหมาะสมสำหรับการจำลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับการตรึงแบบอื่นๆ เนื่องจากการตรึงรอบขอบทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นความเค้นน้อยที่สุดในกรณีแผ่นเป่าหายใจเข้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด

3. แผ่นเป่าหายใจเข้าขนาดเล็กซึ่งเป็นที่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นความเค้นที่สูงมากกว่าแผ่นเป่าหายใจเข้าขนาดใหญ่ซึ่งเป็นที่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากแผ่นเป่าหายใจเข้าขนาดใหญ่ที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีพื้นที่มากกว่าในการเคลื่อนที่ของคลื่นความเค้น อย่างไรก็ตามขนาดแผ่นเป่าหายใจเข้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใหญ่มากก็ไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกับแผ่นเป่าหายใจเข้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดพอเหมาะ ในที่นี้จึงเลือกใช้แผ่นเป่าหายใจเข้าสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร

4. ความหนาของแผ่นเป่าหายใจเข้ามีผลกระทบโดยตรงเป็นอัตราส่วนผกผันกับความเร็วตกค้างของกระดูก ที่ยิ่งหนาก็ยังสามารถต้านการแทงทะลุผ่านของกระดูกได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม นอกจากที่แสดงมาทั้งหมดแล้วปัจจัยต่างๆ ยังขึ้นอยู่กับ ขนาดของหัวกระดูก ความเร็วเริ่มต้นของหัวกระดูก คุณสมบัติของวัสดุแผ่นเป่าหายใจเข้า คุณสมบัติของวัสดุกระดูกในแบบจำลองที่อาจกำหนดให้เป็นแบบเปลี่ยนรูปร่างได้ (Deformable) รวมทั้งข้อสมมติฐานต่างๆ ที่ตั้งขึ้นเพื่อใช้กับแบบจำลอง เช่น การตัดพลังงานความร้อน พลังงานจากเสียง หรือ พลังงานที่สูญเสียในแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นขณะการปะทะของกระดูกออกจากการคำนวณ เพื่อความสะดวกรวดเร็วและง่ายขึ้นในการคำนวณ ดังนั้นในการพิจารณาที่จะใช้กับรูปแบบอื่นๆ ควรต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วเหล่านี้ เพื่อความถูกต้องและใกล้เคียงของแบบจำลองกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น รวมทั้งความเหมาะสมอื่นๆ ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 6

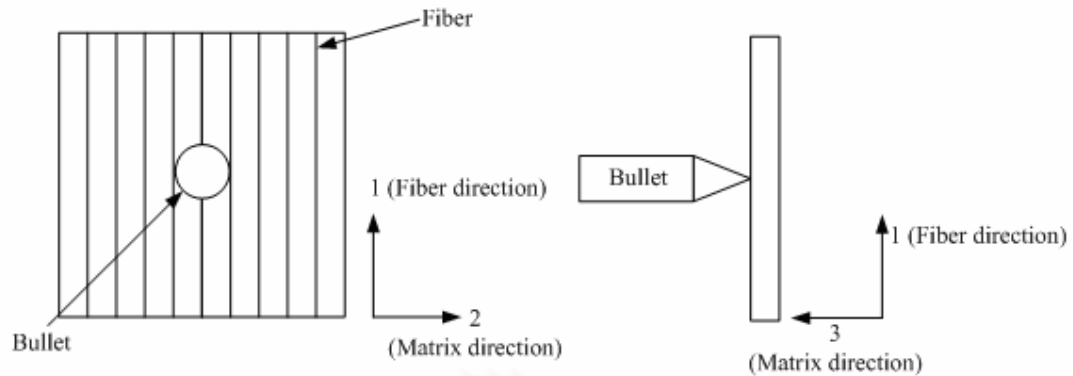
### ผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลในแผ่นคอมพอสิต

จากบทที่ 5 ทำให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยภายนอกว่ามีผลกระทบต่อแบบจำลองทางชีวปมมากน้อยเพียงใด เงื่อนไขขอบเขตใดมีความเหมาะสมมากที่สุด ต่อมาในบทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เชิงกลว่า พารามิเตอร์ตัวใดมีผลกระทบต่อแบบจำลองมากที่สุด กล่าวให้ชัดเจน คือ บทนี้จะทำการปรับค่าคุณสมบัติของคอมพอสิต คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งแรง เพื่อศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นในแบบจำลองว่าคุณสมบัติตัวใดมีผลทำให้แผ่นคอมพอสิตแข็งแรงขึ้น ยืดหยุ่นขึ้น หรือ มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

จากบทที่ 2 ในเรื่องทฤษฎีของคอมพอสิตทำให้พอจะประมาณได้เบื้องต้นว่าคุณสมบัติตัวใดมีผลต่อความแข็งแรง หรือ ความยืดหยุ่นของแผ่นคอมพอสิตมากที่สุด กล่าวคือ สำหรับความยืดหยุ่น พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุด คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นหรือค่าต่างๆ ที่อยู่ใน Stiffness matrix ส่วนความแข็งแรง ในที่นี้ได้ใช้หลักความเสียหายจากแบบวัสดุที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ค่าความแข็งแรงจึงขึ้นอยู่กับหลักความเสียหายที่เลือกใช้ ดังนั้น ในบทนี้จะได้แยกการศึกษาพารามิเตอร์ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าของความแข็งแรง และในตอนท้ายของบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีที่จะปรับค่าคุณสมบัติทางกลต่างๆ เหล่านี้ในการผลิตแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิตให้ได้ความยืดหยุ่นหรือ ความแข็งแรงตามที่ต้องการ

#### 6.1 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่น

จากแบบจำลองต้นแบบที่ใช้รูปแบบการจำลองและคุณสมบัติของวัสดุของ Gu and Xu (2004) ซึ่งเป็นวัสดุแบบความแข็งแรงทิศทางเดียว ดังนั้นในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้จึงได้แยกศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นตามทิศทางของไฟเบอร์ ในที่นี้ได้แก่มอดูลัสตามทิศทางที่ 1 และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นตามทิศทางของเมตริกได้แก่ ทิศทางที่ 2 และ 3 โดยทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกของคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว แสดงดังในรูปที่ 6.1



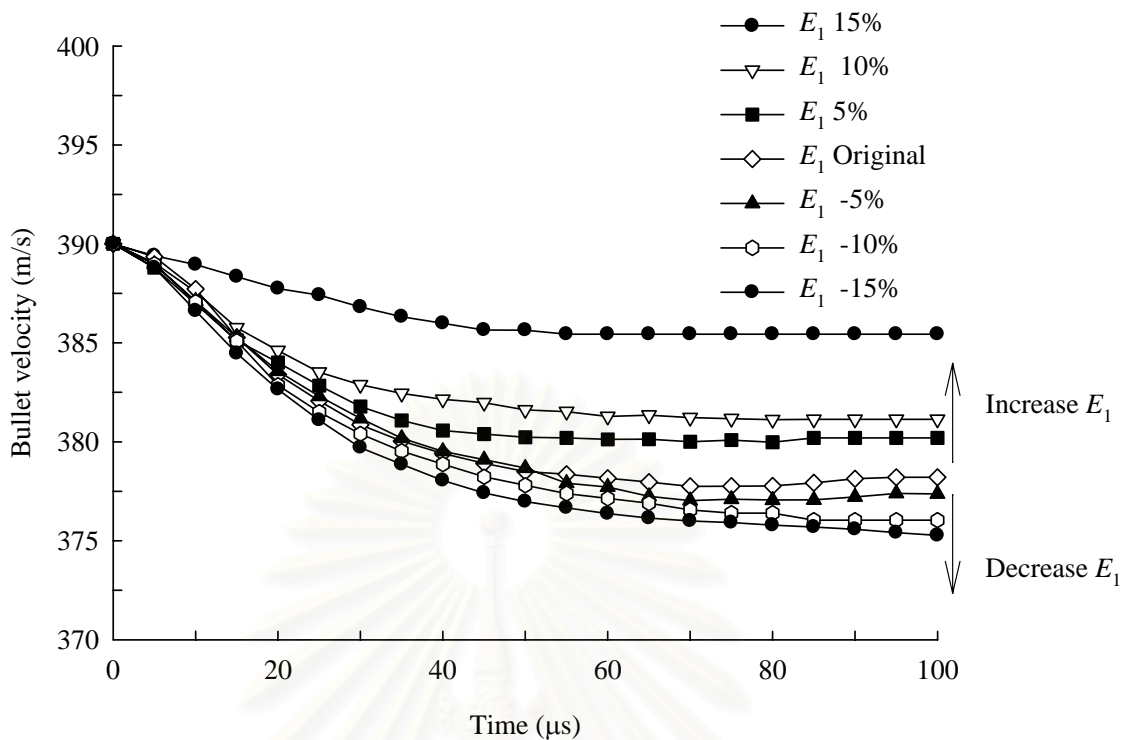
รูปที่ 6.1 ทิศทางของไฟเบอร์และเมทริกในแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว

การปรับค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นนั้นได้กำหนดให้ค่าอัตราส่วนปัวซองของคงที่แล้วปรับค่ามอดูลัสความเค้นเหมือนตามจากสูตรความสัมพันธ์ของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นกับค่ามอดูลัสความเค้นเหมือนตามทฤษฎีความสัมพันธ์ของวัสดุในบทที่ 2 โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ ยังคงไว้ดังเดิม จากนั้นเป็นการปรับให้คอมพอสิตมีความการวางตัวของไฟเบอร์สองทิศทาง และศึกษาผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นเช่นเดียวกัน

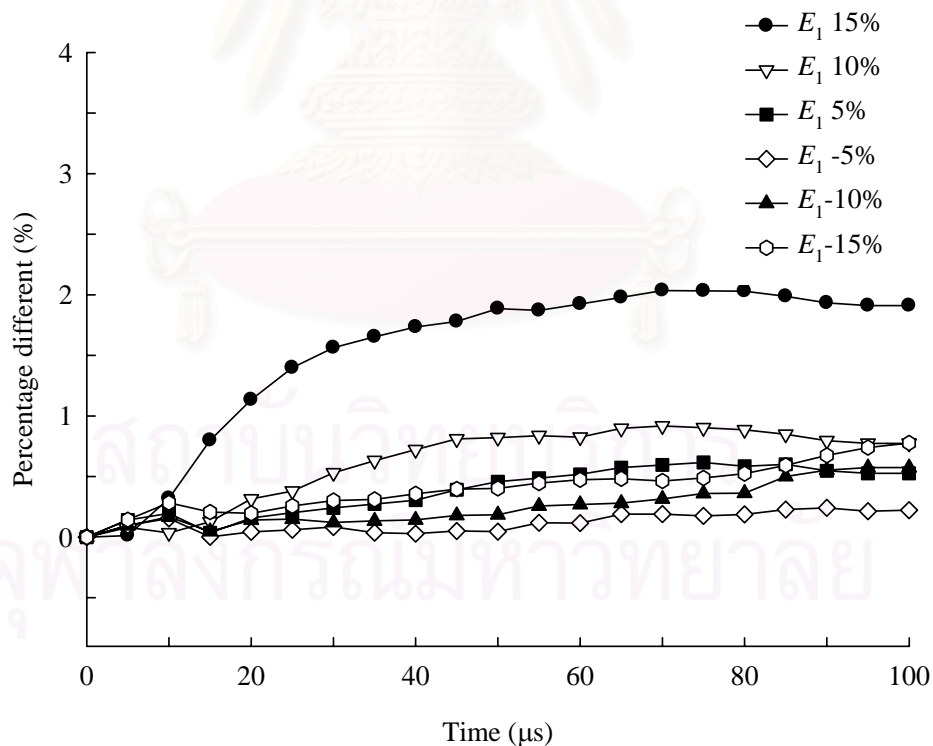
### 6.1.1 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบทิศทางเดียว

ทิศทางของไฟเบอร์ถือว่ามีความสำคัญมากสำหรับวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากเป็นทิศที่มีความแข็งแรงที่สุด และเป็นทิศทางที่ใช้ในการรับแรงของคอมพอสิตส่วนใหญ่ แต่สำหรับแบบจำลองทางขีปนาวุธในที่นี่ ทิศทางของไฟเบอร์ไม่ได้เป็นทิศทางในการรับแรงกระทำโดยตรง แต่ช่วยรับแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับทิศที่กระสุนวิ่งเข้าปะทะ การปรับค่าจึงได้กำหนดให้มีค่าเพิ่มและลดค่าอย่างละไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองแสดงเป็นผลของความเร็วตกค้างของกระสุนแสดงดังรูปที่ 6.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.2 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

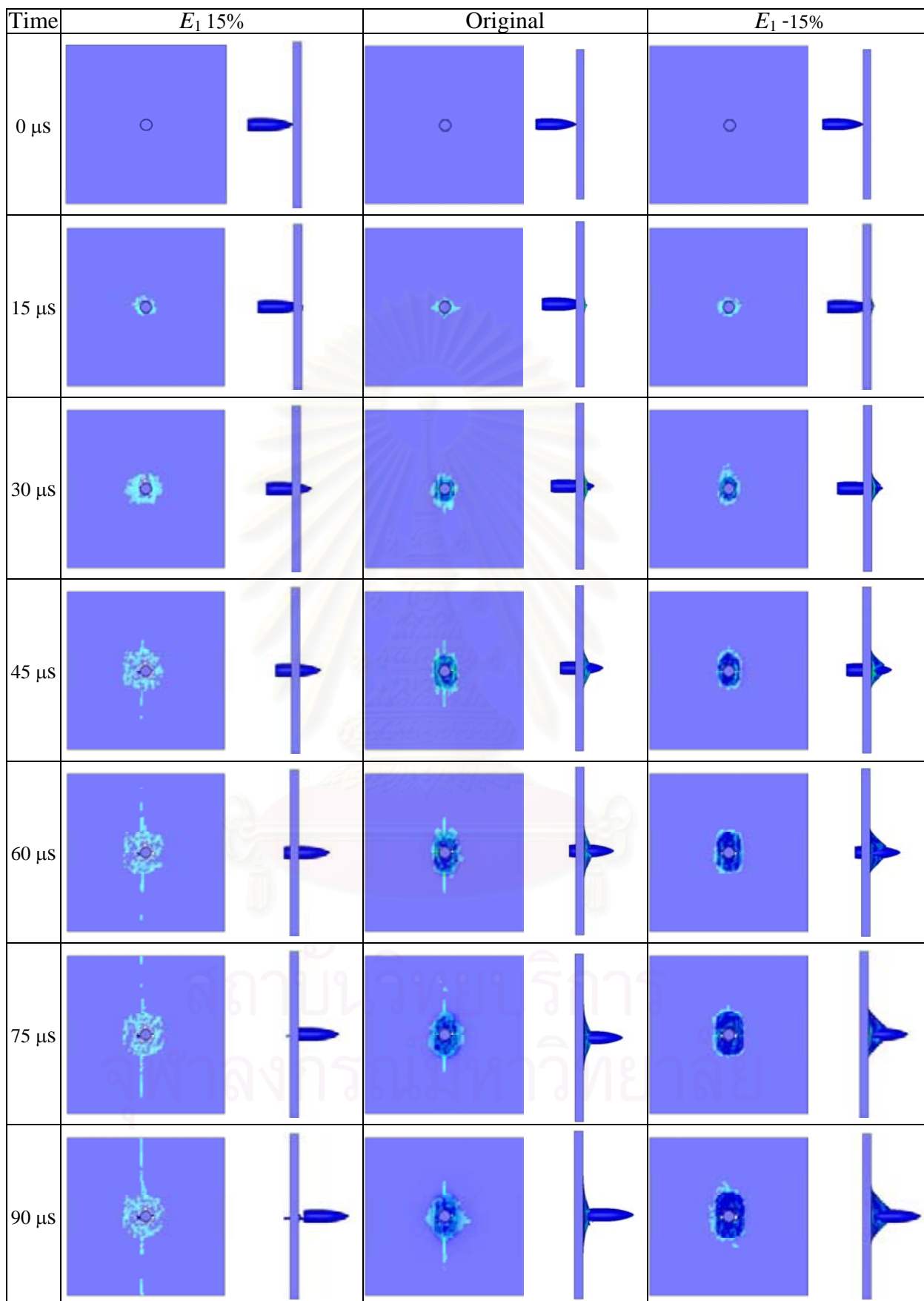


รูปที่ 6.3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ เพียง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำให้ความเร็วตกค้างเพิ่มขึ้น โดยการปรับเพิ่มที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วตกค้าง เกิดสูงที่สุดห่างจากแบบจำลองต้นแบบประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และห่างจากการปรับเพิ่มที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ อย่างชัดเจน ซึ่งการปรับเพิ่มที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ต่างกับแบบจำลองเดิมไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 6.3 และกลับกันสำหรับการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ทำให้ความเร็วตกค้างลดลง

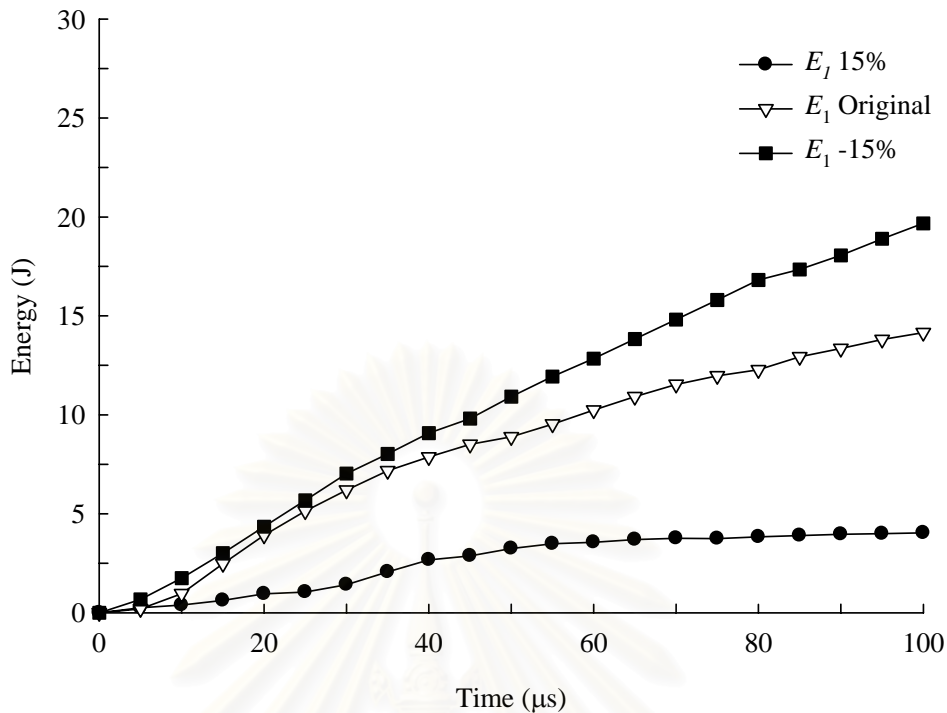
การเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นทำให้ความเร็วตกค้างของกระสุนเพิ่มขึ้น หรือการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นทำให้ความเร็วตกค้างลดลงนั้น เนื่องมาจากการเพิ่มมอดูลัสความยืดหยุ่นในแนวไฟเบอร์โดยยังคงให้ค่าความแข็งแรงในทุกทิศทางเท่าเดิม ทำให้แผ่นคอมพอสิตสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป LS-DYNA ที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 มีความยืดหยุ่นน้อยลง สังเกตได้จากรูปที่ 6.4 บริเวณที่กระสุนปะทะและทะลุผ่านเปรียบเทียบกับกระสุนผ่านของกระสุนที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น จะเห็นได้ว่าการปรับให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมากขึ้น แผ่นคอมพอสิตไม่มีการยึดติดไปกับกระสุนด้วย ต่างกับแบบจำลองเดิมอย่างชัดเจนที่แผ่นคอมพอสิตจะยึดติดไปกับกระสุนเล็กน้อยขณะกระสุนแทงทะลุผ่าน และในทางกลับกันสำหรับการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ยังคงความแข็งแรงทุกค่าให้เท่าเดิม ทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความต้านทานระหว่างผิวกระสุนกับแผ่นคอมพอสิตมากขึ้น กระสุนจึงทะลุผ่านได้ยากขึ้น

โดยเมื่อลองคำนวณย้อนกลับหาค่าความเครียดจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์เอลิเมนต์หนึ่งผ่าน Stiffness matrix ที่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ปรากฏว่า การเพิ่มเพียงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่ 1 ในที่นี้ไม่ทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 2 และ 3 เปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ความเครียดในทิศทางที่ 1 ลดลง ซึ่งหมายความว่า พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าน้อยลง เนื่องจากวัสดุรับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยลง เมื่อรับพลังงานได้น้อยลงการรับการถ่ายเทพลังงานจลน์จากกระสุนจึงน้อยลงส่งผลให้พลังงานจลน์ของกระสุนยังมีค่าสูงความเร็วตกค้างจึงสูง ซึ่งอธิบายกลับกันสำหรับการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ทำให้พลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมายเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ของกระสุนจึงลดลงและความเร็วกระสุนลดลงตามกัน โดยพลังงานภายในหรือพลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมายสอดคล้องกัน ทั้งการเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 6.5 เปรียบเทียบกับการแบบจำลองเดิมที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยผลการจำลองที่การปรับค่าทั้งหมดจะเห็นได้ว่า คลื่นความเค้นยังคงเกิดขึ้นสูงในทิศทางที่ 1 ซึ่งเป็นทิศทางของไฟเบอร์เช่นเดิม



รูปที่ 6.4 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น (ซ้าย) และลดลง (ขวา) 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น





รูปที่ 6.5 พลังงานความเครียดของแผ่นเป่าหมาจกการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ

### 6.1.2 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว

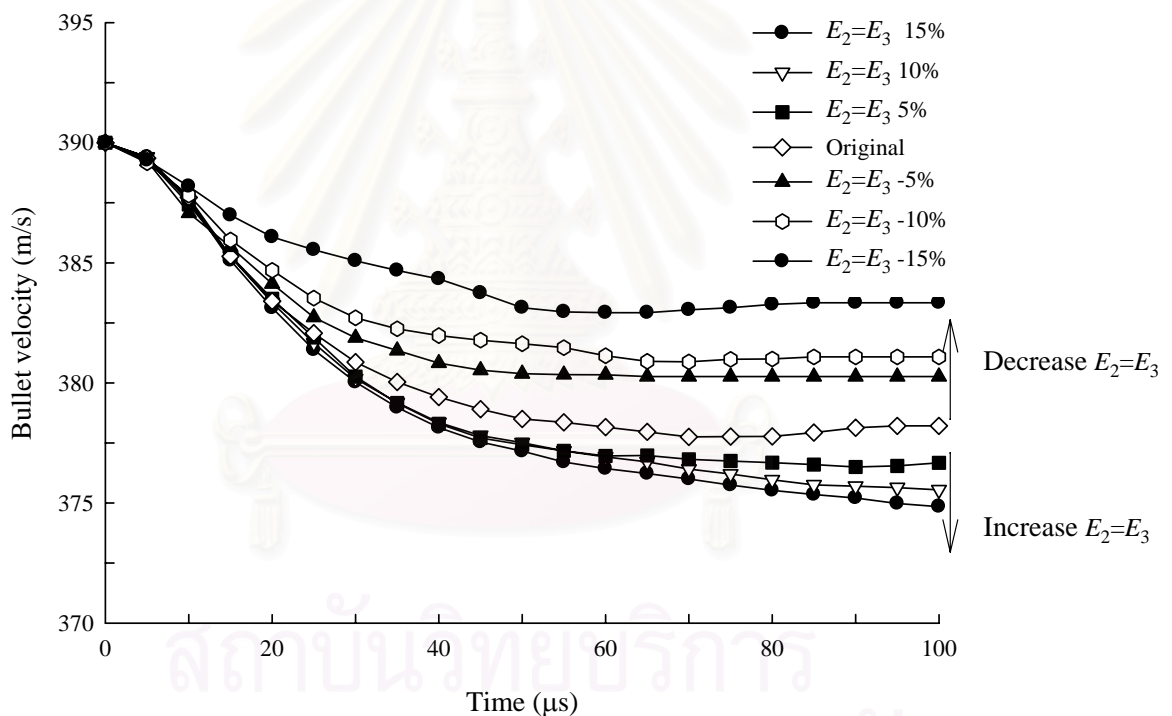
เพื่อความสอดคล้องในการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของแผ่นคอมพอสิต การปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริก จึงได้ทำการปรับเช่นเดียวกันกับการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ คือ เพิ่มและลดอย่างละไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์

ผลการจำลองปรากฏว่า ความเร็วตกค้างมีค่ากลับกันกับการปรับค่าในทิศทางของไฟเบอร์ กล่าวคือ การปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกทำให้ความเร็วตกค้างลดลง โดยที่การเพิ่ม 15 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วตกค้างลดลงเล็กน้อย แม้จะไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ก็ตาม หรือ การปรับลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกให้ลดลง ทำให้ผลของความเร็วตกค้างเพิ่มขึ้นไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 6.6 และ 6.7

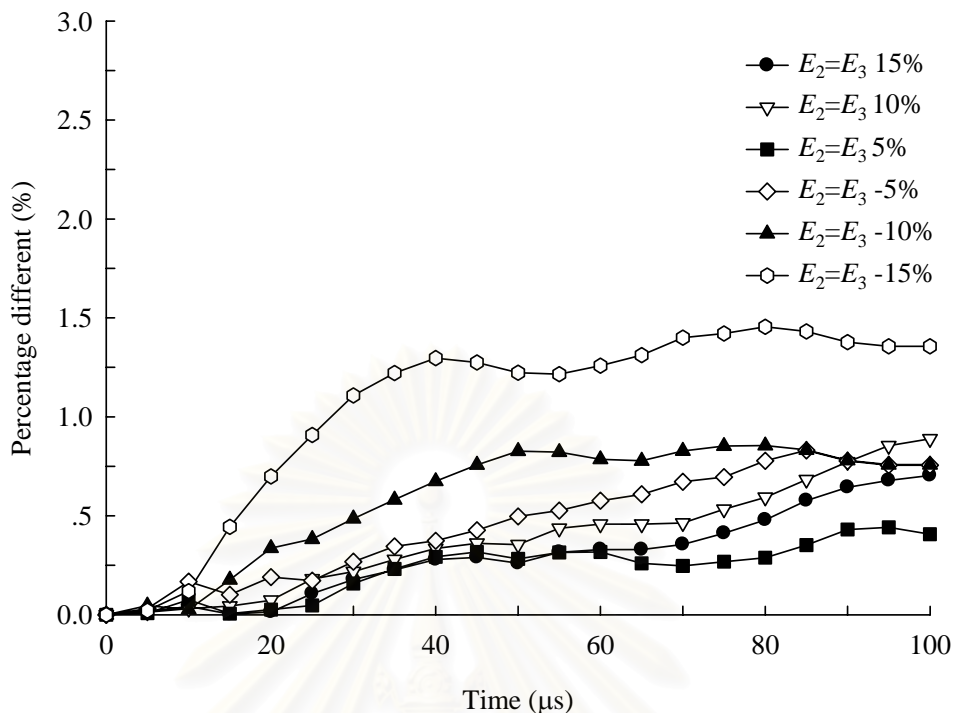
เมื่อพิจารณาการรับแรงปะทะจากกระสุนของแผ่นคอมพอสิต โดยรับแรงในทิศทางที่ 3 ซึ่งเป็นทิศทางของเมตริกนั้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่รับแรงปะทะโดยตรงเช่นนี้ เป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับแผ่นคอมพอสิต ซึ่งเมื่อลองพิสูจน์ด้วยวิธีที่คล้ายกันกับหัวข้อที่ 6.1.1 โดยใช้เอลิเมนต์เดียวกัน ปรากฏว่า การเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่ 2 และ 3 ไม่ทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 2 และ 3 เพิ่มขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า พลังงานภายในจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในทิศทาง

ที่ 2 และ 3 มีค่ามากขึ้น คุณดซับแรงปะทะจากกระสุนซึ่งเป็นพลังงานจลน์ได้มากขึ้น ทำให้ความเร็วตกค้างของกระสุนลดลง โดยรูปพลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายเปรียบเทียบกับที่การปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น แสดงดังในรูปที่ 6.8 และอธิบายกลับกันในส่วนของการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่ 2 และ 3

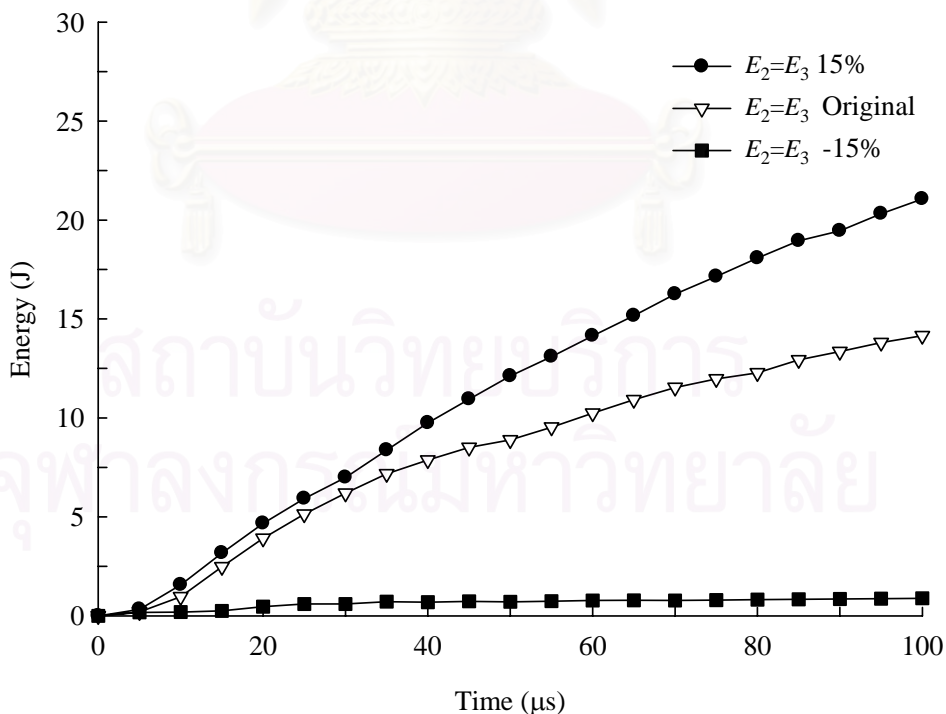
การยืดของคอมพอสิตมีความสอดคล้องกันตามการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ที่แผ่นคอมพอสิตจะยึดติดไปกับกระสุนขณะแทงทะลุผ่าน ทำให้กระสุนแทงทะลุผ่านได้ยากขึ้นความเร็วตกค้างจึงลดลง แตกต่างกับการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกที่ทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นน้อยลง ทำให้ไม่มีส่วนของแผ่นคอมพอสิตยึดติดไปกับกระสุนขณะแทงทะลุผ่าน ความเร็วตกค้างจึงสูงขึ้นกว่าแบบจำลองต้นแบบที่ลักษณะการยึดอยู่ในระดับที่ปรกติ ความสอดคล้องดังกล่าวอธิบายได้ด้วยเหตุผลของพลังงานภายในของวัสดุในส่วนก่อนหน้า



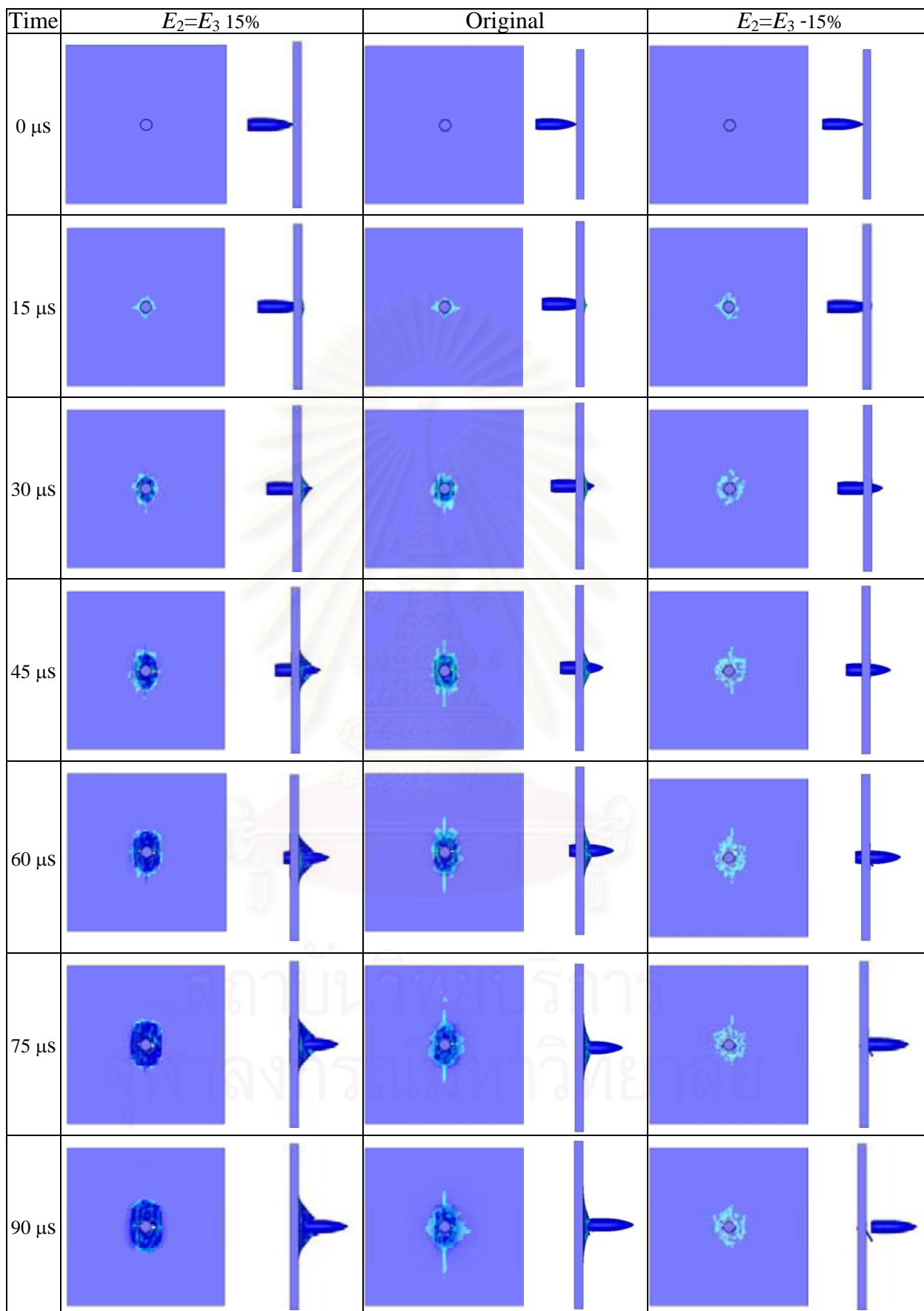
รูปที่ 6.6 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกอย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.7 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกอย่างละ 5 10 และ 15 เปรอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.8 พลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริก 15 เปรอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ

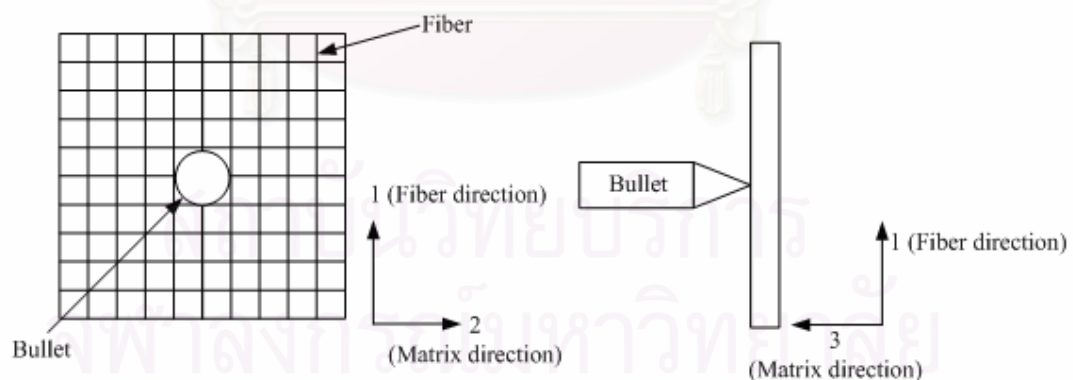


รูปที่ 6.9 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น (ซ้าย)และลดลง (ขวา) 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

### 6.1.3 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบสองทิศทาง

เนื่องจากคอมพอสิตส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตเกราะกันกระสุนเป็นคอมพอสิตแบบสองทิศทาง กล่าวคือ ในชั้นของคอมพอสิตจะมีการวางตัวของเส้นใยไฟเบอร์ทั้งแนวยาวและแนวขวางในแนวระนาบของแผ่น หรือมีการสานกันของเส้นใยไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมในการใช้งานจริงสำหรับเกราะกันกระสุน จึงได้ทำการปรับค่าคอมพอสิตจากไฟเบอร์ทิศทางเดียวเป็นไฟเบอร์สองทิศทาง โดยปรับด้วยวิธีการเปลี่ยนค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเมตริกในทิศทางที่สองซึ่งเป็นทิศทางตามขวางของแผ่น ให้มีค่าเท่ากับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของไฟเบอร์ในทิศทางที่หนึ่งซึ่งเป็นทิศทางตามยาวของแผ่น และปรับค่าอัตราส่วนปัวซองและค่ามอดูลัสความเค้นเฉือนให้สอดคล้องกับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยทั้งนี้การปรับค่าต่างๆ เหล่านี้ไม่ได้คำนึงถึงค่า Volume fraction ของแผ่นคอมพอสิต

การปรับค่าต่างๆ เช่นนี้ เป็นเพียงในอุดมคติ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านข้อมูลของคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นให้มีค่าเท่ากันในแนวระนาบทั้งสองทิศทางเช่นนี้ ในความเป็นจริงอาจมีผลทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางด้านความหนามีการเปลี่ยนแปลง หรือแม้กระทั่งค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในแนวระนาบเองที่ไม่อาจคงให้เท่ากับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในตอนที่เป็นคอมพอสิตแบบไฟเบอร์ทิศทางเดียวได้ ส่วนค่าความแข็งแรงได้ปรับเพียงความแข็งแรงในทิศทางของไฟเบอร์ในระนาบให้เท่ากัน สอดคล้องกับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่เป็นแบบสองทิศทางในแนวระนาบ ซึ่งการปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ทิศทางของไฟเบอร์และเมตริกในแผ่นคอมพอสิตแบบสองทิศทาง

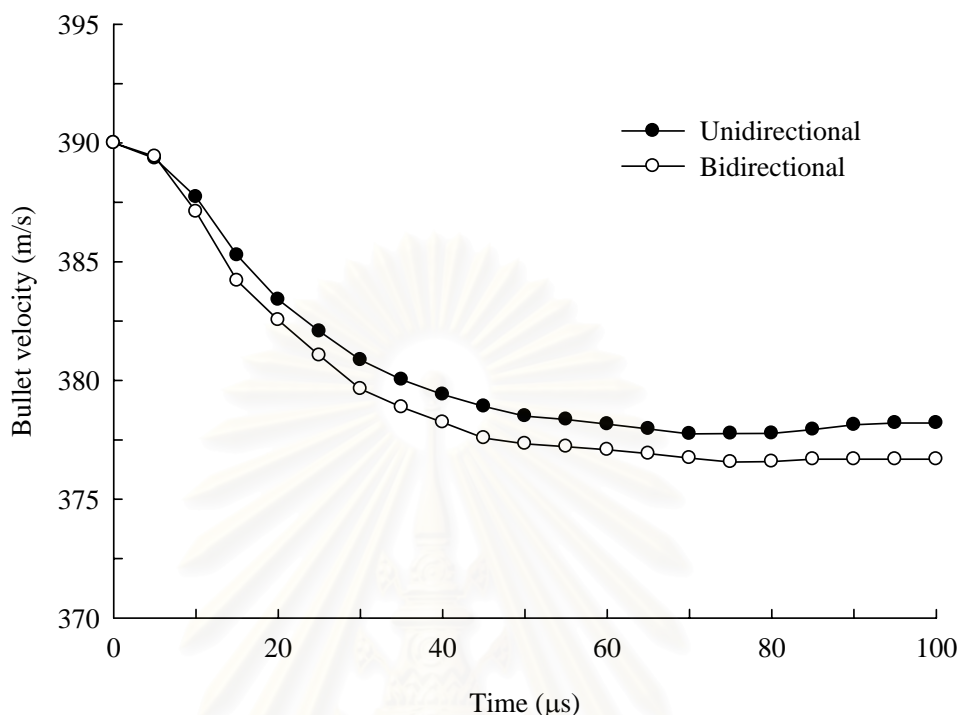


ตารางที่ 6.1 การปรับค่าคุณสมบัติคอมพอสิตจากทิศทางเดียวเป็นสองทิศทาง

Properties	Unidirectional	Bidirectional
$E_1$ (Young's modulus-Longitudinal direction), GPa	20.44	20.44
$E_2$ (Young's modulus-Transverse direction), GPa	8.9	20.44
$E_3$ (Young's modulus-Normal direction), GPa	8.9	8.9
$\nu_{21}$ (Poisson's ratio 21)	0.31	0.49
$\nu_{31}$ (Poisson's ratio 31)	0.31	0.31
$\nu_{32}$ (Poisson's ratio 32)	0.49	0.31
$G_{12}$ (Shear modulus12), GPa	1.64	6.84
$G_{23}$ (Shear modulus23), GPa	3.03	1.64
$G_{31}$ (Shear modulus31), GPa	1.64	1.64
$T_1$ (Longitudinal tensile strength), GPa	1.145	1.145
$T_2$ (Transverse tensile strength), GPa	0.13	1.145
$T_3$ (Normal tensile strength), GPa	0.13	0.13
$C_1$ (Longitudinal compressive strength), GPa	0.65	0.65
$C_2$ (Transverse compressive strength), GPa	0.65	0.65
$C_3$ (Normal compressive strength), GPa	0.65	0.65
$S_{12}$ (In plane shear strength), GPa	0.39	0.39
$S_{31}$ (Shear strength, 31 plane), GPa	0.39	0.39
$S_{32}$ (Shear strength, 32 plane), GPa	0.39	0.39
$\rho$ (Mass density), kg/m <sup>3</sup>	1230	1230

ผลการจำลองปรากฏว่าความเร็วตกค้างของกระสุนจากการทะลุผ่านแผ่นคอมพอสิตแบบสองทิศทางมีค่าต่ำกว่าความเร็วตกค้างของกระสุนจากแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว จากการเพิ่มทิศทางของไฟเบอร์ให้กับแผ่นคอมพอสิตในทิศทางที่สองตามแนวระนาบ แผ่นคอมพอสิตจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้รับแรงปะทะกระสุนได้มากขึ้น แม้ผลที่ได้จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากโมเมนต์ดัดของกระสุนที่สูง เพียงการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในแนวระนาบให้เท่ากันจึงไม่ทำให้ความเร็วตกค้างของกระสุนแตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูป 6.11 ส่วนการกระจายของคลื่นความเค้นมีการกระจายออกทุกทิศทางเป็นวงกลมจากจุดที่ปะทะ จากผลที่มีไฟเบอร์สองทิศทางในแนวระนาบ แสดงดังรูปที่ 6.14 แตกต่างกับแผ่นคอมพอสิต

แบบทิศทางเดียวอย่างชัดเจน ที่การกระจายของคลื่นความเค้นเกิดขึ้นเพียงในทิศทางของไฟเบอร์ทิศทางเดียวเท่านั้น (Kumrungsie *et al.*, 2007)

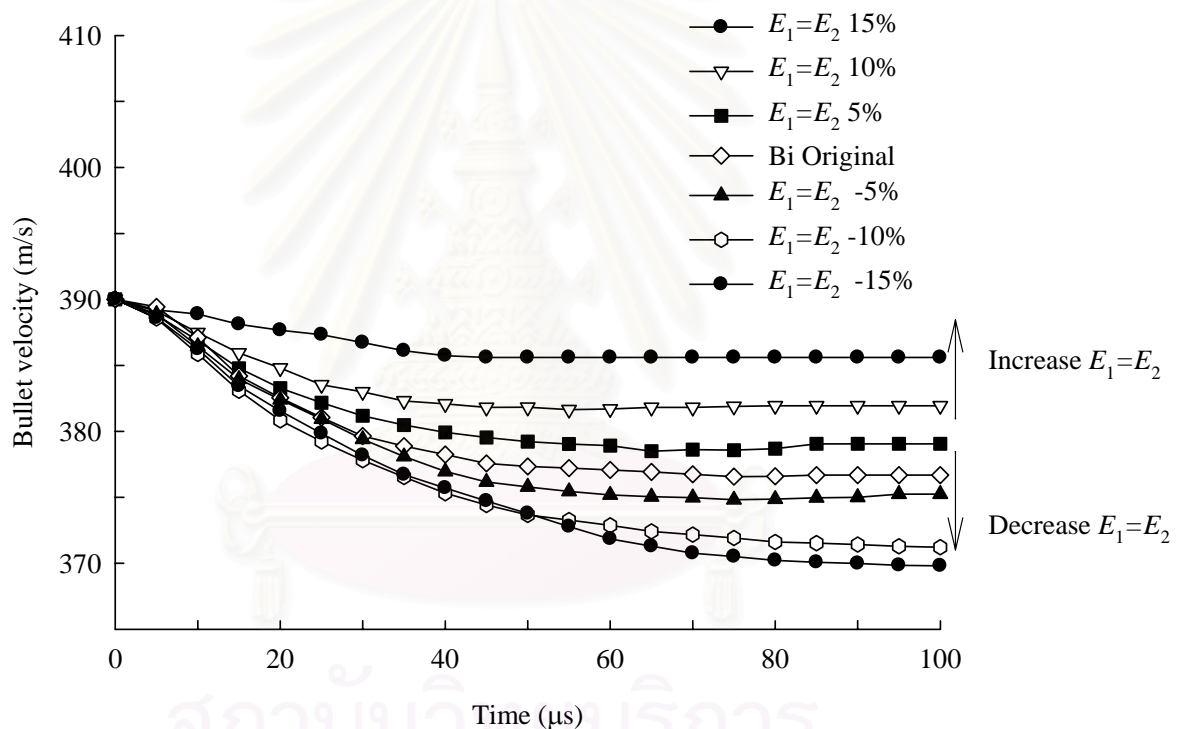


รูปที่ 6.11 ความเร็วตกค้างของกระสุนที่ปะทะแผ่นเป้าหมายแบบไฟเบอร์ทิศทางเดียวเปรียบเทียบกับแผ่นเป้าหมายแบบไฟเบอร์สองทิศทาง

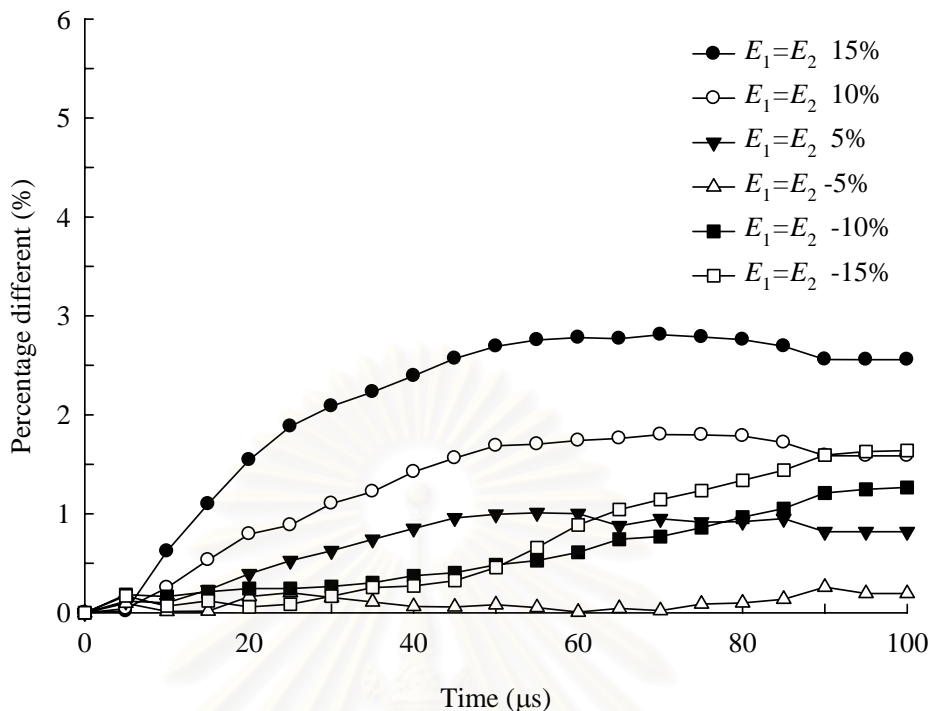
ส่วนการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นได้ปรับเพิ่มและลดเหมือนกับ กรณีของคอมพอสิตแบบทิศทางเดียวโดยเพิ่มและลดอย่างละไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการปรับค่าในกรณีนี้ ได้ปรับเพียงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในแนวระนาบ โดยยังคงอื่นๆ ไว้เช่นเดิม ยกเว้นค่ามอดูลัสความเค้นเฉือนที่แปรผันตามความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซองและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นตามทฤษฎีความสัมพันธ์ของวัสดุในบทที่ 2

ผลการจำลองคล้ายกับกรณีของคอมพอสิตแบบไฟเบอร์ทิศทางเดียวที่เพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ซึ่งอยู่ในแนวระนาบของแผ่นเป้าหมาย ทำให้ความเร็วตกค้างเพิ่มขึ้นและกลับกันสำหรับการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 6.12 และ 6.13 ซึ่งสาเหตุก็มาจากเหตุผลที่คล้ายกันกับกรณีของคอมพอสิตทิศทางเดียว โดยในที่นี้ได้พิสูจน์ด้วยวิธีการที่คล้ายกันกับหัวข้อที่ 6.1.1 ด้วยเอลิเมนต์เดียวกัน ปรากฏว่า การเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่ 1 และ 2 ทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 มีค่าลดลง แต่ทิศทางที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเครียดในทิศทางที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 ส่วนค่าความเครียดในทิศทางที่ 3 มีค่าคงที่

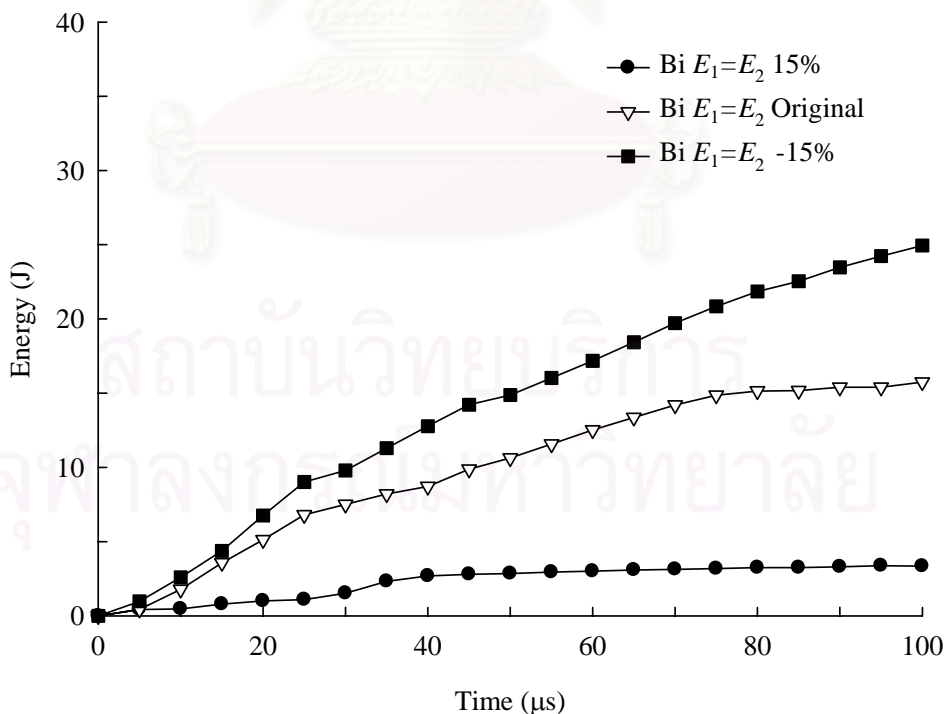
การลดลงของค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 ดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับการรับพลังงานของแผ่นเป้าหมายที่น้อยลง พลังงานจลน์ของกระสุนจึงสูงกว่าแบบจำลองต้นแบบ อธิบายได้คล้ายกับการรับพลังงานของแผ่นเป้าหมายแบบทิศทางเดียวในหัวข้อที่ 6.11 ซึ่งรูปพลังงานภายในของแผ่นเป้าหมายแสดงดังในรูปที่ 6.14 โดยที่ลักษณะการยึดตัวของแผ่นคอมพอสิตไปกับหัวกระสุน จะน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความเร็วตกค้างของกระสุนจึงสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6.15 และอธิบายกลับกันในส่วนของการลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 เพิ่มขึ้น พลังงานความเครียดเพิ่มขึ้นจากการรับพลังงานจลน์จากการปะทะของกระสุนได้มากขึ้น ความเร็วตกค้างของกระสุนจึงลดลง ซึ่งลักษณะการยึดตัวของคอมพอสิต มีการยึดตามกระสุนไปมากกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้ปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 6.15



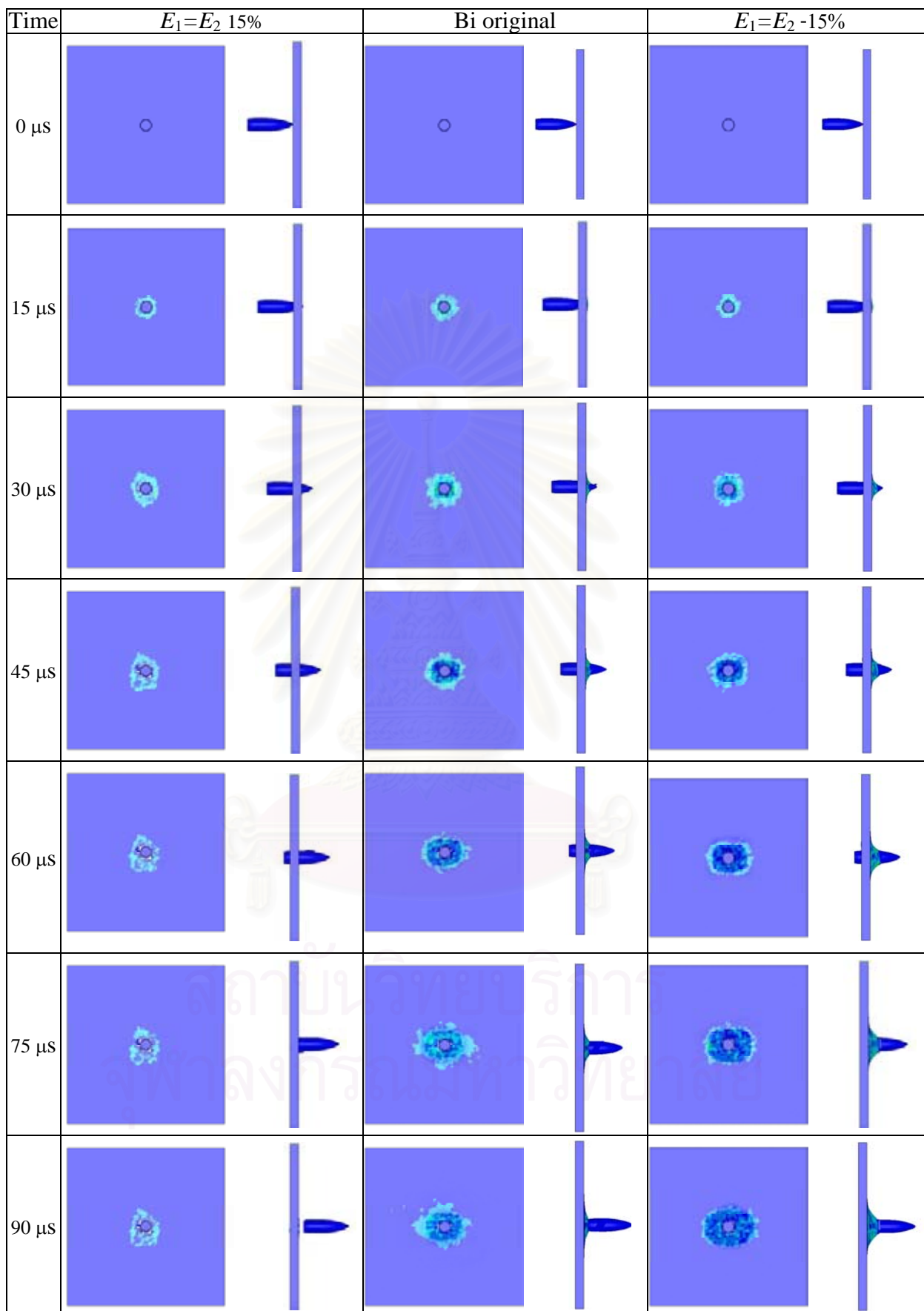
รูปที่ 6.12 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบสองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.13 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์แบบสองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.14 พลังงานความเครียดของแผ่นเป่าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ



รูปที่ 6.15 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น (ซ้าย) และลดลง (ขวา) 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการจำลองแบบสองทิศทาง (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

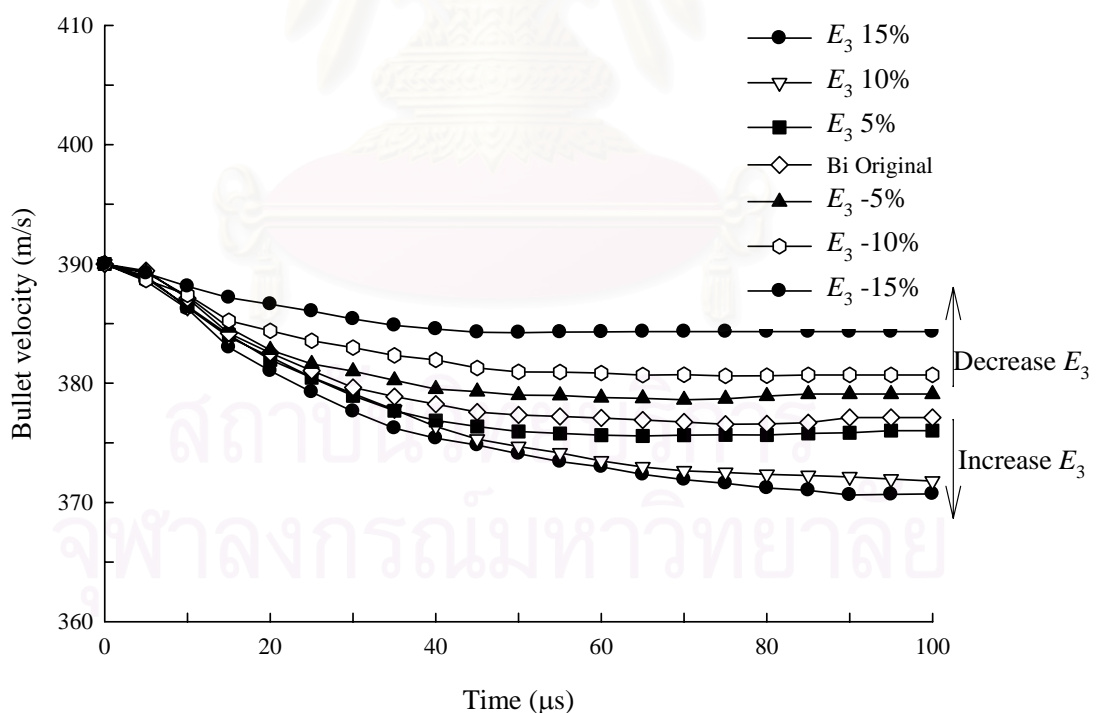


#### 6.1.4 ผลกระทบจากมอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบสองทิศทาง

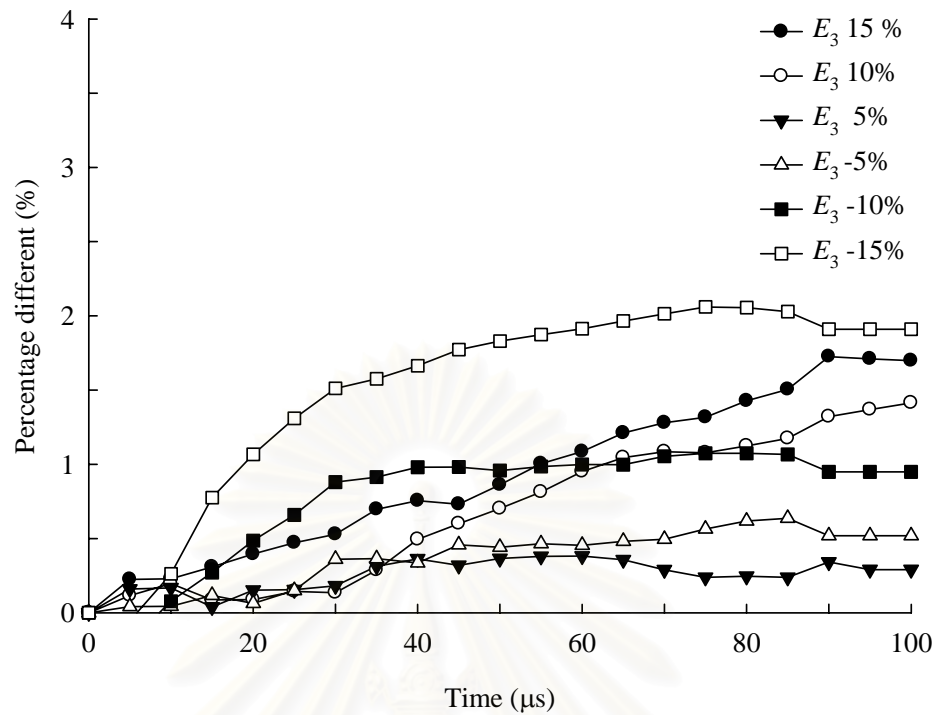
การปรับเพิ่มหรือลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในหัวข้อนี้ ใช้การเพิ่มหรือลดในค่าที่เท่ากับหัวข้อที่ 6.1.3 คือ อย่างละไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองคล้ายกับการปรับลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว กล่าวคือ การเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ความเร็วตกค้างกระสุนจึงลดลงแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 6.16 และ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.17

การพิสูจน์ความสอดคล้องของการปรับค่ามอดูลัสคล้ายกับหัวข้อที่ 6.11 ซึ่งผลจากการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางที่ 3 ทำให้ค่าความเครียดในทิศทางที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเครียดในทิศทางที่ 1 และ 2 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

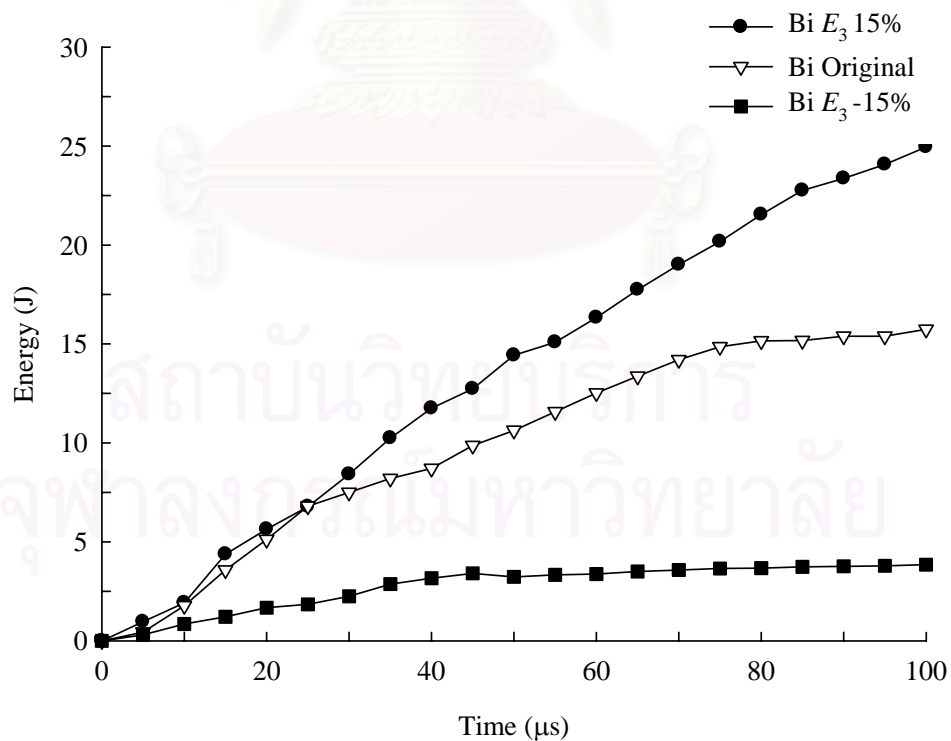
การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดในทิศทางที่ 3 เช่นนี้ สามารถอธิบายได้คล้ายกับคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว ที่เกิดพลังงานความเครียดขึ้นสูงจากการรับแรงปะทะของกระสุนได้สูงโดยพลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมาย แสดงดังในรูปที่ 6.18 และความสอดคล้องของการยึดตัวตามการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริก แสดงดังในรูปที่ 19



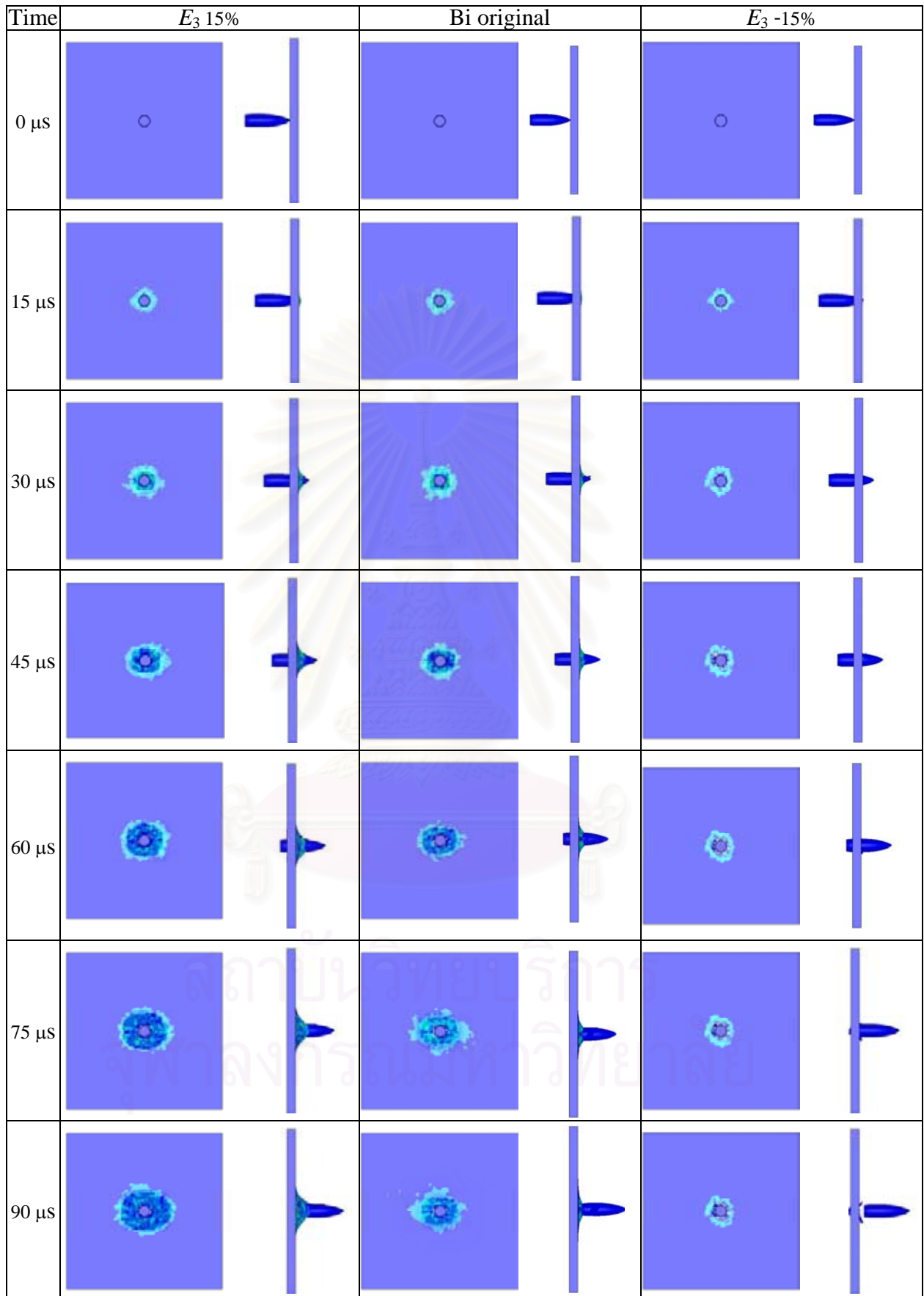
รูปที่ 6.16 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบไฟเบอร์สองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.17 เปรี่เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดมอดูลัสความยืดหยุ่น ในทิศทางของเมตริกของคอมพอสิตแบบไฟเบอร์สองทิศทางอย่างละ 5 10 และ 15 เปรี่เซ็นต์ กับแบบจำลองที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.18 พลังงานความเครียดของแผ่นเป้าหมายจากการปรับเพิ่มและลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในทิศทางของเมตริก 15 เปรี่เซ็นต์ เปรี่เทียบกับแบบจำลองต้นแบบ



รูปที่ 6.19 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น (ซ้าย) และลดลง (ขวา) 15 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการจำลองแบบสองทิศทาง (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

## 6.2 ผลกระทบจากค่าความแข็งแรงของคอมพอสิต

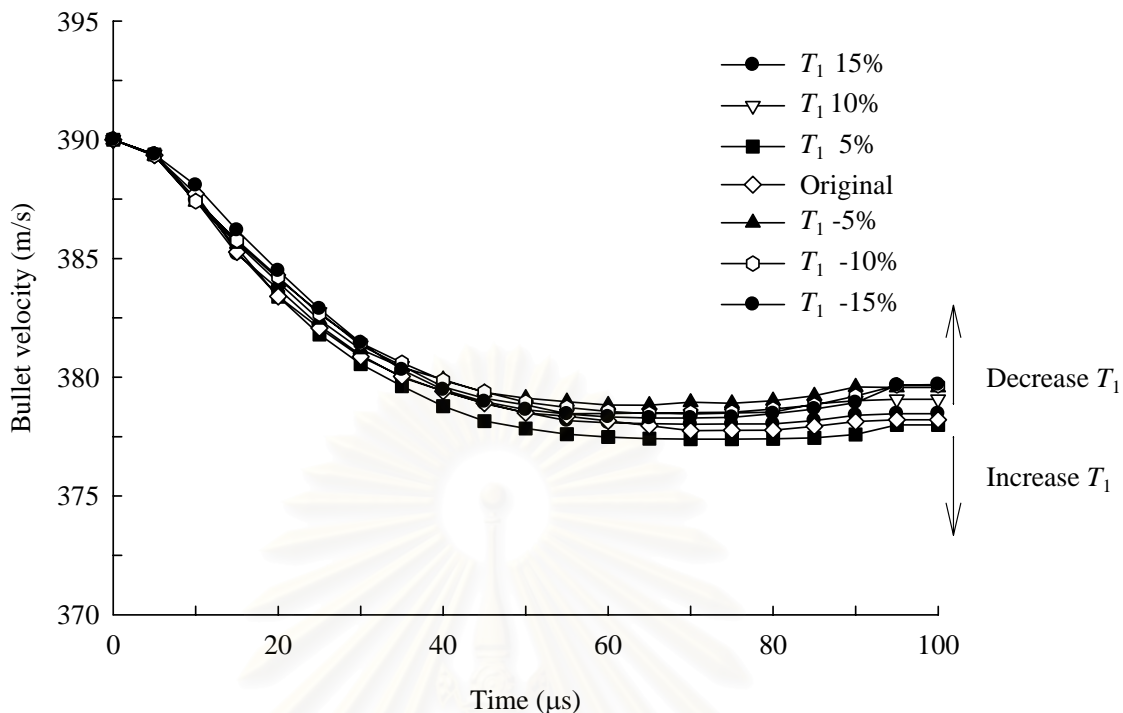
จากค่าความแข็งแรงของแบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ที่มีถึง 9 ค่า รวมทั้งหลักความเสียหายที่ใช้คำนวณเป็นการนำเอาความเสียหายในทิศทางต่างๆ มารวมกันจนมีลักษณะเป็นวงรีคล้ายกับหลักของ Tsi and Wu (1971) ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ทำให้ในหัวข้อนี้จึงได้ปรับค่าความเสียหายแบบต่างๆ สำหรับวัสดุคอมพอสิต ซึ่งได้แก่ ความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ ความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริก ความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 สามทิศทางของคอมพอสิต และความแข็งแรงอัดทั้ง 3 สามทิศทางของคอมพอสิต ทั้งจากแบบจำลองต้นแบบที่ใช้คอมพอสิตแบบทิศทางเดียว จึงใช้แบบจำลองต้นแบบนี้ในการปรับค่าความแข็งแรงดังกล่าว เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดการปะทะทางจีปน

### 6.2.1 ผลกระทบจากความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์

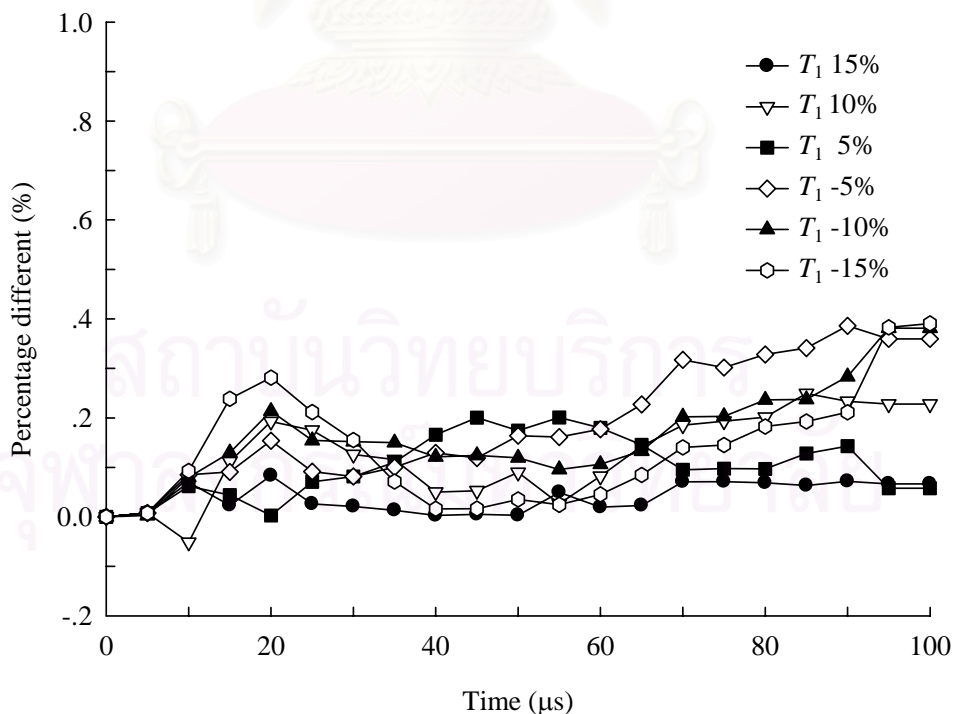
ในการปรับค่าความแข็งแรงดึงนี้ใช้การปรับที่เพิ่มและลดอย่างละไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ เหมือนกับการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยการปรับค่านี้อาจปรับเพียงค่าความแข็งแรงดึงค่าเดียวเท่านั้น เนื่องจากค่าความแข็งแรงเหล่านี้ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงค่าอื่นๆ แตกต่างกับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนปัวซองและค่ามอดูลัสความเค้นเฉือนใน Stiffness matrix

ผลการจำลองปรากฏว่าความเร็วตกค้างของกระสุนแตกต่างกันน้อยมากไม่ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.20 และ 6.21 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาแล้วมีค่าคาบเกี่ยวกับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่ได้มีการปรับค่าความแข็งแรงดึง โดยที่ไม่ว่าการปรับเพิ่มหรือลด ทำให้ค่าความเร็วตกค้างแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบเพียงเล็กน้อย ซึ่งแนวโน้มโดยทั่วไปการลดค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ทำให้ความเร็วตกค้างมากขึ้น และการเพิ่มความแข็งแรงดึงทำให้ความเร็วตกค้างลดลง ซึ่งผลการจำลองในที่นี้ที่การเพิ่ม 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วตกค้างจะน้อยลงประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ

สาเหตุที่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากหลักความเสียหายในแบบวัสดุชนิดที่ 59 เป็นการผสมรวมกันของหลักความเสียหายจากหลายทิศทาง การปรับเพิ่มหรือลดค่าความแข็งแรงตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อย แม้ว่าจะเป็นความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ แต่ไม่ได้เป็นทิศทางที่รับแรงปะทะโดยตรง จึงทำให้ผลการจำลองไม่แตกต่างกันมากนักกับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า ดังนั้นจึงได้ปรับค่าความแข็งแรงดึงให้มีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยที่จะปรับให้เพิ่ม 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ในแต่ละครั้งที่ทำการจำลอง โดยที่ผลการจำลองความเร็วตกค้างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างแสดงดังรูปที่ 6.22 และ 6.23 และการแทงทะลุผ่านแสดงดังรูปที่ 6.24

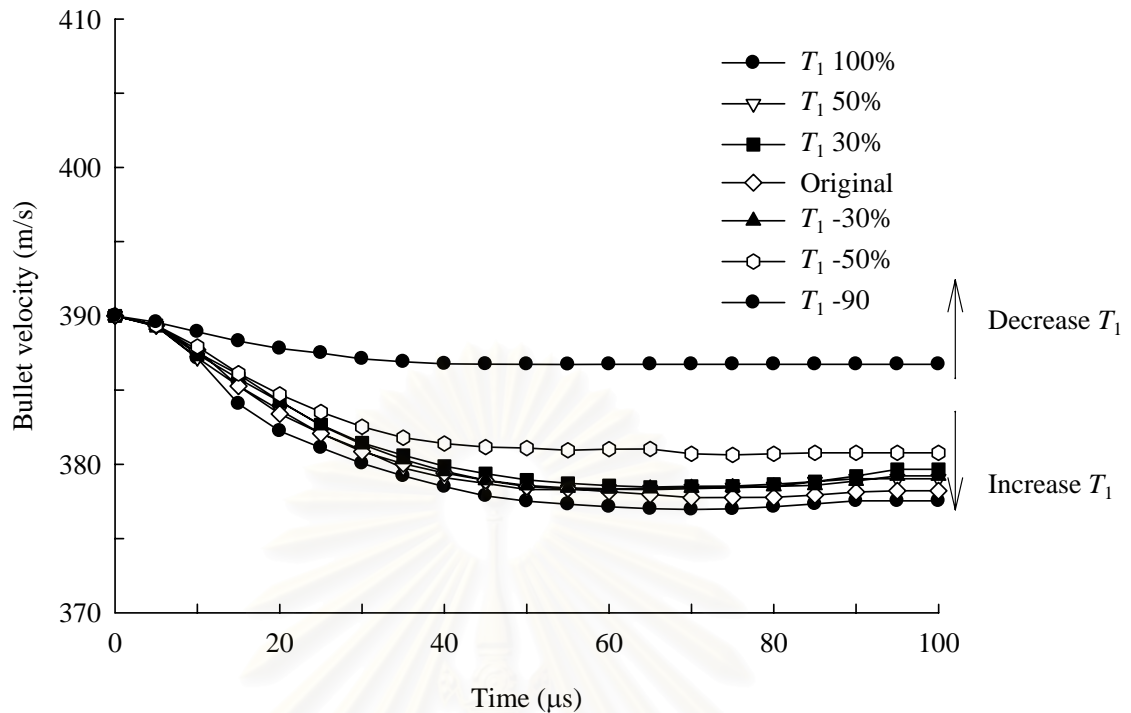


รูปที่ 6.20 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับเพิ่มและลดค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

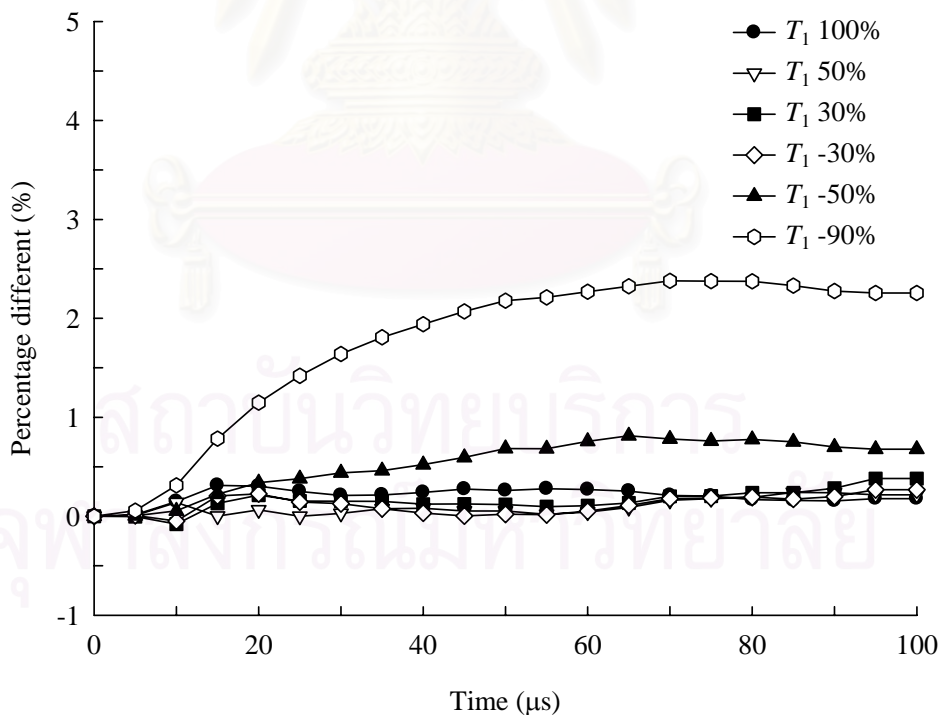


รูปที่ 6.21 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับเพิ่มและลดความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์อย่างละ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีค่าการปรับค่า

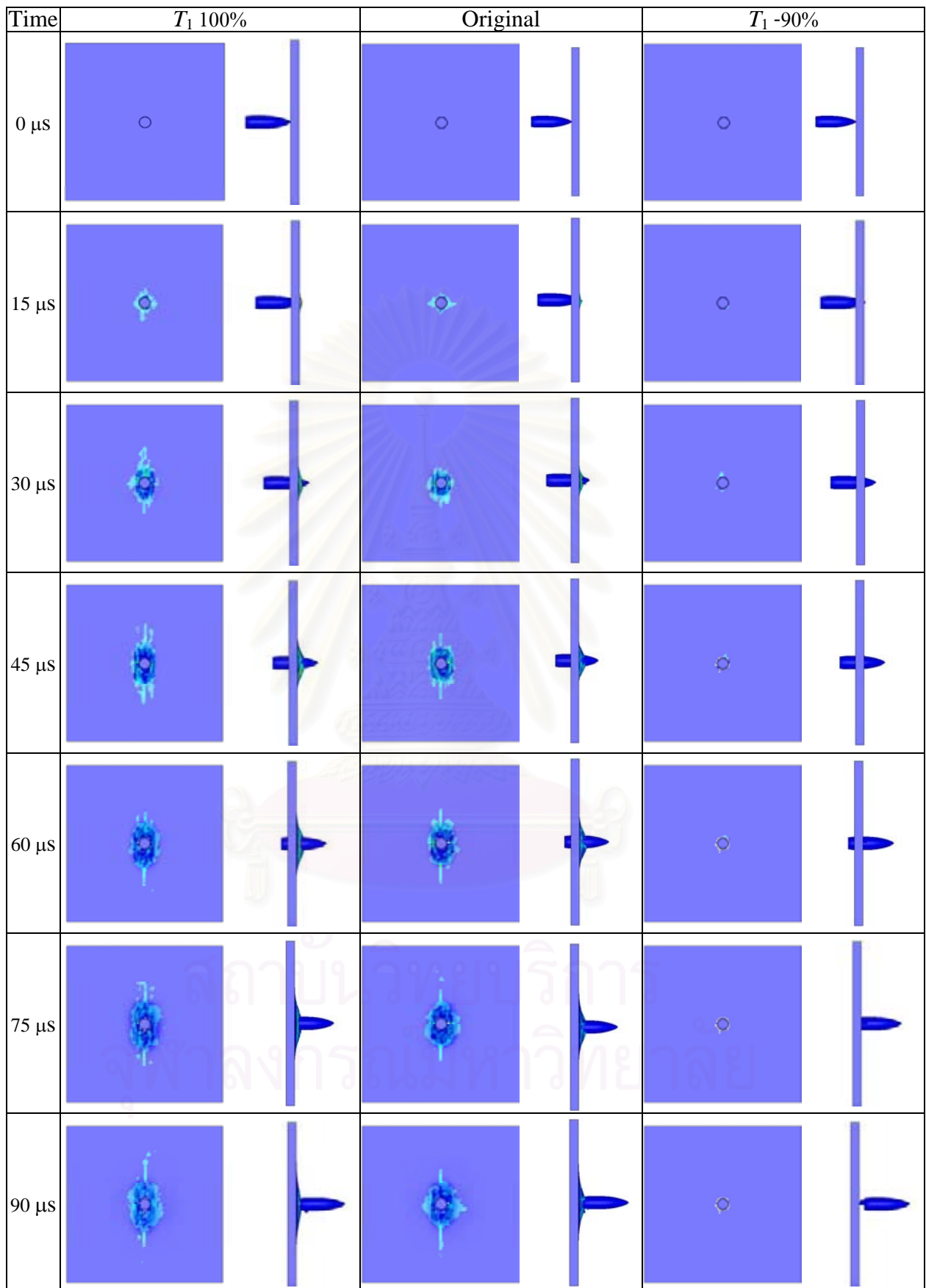




รูปที่ 6.22 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงดิ่งในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.23 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงดิ่งในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.24 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความเข้มแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ (ซ้าย) และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ (ขวา) เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่าความเข้มแรงดึง

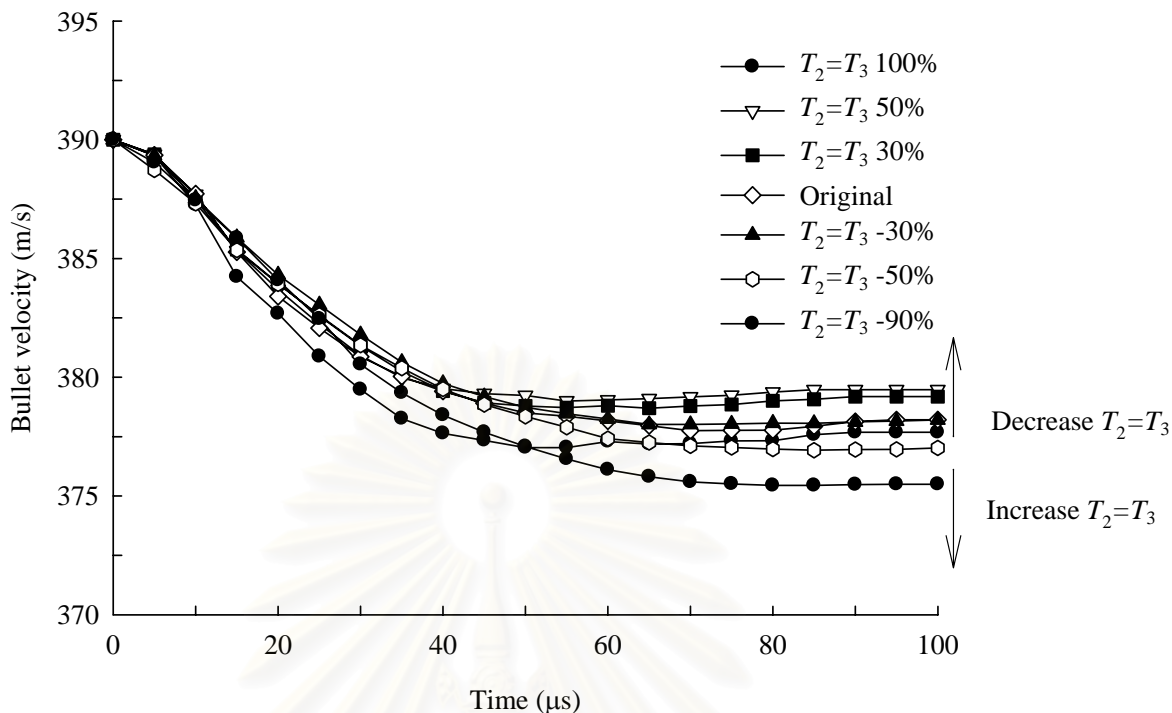
ผลการจำลองจากการปรับเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ให้มากขึ้นถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่ทำให้ความเร็วตกค้างแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบมากนัก แต่ลดลงน้อยกว่าแบบจำลองต้นแบบเล็กน้อยประมาณไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.22 และ 6.23 ซึ่งเมื่อเทียบรูปการแทงทะลุผ่านและการกระจายของคลื่นความเค้นแสดงดังรูปที่ 6.24 จะเห็นได้ว่ามีความแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมากทั้งลักษณะการแทงทะลุผ่านและการกระจายของคลื่นความเค้นกับแบบจำลองต้นแบบ แต่สำหรับการลดความแข็งแรงดึงที่ 90 เปอร์เซ็นต์ นั้นทำให้ความเร็วตกค้างเพิ่มขึ้นถึง 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ และรูปการแทงทะลุผ่านและการกระจายของคลื่นความเค้นมีความแตกต่างกันออกไปอย่างเห็นได้ชัด โดยที่การลดความแข็งแรงดึงลง 90 เปอร์เซ็นต์ การกระจายของคลื่นความเค้นเกิดขึ้นน้อยมากและไม่มีรอยขีดของคอมพอสิตติดไปกับกระสุนเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ

การเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงนี้ แม้จะเป็นในทิศทางของไฟเบอร์แต่ไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เกิดจากความเสียหายทั้ง 8 ลักษณะในแบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ที่จำกัดไปด้วยหลักความเสียหายในทิศทางอื่นๆ ด้วย ทำให้ผลการจำลองไม่แตกต่างกันมาก แม้กระทั่งการลดความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ ถึงจะให้ค่าที่ต่างจากแบบจำลองต้นแบบมากกว่าการเพิ่มความแข็งแรงดึงแต่ยังถือว่าไม่มากเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การลดความแข็งแรงลง ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์มีผลต่อการจำลองทางจีปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิตน้อยมาก

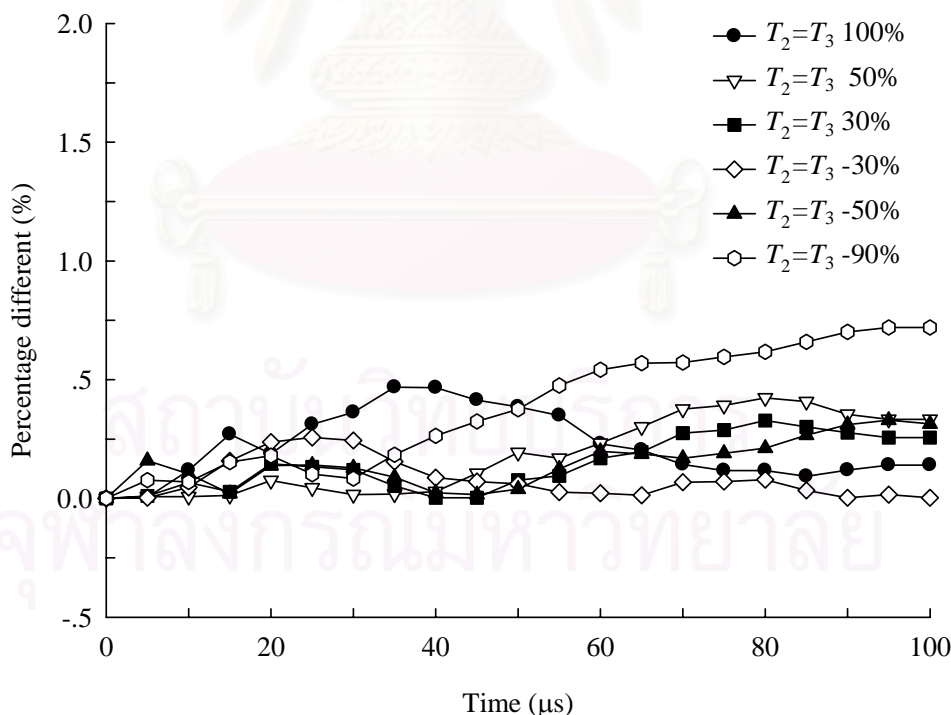
## 6.2.2 ผลกระทบจากความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริก

จากหัวข้อที่ 6.2.1 ทำให้พอจะประมาณได้ว่าการปรับเพิ่มหรือลดค่าความแข็งแรงในทิศทางใดๆ เพียงเล็กน้อย ไม่น่าจะทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันมาก ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้และต่อไป จึงปรับเพิ่มไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ เหมือนในหัวข้อที่ 6.2.1

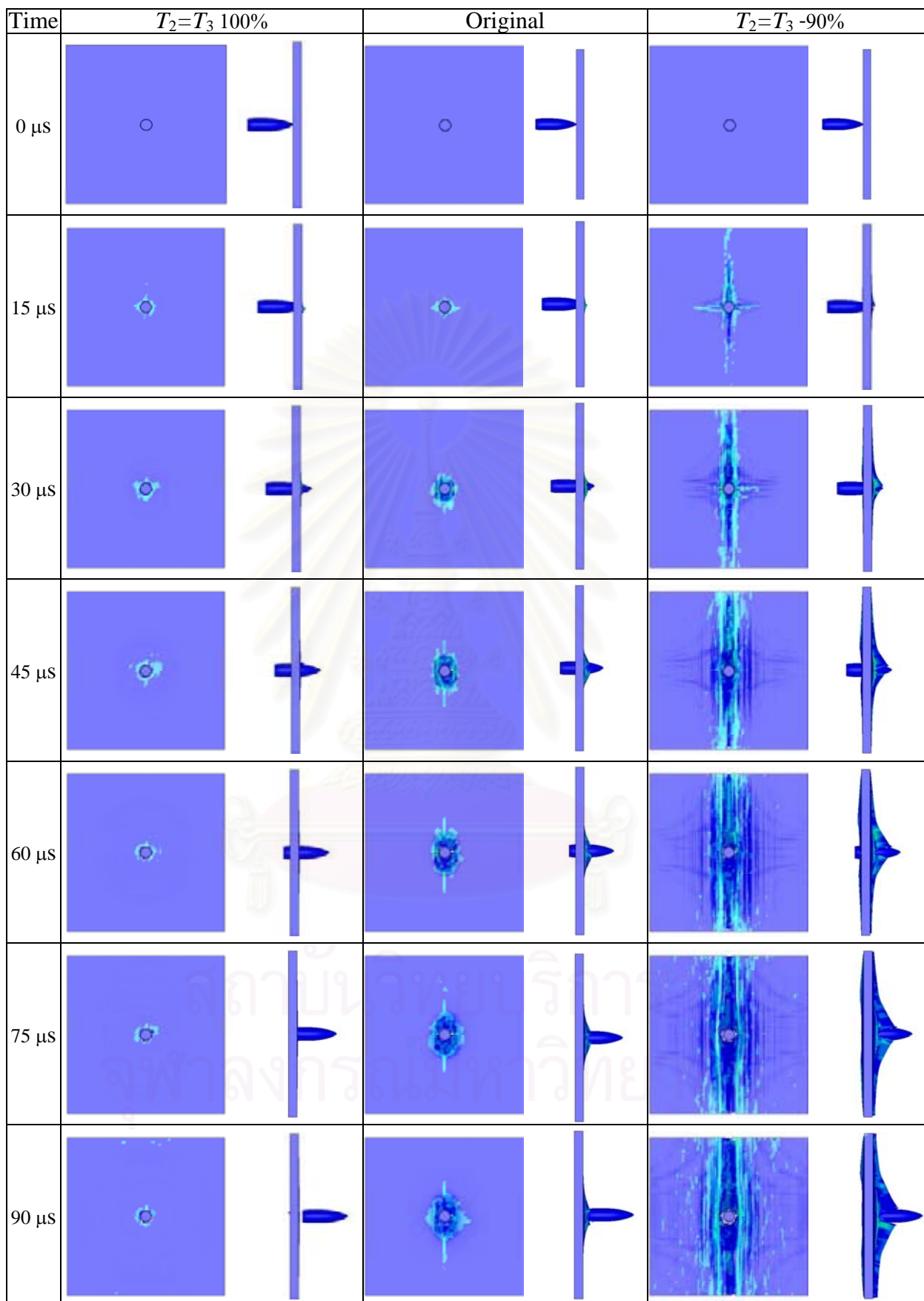
ผลการจำลองที่เพิ่มค่าความแข็งแรงในทิศทางของเมตริกถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่ทำให้ความเร็วตกค้างแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบ โดยความเร็วตกค้างแสดงดังในรูปที่ 6.25 และ 6.26 แต่คลื่นความเค้นเกิดขึ้นน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6.27 ซึ่งหมายถึงว่าวัสดุแข็งแต่เปราะมากขึ้น จึงทำให้ความเร็วตกค้างมากขึ้นแม้เพียงเล็กน้อย ส่วนการลดค่าแข็งแรงในทิศทางของเมตริก 90 เปอร์เซ็นต์ ทำให้วัสดุยืดหยุ่นมากขึ้น แม้ความเร็วตกค้างจะลดลงไม่มาก แต่การกระจายของคลื่นความเค้นทั้งลักษณะความเสียหายที่เป็นแนวยาวตามทิศทางของไฟเบอร์เกิดขึ้นสูงมากและการขีดติดของคอมพอสิตไปกับกระสุนเกิดขึ้นมากกว่าแบบจำลองต้นแบบอย่างเห็นได้ชัด ผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริกมีผลอยู่มากพอสมควร สำหรับการจำลองทางจีปบนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิตแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 6.25 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงดิ่งในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.26 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงดิ่งในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.27 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางของเมตริกเพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ (ซ้าย) และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ (ขวา) เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงดึง

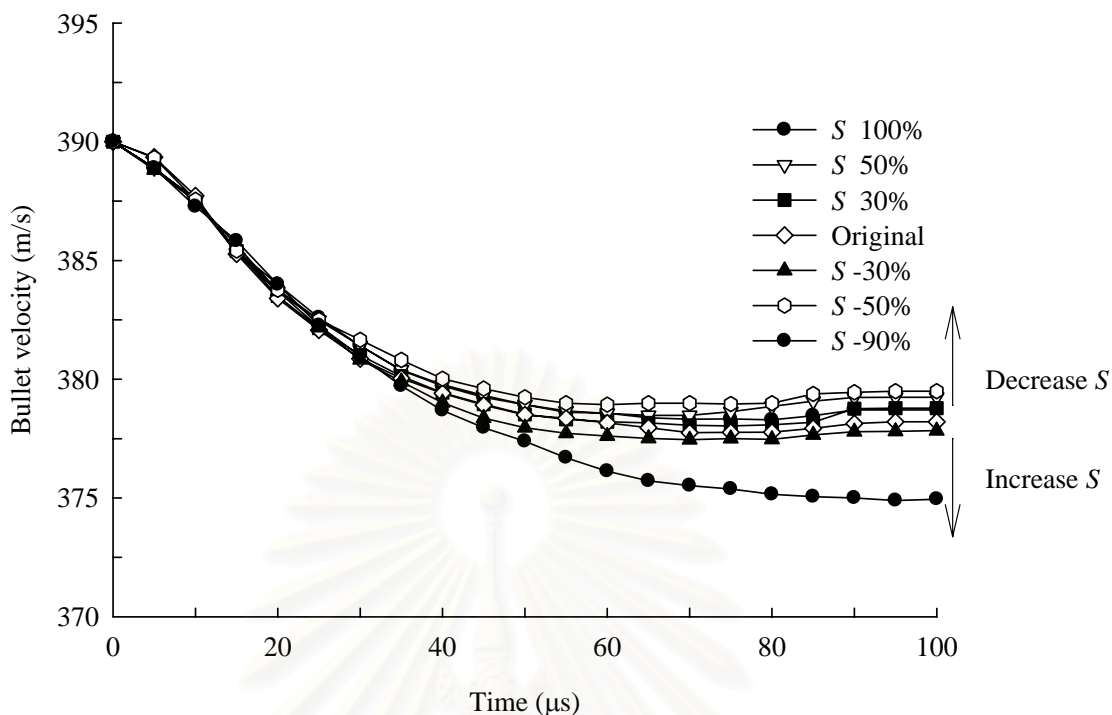


### 6.2.3 ผลกระทบจากความแข็งแรงเฉือน

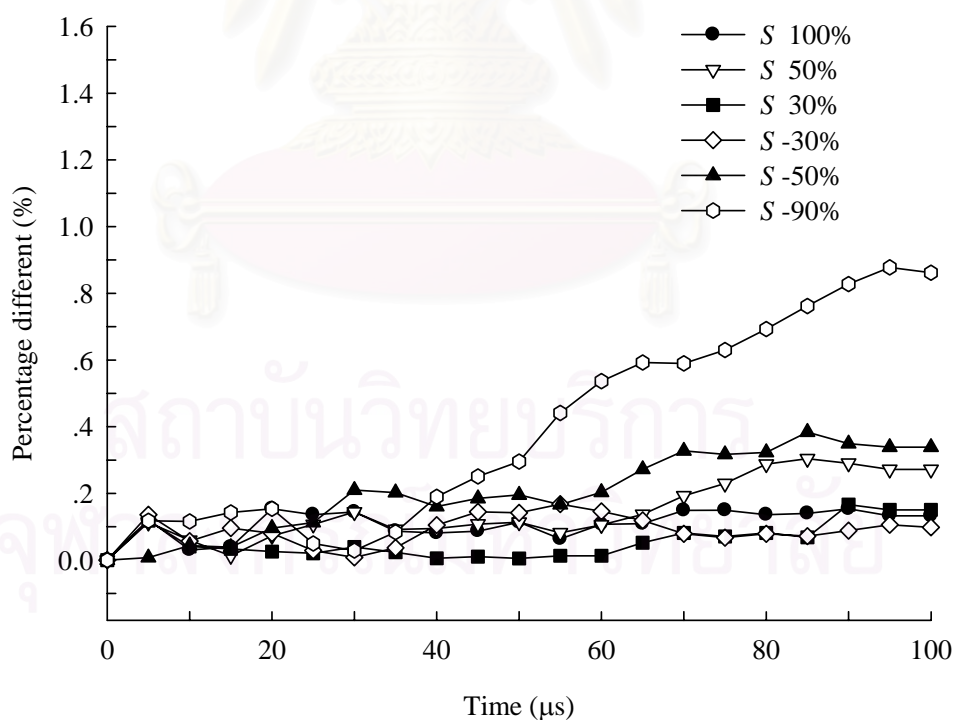
การปรับค่าในหัวข้อนี้ได้ปรับค่าความเค้นเฉือนทั้ง 3 ทิศทางให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากัน โดยไม่ได้แบ่งว่าเป็นทิศทางของไฟเบอร์หรือเมตริก เนื่องจากค่าความเค้นเฉือนที่มีของ Gu and Xu (2004) มีเพียงค่าความเค้นเฉือนในแนวระนาบเท่านั้น เมื่อเปลี่ยนมาใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ซึ่งต้องการความแข็งแรงเฉือนอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ จึงประมาณค่าความเค้นเฉือนนอกเหนือจากนี้ให้เท่ากับค่าความเค้นเฉือนในแนวระนาบตามข้อสมมติฐานในบทที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากว่าความเสียหายทั้ง 8 ลักษณะในแบบวัสดุชนิดที่ 59 นี้ไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันมากนัก ทั้งการพิจารณาหรือการคำนวณของโปรแกรมไม่ได้พิจารณาให้แผ่นคอมพอสิตสามารถไหลแยกชั้นกันได้ แต่พิจารณาเป็นเนื้อเดียวกันทั้งแผ่น ดังนั้นความแข็งแรงเฉือนจึงไม่ควรจะแตกต่างกันมาก

ผลการจำลองความเร็วตกค้างของกระสุนแตกต่างกันน้อยมากกับการจำลองต้นแบบเพียงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มค่าหรือลดค่าดังแสดงในรูปที่ 6.28 และ 6.29 การเพิ่มค่าที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วตกค้างมีค่ามากกว่าแบบจำลองต้นแบบประมาณไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแนวโน้มของวัสดุจะมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือประาลงจากการปรับค่าความแข็งแรงเฉือนให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการแทงทะลุผ่านและคลื่นการกระจายความเค้นก็มีแนวโน้มใกล้เคียงกับแบบจำลองต้นแบบมาก ดังแสดงรูปที่ 6.30

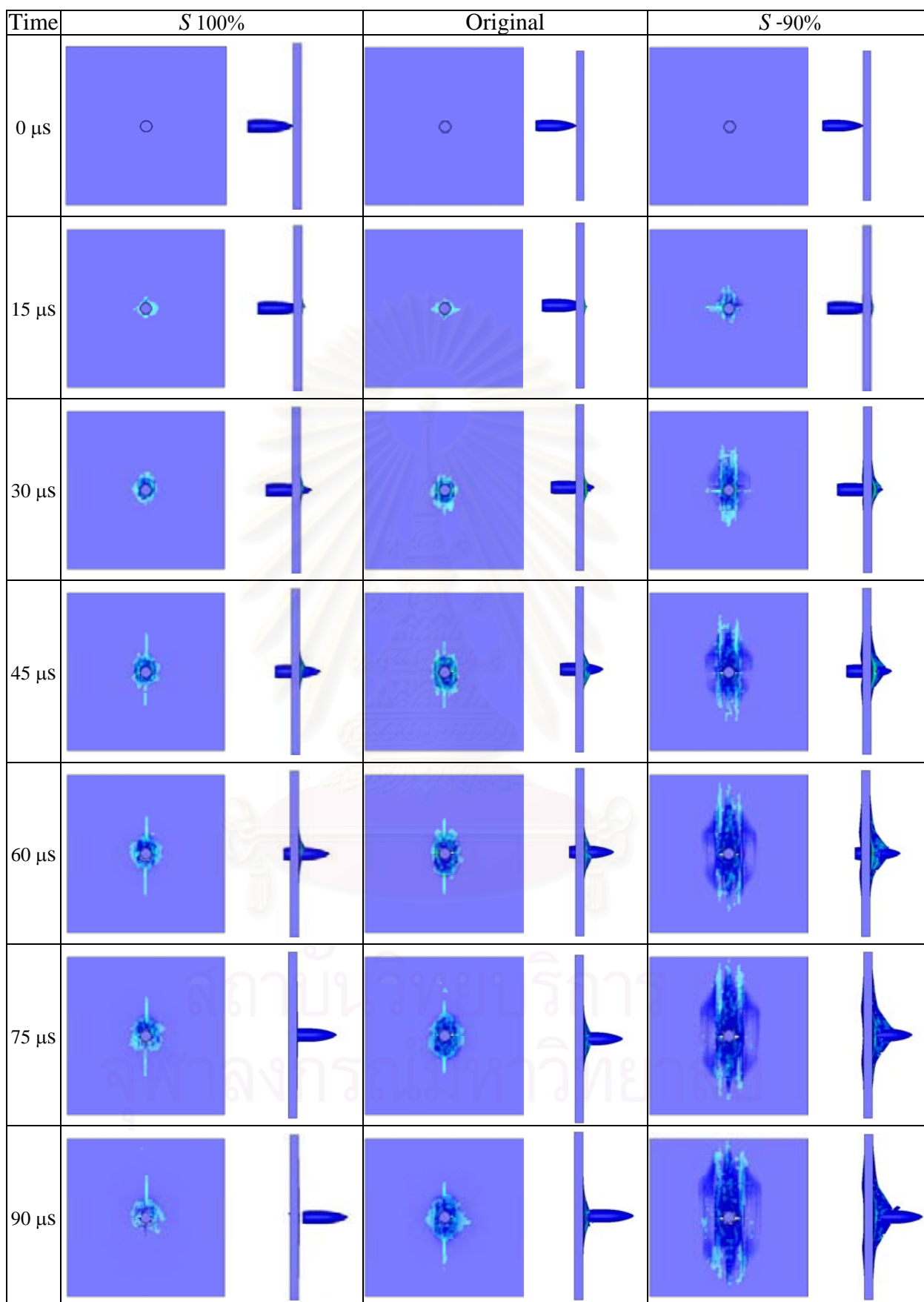
ส่วนการลดความแข็งแรงเฉือนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการกระจายคลื่นความเค้นสูงกว่าแบบจำลองต้นแบบอย่างเห็นได้ชัด ทั้งเกิดการกระเพื่อมในทิศทางตั้งฉากที่กระสุนปะทะ และส่วนของคอมพอสิตที่กระสุนปะทะจะยึดติดไปกับกระสุน ทำให้ความเร็วตกค้างลดต่ำกว่าแบบจำลองต้นแบบ แม้จะน้อยมากเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ก็ตาม แต่การลดค่าที่ 30 หรือ 50 เปอร์เซ็นต์ไม่ทำให้ความเร็วตกค้างแตกต่างกัน เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับกรณีของการปรับค่าความแข็งแรงเฉือน ซึ่งการผสมรวมหลักความเสียหายในทิศทางต่างๆ ในแบบวัสดุชนิดที่ 59 การปรับค่าตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อยจึงไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันมาก



รูปที่ 6.28 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.29 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.30 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงเฉือนทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ (ซ้าย) และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ (ขวา) เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงเฉือน

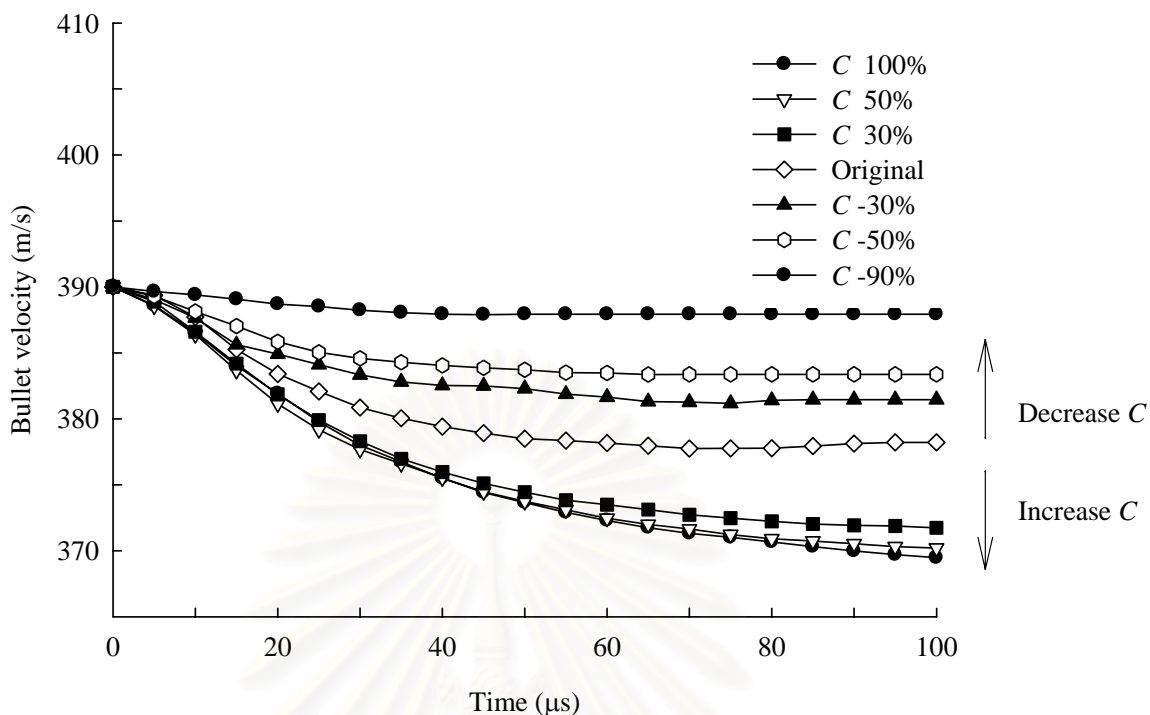
#### 6.2.4 ผลกระทบจากความแข็งแรงอัด

หัวข้อนี้การปรับค่าการจำลองคล้ายกับหัวข้อที่ 6.2.3 จากเหตุผลที่คล้ายกัน รวมทั้งข้อสมมติฐานในการปรับค่าความแข็งแรงอัดในบทที่ 4 การปรับเพิ่มหรือลดค่าความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทางจึงเท่ากัน ที่การเพิ่มค่าความแข็งแรงอัดไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และปรับลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์

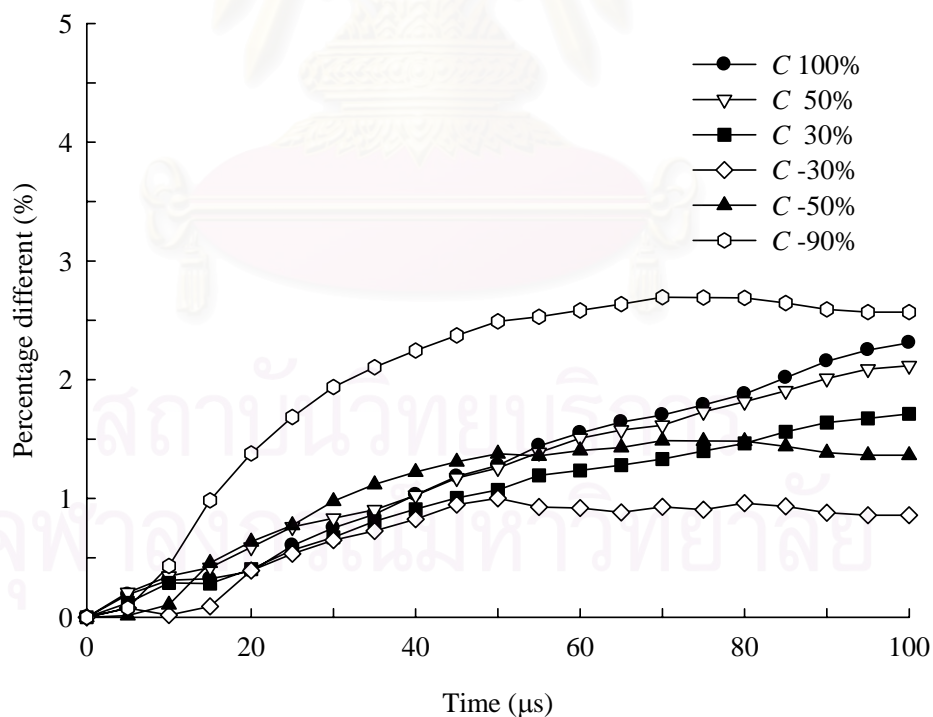
ผลการจำลองปรากฏว่า การปรับเพิ่มความแข็งแรงอัดทำให้ความเร็วตกค้างลดลง เป็นสัดส่วน โดยที่ปรับเพิ่ม 100 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วตกค้างลดลงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับผลการจำลองต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 6.31 และ 6.32 ซึ่งเมื่อสังเกตรูปการแหงทะลุผ่านจะเห็นได้ว่า แผ่นคอมพอสิตจะยึดติดไปกับหัวกระสุน และบริเวณที่กระสุนปะทะจะมีลักษณะยึดและยุบลงไปตามการปะทะของกระสุนดังรูปที่ 6.33 คล้ายกับการเพิ่มค่ามอดูลัสในทิศทางของเมตริกหรือการลดค่ามอดูลัสในทิศทางของไฟเบอร์ในหัวข้อการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น แต่แตกต่างกันตรงที่การปรับความแข็งแรงอัดต้องใช้การปรับที่มากขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงอัดเดิม จึงจะทำให้ค่าความแตกต่างของผลการจำลองดังที่แสดง ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับเพิ่มค่าต่างๆ ที่อยู่ในทิศทางการรับแรงปะทะของกระสุน โดยตรง ก่อนข้างที่จะมีผลกระทบสูงกว่าการปรับในทิศทางที่ไม่ได้รับแรงปะทะของกระสุนโดยตรง

ส่วนการลดความแข็งแรงอัดทำให้ความเร็วตกค้างของกระสุนเพิ่มขึ้น ที่การลด 90 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับการจำลองต้นแบบ เมื่อสังเกตรูปการแหงทะลุผ่านของกระสุนจะเห็นได้ว่ากระสุนทะลุผ่านไปโดยไม่มีส่วนของคอมพอสิตยึดติดไปกับกระสุน หรืออาจกล่าวได้ว่าแผ่นคอมพอสิตยืดหยุ่นน้อยลงนั่นเอง

การปรับเพิ่มหรือลดค่าความแข็งแรงอัดให้ค่าผลการจำลองแต่ละการปรับค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยแม้ว่าจะใช้หลักความเสียหายทั้ง 8 ลักษณะ ยังให้ค่าผลการจำลองที่แตกต่างกันประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับการจำลองต้นแบบ ทั้งยังเป็นสัดส่วนตามการปรับเพิ่มหรือลดค่าแตกต่างกับการปรับค่าความแข็งแรงแบบอื่นๆ ที่แม้ว่าจะปรับค่าให้เพิ่มหรือลดแตกต่างกันแล้ว แต่ไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกัน คือ ประมาณไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับการจำลองต้นแบบ (ยกเว้นการปรับลดความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงอัดมีอิทธิพลต่อผลการจำลองการกระแทกทางจีปนสูงกว่าความแข็งแรงแบบอื่นๆ ที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA

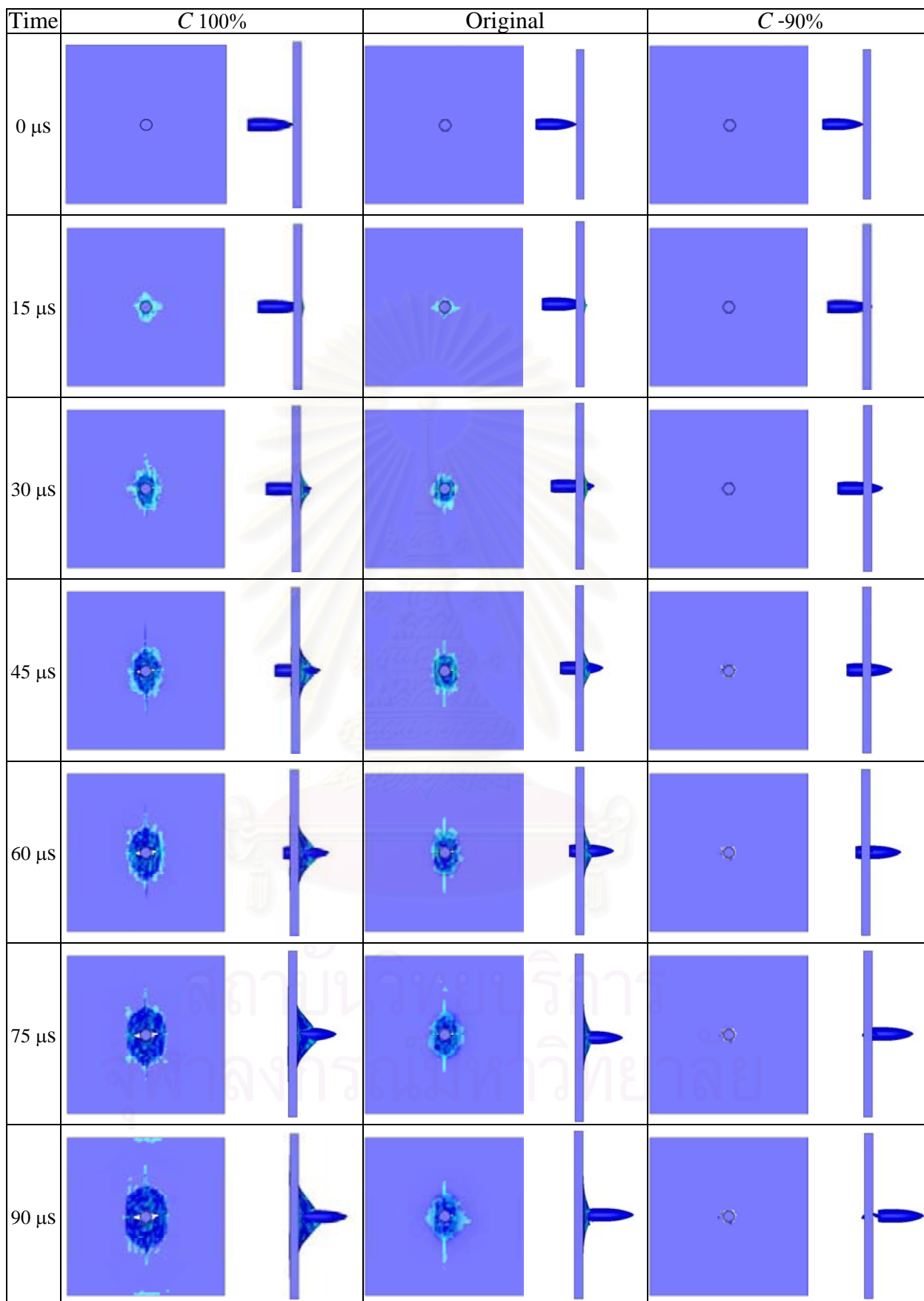


รูปที่ 6.31 ความเร็วตกค้างของกระสุนจากการปรับความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า



รูปที่ 6.32 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเร็วตกค้างจากการปรับความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ และลดลงไม่เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ กับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า





รูปที่ 6.33 การแทงทะลุผ่านของกระสุนและการกระจายของคลื่นความเค้น จากการปรับค่าความแข็งแรงอัดทั้ง 3 ทิศทาง เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ (ซ้าย) และลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ (ขวา) เปรียบเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ (กลาง) ที่ไม่มีการปรับค่าความแข็งแรงอัด

### 6.3 แนวทางวิธีการปรับค่าความยืดหยุ่นและความแข็งแรงสำหรับการผลิตแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

จากการที่พอลิเมอร์คอมพอสิตเป็นวัสดุคอมพอสิตที่ประกอบขึ้นด้วยวัสดุสองชนิดขึ้นไป ในระดับมหภาค ซึ่งได้แก่ เส้นใยไฟเบอร์และเมตริก ดังนั้น ความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของคอมพอสิตจึงเป็นตัวแปรตาม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมตริกเหล่านี้ การปรับจึงต้องปรับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมตริกโดยมีแนวทางการปรับค่าดังนี้

สำหรับเส้นใยไฟเบอร์ส่วนใหญ่ที่นำมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุนจะใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุเชิงพาณิชย์ ผลิตสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิตต่างๆ ดังนั้น สูตรหรือวิธีการผลิตจึงค่อนข้างจะเป็นความลับในการผลิตสินค้า การที่จะปรับคุณสมบัติของเส้นใยไฟเบอร์นี้จึงค่อนข้างจะยากในการที่จะปรับเปลี่ยน ถ้าจะปรับต้องไปปรับที่สูตรโครงสร้างทางเคมีของไฟเบอร์ชนิดนั้นๆ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าสูตรทางเคมีตัวใด ในเส้นใยไฟเบอร์มีผลทำให้ความแข็งแรงของไฟเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด

สำหรับเมตริกซึ่งอาจเป็นเรซิน หรืออีพอกซี ชนิดต่างๆ โดยส่วนผสมทางด้านเคมีของสารประกอบเหล่านี้ที่ทำให้ เมตริกมีความยืดหยุ่นหรือมีความแข็งแรงโดยตรง ดังนั้นในการผลิตเมตริก การปรับส่วนผสมของสารประกอบเหล่านี้จึงเป็นตัวกำหนดว่าจะให้วัสดุมีคุณสมบัติเช่นใด

อย่างไรก็ตามในการผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิตต้องมีการบ่มวัสดุ (Curing) ในการบ่มนี้เป็นขั้นตอนการผลิตคอมพอสิตที่สำคัญ ที่มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของคอมพอสิตเป็นเช่นใด ซึ่งขั้นตอนการบ่มจะประกอบไปด้วยการกดแผ่นคอมพอสิตด้วยความร้อนและแรงดันเพื่อให้เมตริกละลายแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยไฟเบอร์ รวมทั้งการอบเพื่อลดและคลายความเครียดในเนื้อวัสดุอันเป็นขั้นตอนหนึ่งในการบ่ม ดังนั้น การปรับค่าคุณสมบัติทางกลในขั้นตอนนี้จึงขึ้นอยู่กับสูตรและวิธีการผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิตแต่ละชนิดหรือสูตรที่ผลิตของผู้ผลิตนั้นๆ เป็นผู้คิดค้นและกำหนด

### 6.4 สรุป

การปรับค่าทั้งหมดในที่นี้เป็นเพียงแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์เชิงกลตัวใดตัวหนึ่งโดยให้คุณสมบัติตัวอื่นๆ คงที่ไว้เป็นเพียงอุดมคติ ซึ่งผลการจำลองในการปรับค่าทั้งหมด ที่แยกเป็นการปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและการปรับค่าความแข็งแรง จะเห็นได้ว่า การปรับเพิ่มหรือลดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพียงไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ แต่ให้ผลการจำลองที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันกับแบบจำลองต้นแบบอย่างเห็นได้ชัด โดยที่การปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์จะทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นน้อยลง ซึ่งความเร็วตกค้างแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ในทางกลับกันสำหรับการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกซึ่งเป็นทิศทางที่รับแรงปะทะของกระสุน

โดยตรง ที่ทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งความเร็วตกค้างแตกต่างกับแบบจำลอง ต้นแบบประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นแผ่นคอมพอสิตแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทาง โดยที่คอมพอสิตแบบสองทิศทางทำให้ค่าความเร็วตกค้างต่ำกว่าคอมพอสิตแบบทิศทางเดียว จากการเพิ่มความแข็งแรงของไฟเบอร์เป็นสองทิศทาง ทำให้แผ่นคอมพอสิตรับแรงได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเหล่านี้เป็นตัวแปรตั้งต้นใน Stiffness matrix ที่ใช้ในการคำนวณความเค้น ความเครียดหรือค่าอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการคำนวณของโปรแกรม จึงทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีผลกระทบต่อผลการจำลองทางจีปนบนแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต สูงกว่าค่าความแข็งแรงของคอมพอสิต

จากหลักความแข็งแรงที่ใช้ในการจำลอง เป็นแบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ที่ใช้หลักความเสียหายจากทิศทางต่างๆ ของคอมพอสิต จึงทำให้การปรับค่าความแข็งแรงตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อย มีผลให้การจำลองเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือแม้กระทั่งการปรับเพิ่มถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หรือ ปรับลด 90 เปอร์เซ็นต์ ยังทำให้ผลการจำลองเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการปรับ ส่วนค่าความแข็งแรงที่มีผลต่อการจำลองมากกว่าความแข็งแรงค่าอื่นๆ ในที่นี้ คือ ความแข็งแรงอัดทั้งการปรับเพิ่มและลด เนื่องจากให้ความแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบที่ไม่มีการปรับค่า 2-3 เปอร์เซ็นต์ เพราะความแข็งแรงอัดนี้เป็นความแข็งแรงในทิศทางที่รับแรงปะทะของกระสุน โดยตรง และการลดความแข็งแรงดึงในทิศทางของไฟเบอร์ ที่ทำให้แตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าความแข็งแรงค่าอื่นให้ความแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

บทนี้จะเป็นการสรุปรวมงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษาและวิจัย โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อของการสรุปผลการจำลอง สรุปผลจากการทดลอง และข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อไปที่ควรศึกษาและวิจัยในอนาคต

#### 7.1 สรุปการจำลอง

จากความต้องการที่จะต้องมีแบบจำลองต้นแบบ ไว้เป็นต้นแบบสำหรับการจำลองที่ใช้ค่าคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ผลิตได้เอง แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านข้อมูลของคุณสมบัติของวัสดุ จึงได้ปรับเปลี่ยนลักษณะการวิจัยโดยได้ทำการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลเพื่อศึกษาแนวโน้มว่าคุณสมบัติตัวใดมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมากที่สุด ไว้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ ในที่นี้จึงได้เริ่มต้นงานวิจัยด้วยการสร้างแบบจำลองโดยใช้รูปร่าง ลักษณะภายนอก และคุณสมบัติของวัสดุของ Gu and Xu (2004) ที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 22 สำหรับแผ่นคอมพอสิตในโปรแกรม LS-DYNA ซึ่งให้ผลจากการจำลองนอกมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองและจำลองของ Gu and Xu (2004) แต่เมื่อตรวจสอบความถูกต้องจากการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ปรากฏว่าแบบจำลองเริ่มต้นที่สร้างขึ้นยังไม่มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะใช้เป็นแบบจำลองต้นแบบได้ เนื่องจากแบบวัสดุชนิดที่ 22 ไม่มีหลักความเสียหายในทิศทางที่ 3 ที่จะทำให้เอลิเมนต์ที่เสียหายจากการปะทะของกระสุนถูกกลบไปจากแบบจำลอง ทำให้การคำนวณไม่ถูกต้องค่าพลังงานภายในแผ่นคอมพอสิตจึงมีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่ถูกต้องตามหลักการสมดุลพลังงานของระบบในโปรแกรม

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้เลือกแบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA ที่มีความเหมาะสมสำหรับการจำลองทางจีปนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมากกว่าแบบวัสดุชนิดที่ 22 โดยแบบวัสดุชนิดที่ 59 นี้มีหลักความเสียหายในทิศทางที่ 3 และหลักการลบเอลิเมนต์ ที่สามารถทำให้เอลิเมนต์ที่เสียหายจากการปะทะของกระสุนถูกกลบไปจากแบบจำลองได้ ผลการจำลองโดยใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ให้ผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการจำลองเริ่มต้นและผลการทดลองของ Gu and Xu (2004) และทั้งให้ค่าพลังงานภายในที่ไม่เป็นลบซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะใช้เป็นแบบจำลองต้นแบบ นอกจากนั้นแล้วผลการจำลองยังให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองและผลการจำลองระดับอนุภาคของ Gu and Li (2005) อีกด้วย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลองแบบ โดยใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA สำหรับจำลองแบบพอลิเมอร์คอมพอสิต ซึ่งใช้สมการ โครงสร้างแบบ

Orthotropic สำหรับวัสดุคอมพอสิต และใช้หลักความเสียหายที่ประยุกต์จากหลักความเสียหายของ Tsi and Wu (1971) ที่เป็นการผสมรวมความเสียหายในทิศทางต่างๆ ของคอมพอสิตเป็นรูปวงรี ซึ่งจากผลการจำลองต้นแบบที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองและจำลองของ Gu and Xu (2004) และมีแนวโน้มของความเร็วดก้างใกล้เคียงกับผลการทดลองและการจำลองระดับอนุภาคของ Gu and Li (2005) ทำให้เชื่อได้ว่าสมการโครงสร้างแบบ Orthotropic สำหรับวัสดุคอมพอสิตและหลักความเสียหายตามแบบวัสดุชนิดที่ 59 ในโปรแกรม LS-DYNA มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการจำลองแบบในงานวิจัยนี้ที่จะนำไปศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลค่าอื่นๆ ต่อไป

การจำลองต้นแบบได้ใช้แผ่นเป้าหมายเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 45×100 ตารางมิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร และวางเอียง 30 องศาตามแนวตั้ง ตามลักษณะของ Gu and Xu (2004) ซึ่งเมื่อจำลองแล้วปรากฏว่ามีความเหมาะสมไม่เพียงพอที่จะเป็นแบบจำลองต้นแบบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกล เนื่องจากขนาดที่เล็กเกินไปทำให้การสะท้อนของคลื่นความเค้นเกิดขึ้นสูงและมุมปะทะที่ไม่ได้ใช้ในการทดลองจริง จึงได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการจำลองในบทที่ 5 ของงานวิจัยนี้ ซึ่งปรากฏว่าขนาดที่ใหญ่ขึ้นโดยกำหนดให้แผ่นเป้าหมายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100×100 ตารางมิลลิเมตร โดยที่ยังคงความหนาเท่าเดิม คือ 5 มิลลิเมตร และมุมปะทะที่แนวตั้งจากมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะใช้เป็นต้นแบบการจำลองสำหรับใช้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงกลในงานวิจัยนี้

จากการที่งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LS-DYNA โดยใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 สำหรับวัสดุคอมพอสิตในการจำลองแบบ การศึกษาพารามิเตอร์เชิงกลในบทที่ 6 จึงได้แบ่งออกเป็นสองส่วนตาม ลักษณะของแบบวัสดุใน โปรแกรม กล่าวคือ ส่วนของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงใน Stiffness matrix ซึ่งเป็นสมการตั้งต้นในการคำนวณค่าต่างๆ และส่วนของค่าความแข็งแรงซึ่งใช้กำหนดความเสียหายของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง

การจำลองในส่วนของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นปรากฏว่า การเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อยในทิศทางของไฟเบอร์ทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นน้อยลง โดยวัดจากค่าความเร็วดก้างของกระสุนเพิ่มมากขึ้นหลังจากแทงทะลุผ่านแผ่นเป้าหมายประกอบกับลักษณะการยืดของแผ่นคอมพอสิตติดไปกับกระสุนเกิดขึ้นน้อยลงหลังจากการปรับเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของไฟเบอร์ กลับกันในส่วนของการเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อยในทิศทางของเมตริกทำให้คอมพอสิตมีความยืดหยุ่นมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นแผ่นคอมพอสิตแบบทางเดียวหรือคอมพอสิตแบบสองทิศทาง เนื่องจากค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางของเมตริกเป็นทิศทางที่รับแรงปะทะของกระสุนโดยตรง จึงมีอิทธิพลสูงกับความยืดหยุ่นในการรับแรงปะทะ

การปรับเพิ่มหรือลดค่าความแข็งแรงแบบต่างๆ ในแผ่นคอมพอสิตเพียงเล็กน้อยไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกันมาก เนื่องจากแบบวัสดุชนิดที่ 59 มีหลักความเสียหายในทิศทางต่างๆ



ของคอมพอสิต ผสมรวมกันคล้ายกับหลักความเสียหายของ Tsi and Wu (1971) การเพิ่มหรือลดค่าความเสียหายตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียวจึงไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบค่าความเสียหายต่างๆ ด้วยกันเอง ปรากฏว่าการปรับค่าความแข็งแรงอัด มีผลกระทบต่อผลการจำลองในส่วนของความเร็วดกค้ำงมากที่สุด เนื่องจากเป็นความแข็งแรงในทิศทางที่รับแรงปะทะของกระสุนโดยตรง กล่าวคือ การปรับค่าในช่วงเดียวกันกับค่าความแข็งแรงค่าอื่นๆ ให้ค่าความเร็วดกค้ำงที่ต่างกับกับแบบจำลองต้นแบบประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การปรับค่าความแข็งแรงอื่นๆ ให้ค่าความเร็วดกค้ำงที่ต่างกับกับแบบจำลองต้นแบบไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์

เหตุผลที่การปรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกับแบบจำลองต้นแบบมากกว่าการปรับค่าความแข็งแรง ก็เนื่องมาจากค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเป็นค่าใน Stiffness matrix ซึ่งเป็นสมการตั้งต้นในการคำนวณค่าต่างๆ ในแบบจำลองแตกต่างกับค่าความแข็งแรงซึ่งเป็นเพียงค่าที่กำหนดหลักความเสียหายเท่านั้น

## 7.2 สรุปการทดลอง

จากผลการทดลองหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ผลิตขึ้นเองในภาคผนวก ที่เกิดค่าความผิดพลาดเป็นจำนวนมากเนื่องมาจาก Strain gage ที่ไม่อาจวัดค่าระยะยืดของชิ้นงานวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตได้อย่างถูกต้องประกอบกับข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือและวิธีการทดสอบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่อาจนำมาใช้ในการจำลองแบบได้ การทดลองในงานวิจัยนี้จึงเป็นได้แค่เพียงแนวทางเริ่มต้นในการที่จะพัฒนาวิธีการหรือรูปแบบการทดลองหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตให้มีความเหมาะสมและถูกต้องมากเพียงพอ ที่จะนำค่าคุณสมบัติเหล่านั้นมาจำลองแบบทางจิปนหรือจำลองในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

## 7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อไป

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่ควรศึกษาต่อไปได้แบ่งออกเป็น 2 แนวทางควบคู่กันไป ได้แก่ แนวทางการวิจัยส่วนของการจำลองแบบ และแนวทางการทดลองหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ

### 7.3.1 แนวทางการวิจัยส่วนของการจำลองแบบ

ควรพัฒนาการจำลองแบบโดยกำหนดให้แผ่นคอมพอสิตมีการคำนวณแยกชิ้นกันอย่างแท้จริงและเป็นการจำลองระดับอนุภาค ซึ่งคำนวณส่วนของไฟเบอร์และเมทริกโดยใช้คุณสมบัติของแต่ละชนิดของวัสดุแยกกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุในระดับอนุภาคหรือระดับเส้นใยซึ่งเป็นลักษณะคุณสมบัติจริงของวัสดุคอมพอสิต

ส่วนของการศึกษาพารามิเตอร์เชิงกลควรมีการศึกษาถึงส่วนผสมระหว่างไฟเบอร์และเมตริกในคอมพอสิตและหาค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำเกราะกันกระสุนของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำไฟเบอร์หรือเมตริกชนิดต่างๆ และมีการทดลองยิงจริงเปรียบเทียบความถูกต้องของส่วนผสมกับผลการจำลอง

### 7.3.2 แนวทางงานวิจัยส่วนของการทดลอง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดลองในงานวิจัยนี้ การพัฒนาการทดลองควรพัฒนาวิธีการวัดระยะขีดของคอมพอสิตหรือเปลี่ยนวิธีการทดลองด้วยวิธีการทดลองตามมาตรฐานอื่นๆ เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือมากกว่าและทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติอื่นๆ นอกเหนือไปจากคุณสมบัติที่ครบถ้วนและถูกต้องสำหรับการจำลองแบบ หรือเพื่องานวิจัยอื่นๆ ที่ต้องทำการศึกษาและทดลองในลักษณะที่คล้ายกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กุลจิรา สุจิโรจน์, ดวงเดือน อางองค์, กฤษดา ประภากร, นุวงศ์ ชลคุป, ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, ศราวุธ รีมดุสิต และ กุณจินี มณีรัตน์. 2004. การพัฒนาเกราะแข็งน้ำหนักเบาสำหรับการใช้งานด้านยุทธโประกรณ์ทางทหารในกองทัพไทย, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

คณะอนุกรรมการมาตรฐานยุทธโประกรณ์เพื่อเกราะป้องกันกระสุนกระทรวงกลาโหม. 2004. มาตรฐานเพื่อเกราะป้องกันกระสุนกระทรวงกลาโหม. กระทรวงกลาโหม.

ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ศราวุธ รีมดุสิต. 2004. การพัฒนาเส้นใยพอลิเอทิลีนพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมตริกชนิดเบนซอกซาซีนอัลลอยด์กับเส้นใยพอลิเอทิลีนหรือเส้นใยอะรามิดและพอลิเมอร์คอมพอสิต/โลหะหรือเซรามิกสำหรับทำเกราะกันกระสุน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

### ภาษาอังกฤษ

ASTM D3039/D 3039M00. 2006. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Test Materials.

ASTM D3518/D 3518M-94. 2001. Standard Test Method for In –Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile of a  $\pm 45^\circ$  Laminate. American Society for Test Materials.

Chang, F.K. and Chang, K.Y. 1987. Progressive Damage Model for Laminated Composite Containing Stress Concentration. Journal of Composite. 21: 834-55.

Cheeseman, B.A., Yen, C.F., Hoppel, C.P.R., Gama, B.A. and Gillespie, J.W. 2004. Modeling of the Compressive Failure of Plain Weave Composites. ASC/ASTM-D30 Joint 19th Annual Technical Conference, Atlanta Georgia, 17-20 October.

Clegg, R.A., White, D.M., Riedel, W. and Harwick, W. 2006. Hypervelocity Impact Damage Prediction in Composites, Part II – Experimental Investigations and Simulations. International Journal of Impact Engineering. 33: 670-680.

Fawaz, Z., Zheng, W. and Behdinin, K. 2004. Numerical Simulation of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramics Composite Armour. Composite Structures. 63: 387-395.

Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, K.B., Yu, J. C. 2001. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. Composite Structures. 52: 381-395.

- Goad, K.J.W. 1982. Ammunition (Including Grenades & Mines). Battlefield weapons System & Technology volume.3. New York: Brassey's Publishers.
- Gu, B. 2007. Private Communication.
- Gu, B. 2004. Ballistic Penetration of Conically Cylindrical Steel Projectile into Plain-woven Fabric. Journal of Composite Materials. 38: 22.
- Gu, B. and Li, Y. 2005. Ballistic Perforation of Conically Cylindrical Steel Projectile into Three-Dimensional Braided Composites. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal. 43: 426-434.
- Gu, B. and Xu, J. 2004. Finite Element Calculation of 4-Step 3-Dimensional Braided Composite under Ballistic Perforation. Composites Part B: Engineering. 35: 291-297.
- Jenq, S.T., Kuo, J.T. and Sheu, L.T. 1998. Ballistic Impact Response of 3-D Four-Step Braided Glass/Epoxy Composites. Key Engineering Materials. 141-143: 349-366.
- John, O.H. 2005. LS-DYNA Theoretical Manual: Livermore Software Technology Corporation: Version 970.
- Johnson, G.R., Beissel, S.R. and Cunniff, P.M. 1999. A Computational Model for Fabrics Subjected to Ballistic Impact. Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics. San Antonio, Texas, 15-19 November, 962-969.
- Jovicic, J.M. 2003. Numerical Modeling and Analysis of Static and Ballistic Behavior of Multi-layered/Multiphase Composite Materials Using Detailed Microstructural Discretization. Ph.D. thesis, Department of Materials Engineering, Drexel University, Philadelphia, USA.
- Kumrungsie, P., Maneeratana, K. and Chollacoop, N. 2007. Simulation of Ballistic Impact on Polymer Composite Armor. NAC 2007 NSTDA Annual Conferences. Pathumthani, Thailand, 28-30 March.
- Kumrungsie, P., Maneeratana, K. and Chollacoop, N. 2007. Effects of Fiber Orientation on Ballistic Impact upon Polymer Composite Plate. ME-NETT 21 Conferences. Chonburi, Thailand, 17-19 October.
- Lee, M. and Yoo, Y.H. 2001. Ballistic Impact on Ceramic/Aramid Armour Systems. International Journal of Impact Engineering. 25: 819-829.
- Lim, C.T., Shim, V.P.W. and Ng, Y.H. 2003. Finite-Element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor. International Journal of Impact Engineering. 28: 13-31.

- Pattomsop, S. 2005. Development of Ballistic Armor from Kevlar Fiber and Polybenzoxazine Alloys. M.Eng. thesis, Department of Chemicals Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- Schweizerhof, K., Weimar, K., Munz, Th., Rottner, Th. 1998. Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Model in LS-DYNA Merits and Limits. LS-DYNA World Conference. Detroit. Michigan, USA.
- Shim, V.P.W., Lim, C.T. and Foo, K.J. 2001. Dynamic Mechanical Properties of Fabric Armour. International Journal of Impact Engineering. 25: 1-15.
- Shim, V.P.W., Tan, V.B.C. and Tay, T.E. 1995. Modeling Deformation and Damage Characteristics of Woven Fabric under Small Projectile Impact. International Journal of Impact Engineering. 16: 585-605.
- Siribodhi, P., Wongdontri, W. and Twinprawat P. 2003. Damage Assessment of Naval Surface Vessels Resulted from Underwater Explosions. ME-NETT 17 Conferences. Pracheanburi, Thailand, 15-17 October.
- Sriram, R., Vaidya, U.K., Kim, J.E. 2006. Blast impact response of aluminum foam sandwich composites. J MATER SCI. 41. 4023-4039.
- Tan, V.B.C. and Ching, T.W. 2006. Computation Simulation of Fabric Armor Subjected to Ballistic Impacts. International Journal of Impact Engineering. 32:1737-1751.
- Tan, V.B.C., Zeng, X.S. and Shim, V.P.W. 2005. Modeling Crimp in Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact. International Journal of Impact Engineering. 32: 561-574.
- Tsai W.S. and Wu M.E. 1971. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. Journal of Composites Materials. 3-11.
- Vanichayangkuranont, T., Maneeratana, K. and Chollacoop, N. 2005. Simulations of Stress Wave Propagation from Dynamic Loads. ME-NETT 19 Conference, Phuket, Thailand, 19-21 October.
- Yen, C.F. 2002. Ballistic Impact Modeling of Composite Materials. Proceedings of the 7th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn MI, 19-21 May.
- Zeng, X.S., Shim, V.P.W. and Tan, V.B.C. 2005. Influence of Boundary Conditions on the Ballistic Performance of High-Strength Fabric Targets. International Journal of Impact Engineering. 32: 631-642.



## บรรณานุกรม

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2547. ไฟไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Gibson, F.R. 1994. Principles of Composite Material Mechanics. New York: McGraw-Hill.

Jones, R.M. 1999. Mechanics of Composite Materials. Philadelphia: Tay&Francis.

Michael, W.H. 1998. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Material. New York: McGraw-Hill.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต

การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าคุณสมบัติทางกลสำหรับการจำลองแบบ คุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตมีหลายค่า เนื่องจากเป็นวัสดุแบบ Orthotropic โดยจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามทิศทางตามแกนทั้งสามแกน แต่การทดสอบเลือกที่จะทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลในแนวระนาบเพียงบางค่าเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดทางลักษณะของชิ้นงาน เครื่องมือการทดสอบ และข้อจำกัดอื่นๆ เพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้อง แม่นยำและน่าเชื่อถือของค่าที่ได้ในระดับหนึ่ง รวมทั้งความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าเหล่านั้น เพราะคุณสมบัติบางตัวก็มีผลค่อนข้างน้อยต่อการจำลองแบบ จึงสามารถประมาณค่าคุณสมบัติบางตัวได้จากคุณสมบัติอื่นที่มีความสำคัญมากกว่าสำหรับการจำลองแบบ

การทดสอบจะเป็นการทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ทดสอบแรงดึงหาค่า Young's modulus ตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 (ASTM, 2006) และทดสอบแรงดึงหาค่า Shear modulus ตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94 (ASTM, 2001) โดยจะมีการอธิบายการเตรียมชิ้นงาน การทดสอบ และผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### ก.1 การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานผลิตด้วยขั้นตอนและวิธีตามแบบของ Pattomsop (2005) โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร และยาว 250 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 การเตรียมชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็นการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานและการเตรียมชิ้นทดสอบจากแผ่นชิ้นงาน

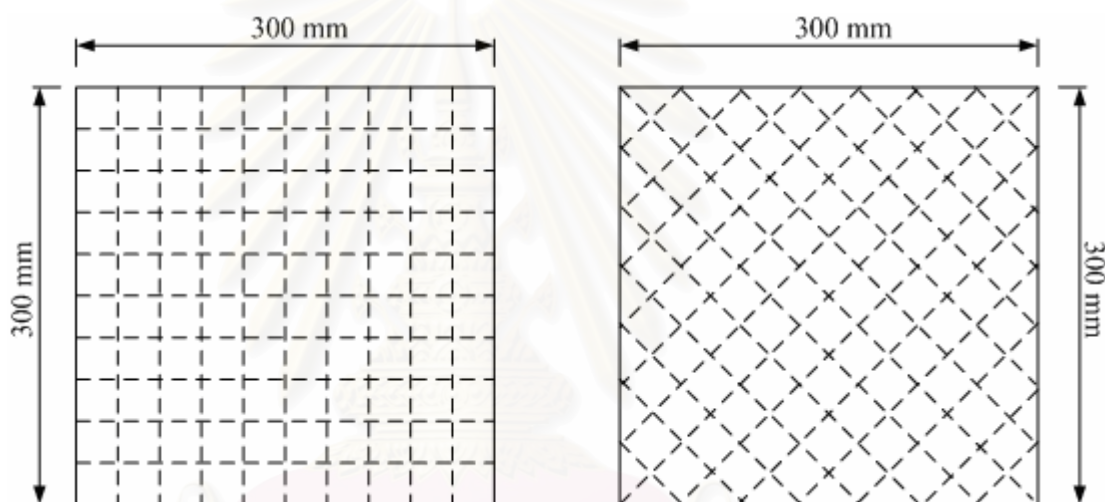
##### ก.1.1 การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานและการเตรียมชิ้นทดสอบ ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุดังต่อไปนี้

1. แผ่น Kevlar® ชนิด 29
2. เรซิน จากการผสม Polybenzoxazine (BA) กับ Urethane Elastomer (PU) ในอัตราส่วน 80/20
3. เครื่องอัดความร้อน (Hot press) ยี่ห้อ Wabauh รุ่น Genesis Range Maximum temperature 300° และ Maximum pressure 220 kg/cm<sup>2</sup>
4. เครื่องอบ ยี่ห้อ Heraeus รุ่น Max 250 Range room temperature-250°
5. เครื่องกัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Adcock-Shipley รุ่น Maximum spindle speeds 67-2300 rpm

6. แผ่นสังกะสีขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร 4 อันต่อชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้น
7. กาวอีพอกซีชนิดแข็ง ยี่ห้อ Pattex รุ่น EPOXE DURO 17

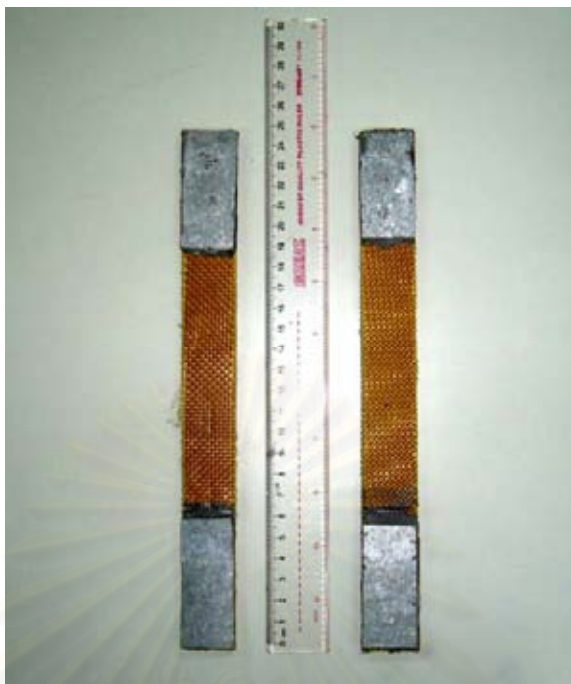
### ก.1.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น ดังต่อไปนี้

1. ตัดแผ่น Kevlar® ตามการวางตัวของเส้นใย สำหรับการทดสอบแรงดึงหาค่า Young's modulus ตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 และตัดเป็นมุม 45 องศา กับการวางตัวของเส้นใย สำหรับการทดสอบแรงดึงหาค่า Shear modulus ตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94 จำนวนอย่างละ 20 แผ่น ขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ลักษณะการตัดแผ่น Kevlar® ตามยาวของเส้นใย (ซ้าย) และตัดเป็นมุม 45 องศา กับการวางตัวของเส้นใย (ขวา) โดยเส้นประแสดงการสานของเส้นใย

2. ทาเรซิน บนแผ่น Kevlar® ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง นำแผ่น Kevlar® มาวางทับกันและรีดให้เรซินกระจายและเชื่อมติดกันทั่วทั้งแผ่นจนกระทั่งซ้อนกันได้ 20 แผ่น
3. นำแผ่น Kevlar® ที่ทาเรซินแล้วไปอัดด้วยเครื่องอัดความร้อน ด้วยความดันขนาด 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
4. นำแผ่นชิ้นงานที่อัดเสร็จแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 170, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับอย่างละ 120 นาที
5. นำแผ่นชิ้นงานไปตัดด้วยเครื่องกั๊กให้ได้ขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร และยาว 250 มิลลิเมตร
6. ทากาวอีพอกซีชนิดแข็งที่ด้านบนและด้านล่าง ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แล้วติดด้วยสังกะสีทั้ง 4 ด้าน กดด้วยปากกาจับงาน ทิ้งไว้หนึ่งคืนก่อนการทดสอบ จะได้ชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตสำหรับการทดสอบหาค่า Young's modulus (ซ้าย) และ Shear modulus (ขวา)

## ก.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะทำตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 สำหรับหาค่า Young's modulus และ ASTM D3518/D 3518M-94 สำหรับหาค่า Shear modulus โดยมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

### ก.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในการทดสอบใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังต่อไปนี้

1. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Auto Graph AG-IS 100 kN Range 0-100 kN และ Resolution 0.2 mm/min ที่ความเร็ว 1-40 mm/min พร้อมชุดคอมพิวเตอร์ควบคุมดังแสดงในรูปที่ ก.3





รูปที่ ก.3 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU พร้อมชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม

2. Extensometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น SI50-50-25 Range 0-25 mm และ Resolution 0.5-1  $\mu\epsilon$  ดังรูปที่ ก.4



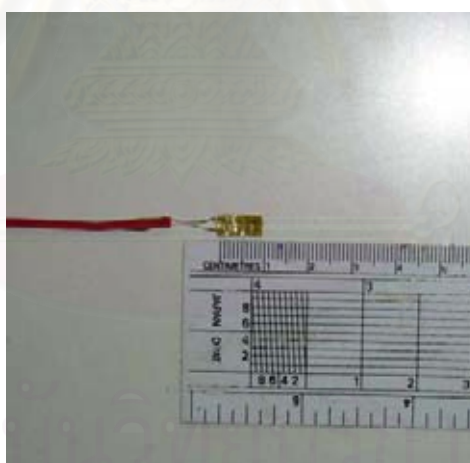
รูปที่ ก.4 Extensometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น SI50-50-25

3. Digital strain meter รุ่น TC-31K Range  $\pm 30000 \mu\epsilon$  Resolution  $1 \mu\epsilon$  พร้อมชุดขยายสัญญาณ ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 Digital strain meter รุ่น TC-31K พร้อมชุดขยายสัญญาณ

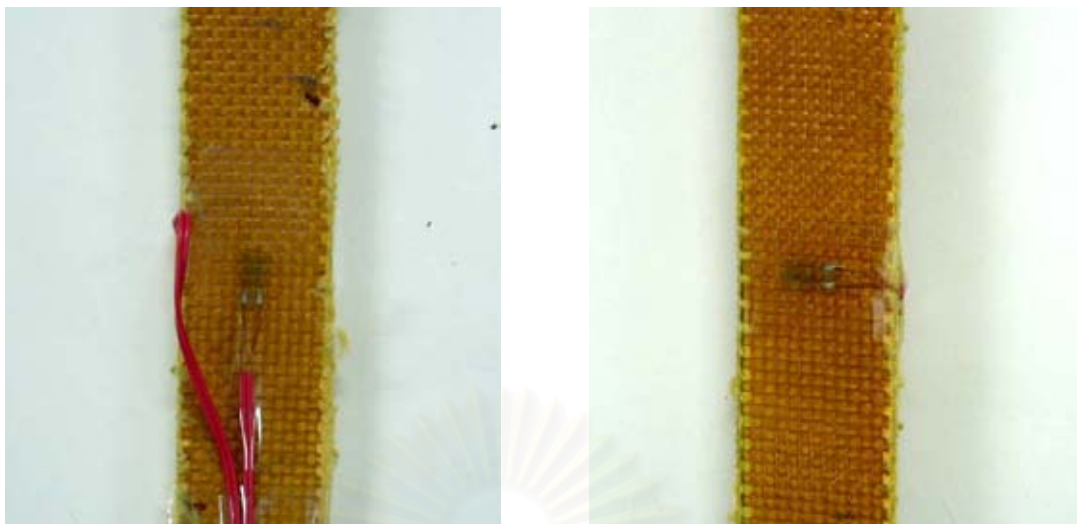
4. Strain gages ยี่ห้อ Kyowa รุ่น KFP-2-120-C1-65L1M2R ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 Strain gages ยี่ห้อ Kyowa รุ่น KFP-2-120-C1-65L1M2R

#### ก.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติด Strain gage ตามความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ด้านหน้า และติดตามขวางของชิ้นงานที่ด้านหลังดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 ลักษณะการติด Strain gage ตามความยาวด้านหน้า (ขวา) และตามขวางด้านหลัง (ซ้าย)

2. นำชิ้นงานใส่ที่ปากจับงานเครื่องทดสอบและขันปากจับให้แน่น
3. ติด Extensometer บริเวณกลางชิ้นงานแล้วยึดให้แน่น
4. ต่อสายสัญญาณ Extensometer เข้ากับชุดขยายสัญญาณที่เครื่องทดสอบแรงดึง และต่อสายสัญญาณ Strain gagesเข้ากับชุดขยายสัญญาณที่ Digital strain meter ดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบและเครื่องมือวัดต่างๆ ที่ติดตั้งเข้ากับชิ้นงาน

5. ปรับค่าภาระการดึง (Load) ระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) ของเครื่องดึง รวมทั้งของ Extensometer และ Strain gage ให้มีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์
6. ปรับอัตราการดึงของเครื่องทดสอบให้เคลื่อนที่ขึ้นให้ได้ 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที
7. เริ่มการทดสอบโดยผู้ทดสอบต้องทำการจดค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานเอง จาก Digital strain meter เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่สามารถเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมได้

### ก.3 ผลการทดสอบ

ในส่วนนี้จะกล่าวสูตรที่ใช้ในการวิเคราะห์และผลการทดลองที่ได้

#### ก.3.1 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลจากการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 และ ASTM D3518/D 3518M-94 โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### ก.3.1.1 มาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) และ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สามารถคำนวณความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และความเค้นที่จุดต่างๆ ได้ตามสมการที่ ก.1 และ ก.2 ตามลำดับ

$$F^{tu} = \frac{P^{\max}}{A} \quad (\text{ก.1})$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ  $F^{tu}$  คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa),  $P^{\max}$  คือ แรงดึงสูงสุดก่อนเกิดการเสียหาย (N),  $\sigma_i$  คือ ความเค้นแรงดึงที่จุดข้อมูล  $i$  (MPa),  $P_i$  คือ แรงดึงที่จุดข้อมูล  $i$  (N) และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย (ตารางมิลลิเมตร)

2. ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) สามารถเลือกใช้ค่าความเครียดในช่วง 1000  $\mu\epsilon$  ถึง 3000  $\mu\epsilon$  ในการคำนวณค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นได้ตามสมการที่ ก.3

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (GPa),  $\Delta\sigma$  คือ ความแตกต่างความเค้นแรงดึงระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียด (MPa),  $\Delta\varepsilon$  คือ ความแตกต่างความเครียดระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียด

3. อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ใช้ช่วงการวัดเดียวกันกับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งหาได้จากค่าความเครียดตามขวางที่ Strain gage แต่ละอัน และค่าความเครียดตามยาวได้ตามสมการ ก.4

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง,  $\Delta\varepsilon_t$  คือ ความแตกต่างความเครียดตามขวางระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียดตามยาวและ  $\Delta\varepsilon_l$  คือ ความแตกต่างความเครียดตามยาวระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียดตามยาว

#### ก.3.1.2 ASTM D3518/D 3518M-94

1. ความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress) สามารถคำนวณความเค้นเฉือนสูงสุดในระนาบสำหรับแผ่น laminate ด้วยสมการที่ ก.5 และความเค้นแรงเฉือนที่จุดต่างๆได้ตามสมการที่ ก.6

$$\tau_{12}^m = \frac{P^m}{2A} \quad (\text{ก.5})$$

$$\tau_{12i} = \frac{P_i}{2A} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ  $\tau_{12}^m$  คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดในระนาบ (MPa),  $P^m$  คือ แรงดึงสูงสุดที่ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์เริ่มต้นของความเครียดแรงเฉือน,  $\tau_{12i}$  คือ ความเค้นเฉือนที่จุดข้อมูล  $i$  (MPa),  $P_i$  คือ แรงดึงที่จุดข้อมูล  $i$  (N) และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย (ตารางมิลลิเมตร)

2. ความเครียดเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress) คำนวณได้จากสมการที่ ก.7

$$\gamma_{12i} = \varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi} \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ  $\gamma_{12i}$  คือ ความเครียดเฉือนที่จุดข้อมูล  $i$  ( $\mu\varepsilon$ ),  $\varepsilon_{xi}$  คือ ความเครียดตามยาวที่จุดข้อมูล  $i$  ( $\mu\varepsilon$ ),  $\varepsilon_{yi}$  คือ ความเครียดตามขวางที่จุดข้อมูล  $i$  ( $\mu\varepsilon$ ),



3. ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแรงเฉือน (Shear modulus of elasticity) ใช้ช่วงการวัดที่ 1500  $\mu\epsilon$  ถึง 4000  $\mu\epsilon$  ในการคำนวณตามสมการที่ ก.8

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ  $G_{12}$  คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแรงเฉือน (GPa),  $\Delta\tau_{12}$  คือ ความแตกต่างความเค้นเฉือนระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียด (MPa),  $\Delta\gamma_{12}$  คือ ความแตกต่างระหว่างสองจุดตามช่วงการวัดค่าความเครียด

### ก.3.2 ผลการทดสอบ

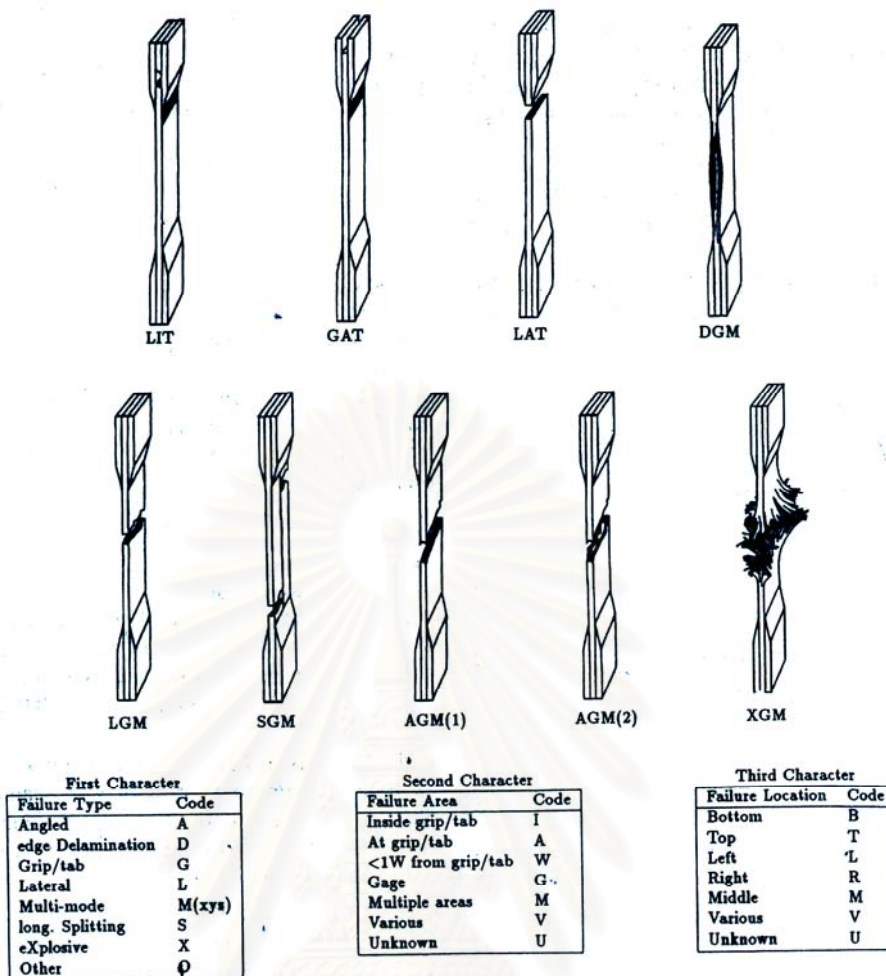
ผลการทดสอบที่ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนตามมาตรฐานที่ได้ทดสอบ คือ

#### 1 มาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00

เมื่อพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานด้วยสายตาพบว่า ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียหายบริเวณตรงกลางของชิ้นงานในลักษณะที่มีการแยกตัวของชั้นไฟเบอร์ออกจากกันดังแสดงในรูปที่ ก.9 โดยชิ้นงานจะไม่ขาดแยกเป็นสองส่วน ซึ่งลักษณะความเสียหายเช่นนี้เป็นหนึ่งความเสียหายของวัสดุคอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ ก 10

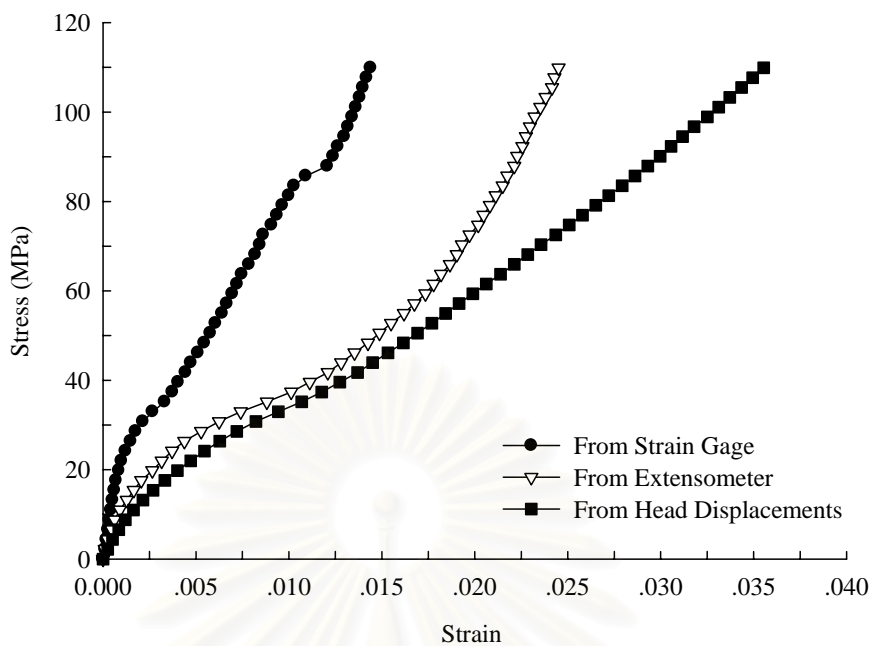


รูปที่ ก.9 ลักษณะความเสียหายจากตัวอย่างชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00



รูปที่ ก.10 ตัวอย่างความเสียหายจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 (ASTM, 2006)

รูปแสดงตัวอย่างกราฟผลการทดสอบและค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการคำนวณคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้ถูกแสดงในรูปที่ ก 11 และตารางสรุปที่ ก.1



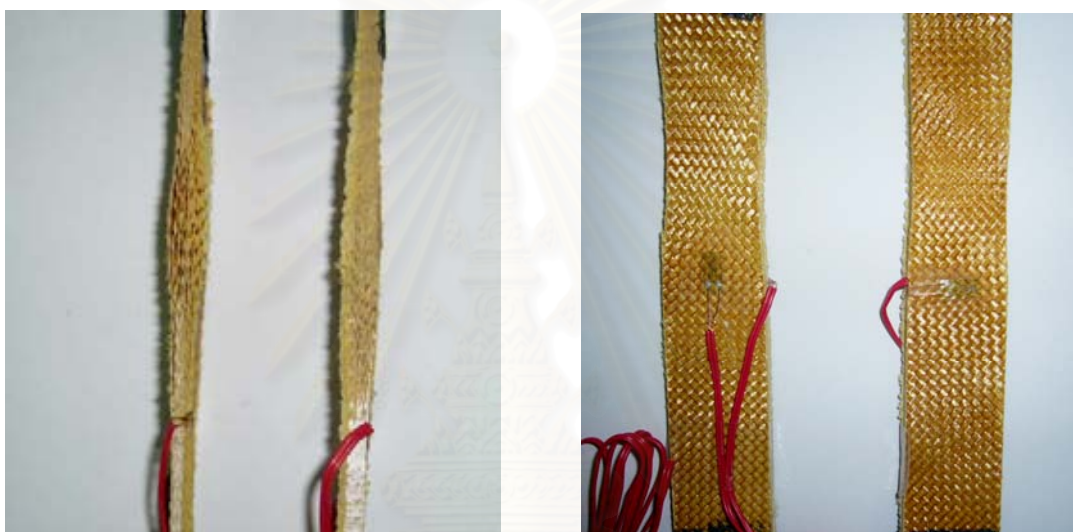
รูปที่ ก.11 ลักษณะตัวอย่างของกราฟ Stress/Strain Curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00

ตารางที่ ก.1 ผลการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00

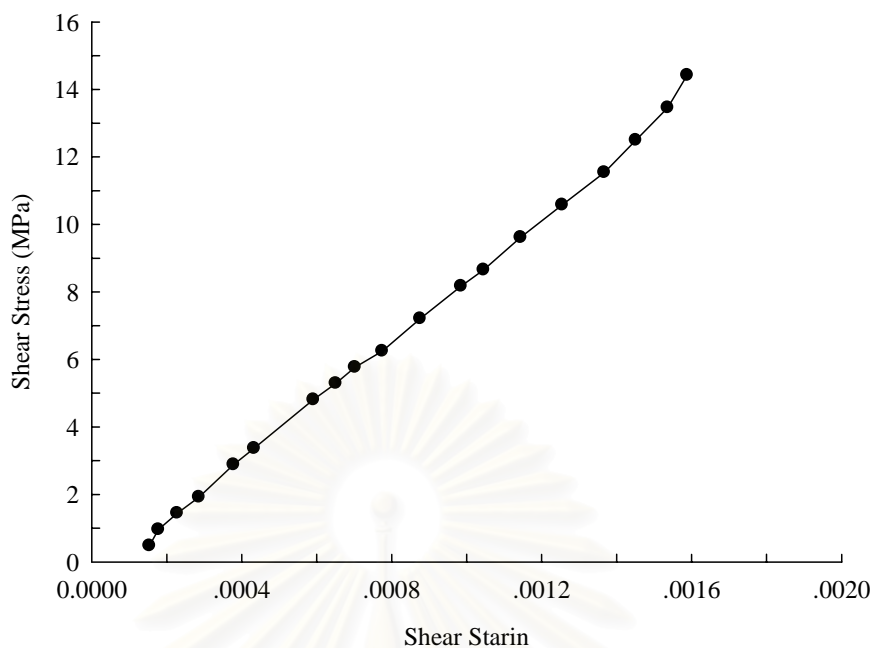
ชิ้นงานที่	ค่าความ แข็งแรงดึง (Tensile Strength, MPa)	อัตราส่วนปัว ซอง (Poisson ratio)	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Young' modulus, GPa)		
			Strain gage	Extensometer	Head Displacements
1	273	0.046	4.61	4.81	4.00
2	286	0.541	37.8	4.89	5.81
3	313	0.707	5.32	2.52	2.29
4	246	0.192	9.13	3.78	4.48
5	317	-	10.41	3.59	5.85
6	338	0.299	4.23	1.81	3.24
ค่า SD	33.53	0.266	12.93	1.26	1.34
ค่าเฉลี่ย	295.5	0.357	11.92	3.53	4.27

## 2. มาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94

เมื่อพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานด้วยสายตาพบว่า ชิ้นงานมีลักษณะความเสียหายแบบแยกตัวออกจากกัน โดยจะไหลออกด้านข้างตามทิศทางของไฟเบอร์ ซึ่งค่าความแข็งแรงจากการดึงในทิศทางนี้มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการดึงตามทิศทางของไฟเบอร์ ลักษณะความเสียหายจะเกิดขึ้นน้อยมากแตกต่างกับการทดสอบแรงดึงตามแนวของไฟเบอร์อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ ก 12 โดยตัวอย่างลักษณะรูปภาพ Stress/strain curve ถูกแสดงไว้ในรูปที่ ก 13 และ ค่าคุณสมบัติทางกลที่คำนวณได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ ก 2



รูปที่ ก.12 ลักษณะความเสียหายจากตัวอย่างชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94



รูปที่ ก.13 ลักษณะตัวอย่างของกราฟ Shear Stress/strain curve ที่คำนวณได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94

ชั้นงานที่	ค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear Strength, MPa)	มุมเอียง (องศา)	ค่ามอดูลัสความเค้นเฉือน (Shear modulus, GPa)
1	13.7	0.83	11.43
2	16	0.69	6.16
3	2.8	0.85	4.96
4	14	0.81	8.63
ค่า SD	5.97	0.071	2.86
ค่าเฉลี่ย	11.63	0.80	7.80

#### ก.4 การวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

การวิจารณ์และสรุปผลแบ่งเป็น 2 ส่วน ตามมาตรฐานที่ได้ทดสอบดังนี้



#### ก 4.1 มาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00

จากตารางที่ ก.1 ในส่วนของการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 นั้น ถ้าพิจารณาเพียงความแข็งแรงดึง จะเห็นได้ว่า แม้ค่าจะแตกต่างกันอยู่บ้างแต่ก็ยังอยู่ในกลุ่ม ทั้งนี้เป็นเพราะการวัดค่าในส่วนนี้ค่อนข้างจะถูกต้องและน่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จาก Load cell จากเครื่องทดสอบโดยตรง จากจุดที่ใช้แรงดึงสูงสุดในการดึง (Maximum load) ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ อยู่ที่ประมาณ 300 MPa ถือว่าเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของ Twaron® ของ Gu and Xu (2004) ที่ใช้ค่าในการจำลองผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีค่าถึง 1145 MPa

ต่อมาเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนปัวซองจะเห็นได้ว่ามีค่าแต่ละชิ้นงานทดสอบแตกต่างกันมาก บางอันค่าที่ได้ออกมาไม่น่าจะเป็นไปได้ หรือแม้กระทั่งไม่สามารถวัดค่าออกมาได้ ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากหลายประการ เช่น

1. ผิวของชิ้นงานที่ไม่เรียบจากการที่เป็นแผ่น Kevlar® ซึ่งเป็นเส้นใยไฟเบอร์แบบถัก แม้จะนำมาผ่านขั้นตอนมาเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตแล้วก็ตาม ทำให้การวัดค่าจาก Strain gage ออกมามีความคลาดเคลื่อนสูง
2. เกิดการแยกชั้นของ Laminate (Delaminate) ขณะทำการทดสอบเนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตชนิดนี้เอง จากเดิมที่ค่อนข้างจะไม่ใช่เนื้อเดียวกันอยู่แล้ว เมื่อทำการทดสอบแรงดึงยิ่งเกิดการแยกชั้นกันมากขึ้น และไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดค่าของ Strain gage ยิ่งน้อยลง
3. จากการแยกชั้นของ Laminate ทำให้เกิดการขยายตัวในทิศทางของเมตริก (ทิศทางด้านความหนา) ซึ่งสำหรับวัสดุแบบ Isotropic จะมีการหดตัวเมื่อเกิดการดึง แต่จากการทดลองวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตชนิดนี้ก็กลับเกิดการขยายตัว จนอาจเป็นสาเหตุให้ค่าที่ Strain gage วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมาก
4. การเก็บค่าที่ได้จาก Strain gage อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการจดบันทึกเนื่องจากต้องจดค่าจากจุดที่กำหนดการไว้ เพราะชุดของ Strain meter ไม่สามารถต่อเข้ากับเครื่องทดสอบเพื่อเก็บค่าโดยตรง จากข้อจำกัดของอุปกรณ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดอาจเป็นไปได้ว่า ค่าที่วัดได้จาก Strain gage ไม่อาจใช้ได้ จากความคลาดเคลื่อนทั้งหลายที่เกิดขึ้น ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นค่าอัตราส่วนปัวซองหรือค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่วัดได้จาก Strain gage จึงไม่มีความน่าเชื่อถือ ไม่อาจนำค่ามาใช้ได้

ส่วนค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จาก Extensometer และ Head displacements แม้จะแตกต่างกันอยู่บ้าง แต่ก็มีแนวโน้มของค่าไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าที่วัดออกมาได้แม้จะไม่เป็นค่าที่ได้จากจุด เพียงจุดเดียวดังเช่นค่าจาก Strain gage ซึ่งเป็นการวัดทั้งชิ้นงานสำหรับ Head displacements หรือวัดเป็นช่วงที่ยาวขึ้น (25 mm) กว่า Strain gage สำหรับ Extensometer ถือ

ว่าเป็นการวัดแบบ Global อาจมีความแม่นยำน้อยกว่าการวัดแบบ Local ที่นิยมใช้วัดวัสดุแบบ Isotropic ดังเช่นการใช้ Strain gage วัดค่าจากการทดสอบการดึงวัสดุทั่วไป แต่ก็อาจจะพอใช้ศึกษาแนวโน้มคุณสมบัติของวัสดุได้ โดยค่าที่ได้จากทั้ง 2 เครื่องมือวัดอยู่ที่ประมาณ 4 GPa ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ คุณสมบัติของ Twaron® ของ Gu and Xu (2004) ที่มีค่าถึง 20.44 GPa อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ อาจใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติของวัสดุจริงๆ แล้วก็อาจจะเป็นไปได้ เพราะเนื่องจากเป็นวัสดุคอมพอสิตคอนกรีตชนิดกันโดยสิ้นเชิงทั้ง ไฟเบอร์และเมตริกจึงไม่น่าจะนำค่าที่ได้มาเทียบกัน

ดังนั้นจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039/D 3039M-00 จึงสรุปได้ว่า

1. ค่าที่วัดจาก Strain gage ไม่สามารถใช้ได้ จากความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปัวซองและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่วัดได้จาก Strain gage ไม่มีความน่าเชื่อถือ
2. ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานมีค่าประมาณ 300 MPa
3. ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นจากการวัดแบบ Global ซึ่งอาจมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งมีค่าประมาณ 4 GPa

#### ก 4.2 มาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94

สำหรับค่าความเค้นแรงเฉือนที่ได้ เป็นการคำนวณค่าที่ได้จากการวัดภาระสูงสุดจาก Load cell จากเครื่องทดสอบโดยตรง คล้ายกับค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง แม้ว่าค่าที่ได้จากชิ้นงานบางอันมีความคลาดเคลื่อนกับอันอื่นอยู่มากก็ตาม แต่ค่าความแข็งแรงเฉือนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความแข็งแรงดึงที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึง เนื่องจากวัสดุเกิดการไถลออกด้านข้างตามทิศทางของไฟเบอร์และเกิดการแยกชั้นของ Laminate จึงน่าจะเป็นไปได้พอสมควร ซึ่งค่าอยู่ที่ประมาณ 15 MPa

ส่วนค่ามอดูลัสความเค้นเฉือน เป็นค่าที่คำนวณได้จากมุมเอียงซึ่งคำนวณมาจาก ระยะยืดที่ได้จาก Strain gage อีกครั้งหนึ่ง ค่าที่ได้จึงไม่มีความน่าเชื่อถือ จากความคลาดเคลื่อนต่างๆ จากการวัดของ Strain gage ในหัวข้อที่แล้ว และลักษณะของชิ้นงานที่ไม่อาจควบคุมให้มีการวางตัวของไฟเบอร์วางเอียงหรือตัดให้ได้มุม 45 องศา อย่างแน่นอน รวมทั้งความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดจากลักษณะของชิ้นงานและวิธีการทดสอบ ที่เป็นแต่เพียงการประมาณในอุดมคติ ที่ไม่อาจทำให้เกิดความเค้นเฉือนในชิ้นงานได้จริงๆ หรือผลกระทบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากเหตุผลดังกล่าว

ดังนั้นจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3518/D 3518M-94 จึงสรุปได้ว่า

1. ค่าที่วัดจาก Strain gage ไม่สามารถใช้ได้ จากความคลาดเคลื่อนต่างๆ เช่นเดียวกับหัวข้อที่แล้ว ส่งผลให้ค่ามอดูลัสความเค้นเฉือนที่วัดได้จาก Strain gage ไม่มีความน่าเชื่อถือ

- ค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานมีค่าประมาณ 15 MPa ซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง จากลักษณะของชิ้นงานและการทดลองที่ไม่อาจทำให้เกิดความเค้นเฉือนในชิ้นงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (Pure shear)

โดยภาพรวมการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากลักษณะของชิ้นงานที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งผิวไม่เรียบ อันเป็นลักษณะปกติของพอลิเมอร์คอมพอสิต ทำให้เกิดความยากยิ่งในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบที่มีอยู่ ทำให้การทดสอบในครั้งนี้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้น การทดสอบนี้อาจใช้ได้เพียงเป็นแนวทางเบื้องต้น ที่จะทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ในครั้งต่อไป เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและหาแนวทางทดสอบให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น



**ภาคผนวก ข**  
**ตัวอย่างชุดคำสั่งของแบบจำลองต้นแบบ**

ตัวอย่างชุดคำสั่งต่อไปนี้นี้เป็นข้อมูลของแบบจำลองต้นแบบที่ใช้แบบวัสดุชนิดที่ 59 โดยผลการจำลองที่ได้แสดงโดยเส้นความเร็วของกระสุนที่ลดลงต่อเวลารูปที่ 4.16 และการแทงทะลุผ่านทั้งด้านหน้าและด้านข้าง แสดงดังในรูปที่ 4.19

\*KEYWORD

\*TITLE

Prototype model:Rigid bullet impact upon polymer composite Mat 59 Rectangular plate 45×100 cm<sup>2</sup> inclined model create by Prayut Kumrungsie 2008.

\$\$ HM\_OUTPUT\_DECK created 17:37:09 03-21-2008 by HyperMesh Version 7.0

\$\$ Ls-dyna Input Deck Generated by HyperMesh Version : 7.0

\$\$ Generated using HyperMesh-Ls-dyna 970 Template Version :7.0

\$\$Unit: gram, cm, microsec, 1e+07 N, Mbar, 1e+07 N-cm

\$\$-----Control solution-----

\*CONTROL\_TERMINATION

\$\$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDENG ENDMAS

150.0

\*CONTROL\_TIMESTEP

\$\$ DTINIT TSSFAC ISDO TSLIMIT DT2MS LCTM ERODE

MSIST

0.9

\*CONTROL\_HOURLASS

\$\$ IHQ QH

4 0.1

\*CONTROL\_CONTACT

\$\$ SLSFAC RWPNAL ISLCHK SHLTHK PENOPT THKCHG ORIEN

ENMASS

10.0

\$\$ USRSTR USRFRC NSBCS INTERM XPENE SSTHK ECDT

TIEDPRJ

\*CONTROL\_OUTPUT

\$\$ NPOPT NEECHO NREFUP IACCOP OPIFS IPNINT IKEDIT

1 3

\*CONTROL\_ENERGY

\$\$ HGEN RWEN SLNTEN RYLEN

2 1 2 2

```

*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$HMNAME GROUPS    1ErodingSurface
$HMCOLOR GROUPS  1  12
    1
    1  2  3  3

    1
$$DATABASE_OPTION -- Control Cards for ASCII output
*DATABASE_GLSTAT
    5.0  1

*DATABASE_MATSUM
    5.0  1

*DATABASE_RCFORC
    5.0  1

*DATABASE_SLEOUT
    5.0  1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
    5.0  1

$$ DT/CYCL  LCDT  BEAM  NPLTC
    5.0  1
    0

$$-----Material model-----
*MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL
$HMNAME MATS    1MAT59_Solid
    1  1.23  0.204  0.089  0.089  0.31  0.31  0.49
    0.0164  0.0303  0.0164  0.204

    0.0039  0.0039  0.0039  0.0065  0.0065  0.0065
    0.01145  0.0013  0.0013

*MAT_RIGID
$HMNAME MATS    2Mat_20
    2  8.377  2.1  0.3
    1.0  2  7
    0

*PART
$HMNAME COMPS    1Target

```



```

$HMCOLOR COMPS      1      9

      1      1      1
$HMNAME COMPS      2Bullet
$HMCOLOR COMPS      2     10

      2      2      2
*SECTION_SOLID
$HMNAME PROPS      1Target
      1      1
$HMNAME PROPS      2Bullet
      2
$$-----Boundary condition-----
*INITIAL_VELOCITY_GENERATION
$HMNAME LOADCOLS      1Tran_Vel
$HMCOLOR LOADCOLS      1     10
      2      2      0.0195      -0.03377

*BOUNDARY_SPC_NODE
$HMNAME LOADCOLS      2SPC
$HMCOLOR LOADCOLS      2     15
554366      0      1      1      1      1      1      1
554362      0      1      1      1      1      1      1
554361      0      1      1      1      1      1      1
.
.
.
$$-----Position of node and elements-----
*NODE
1  0.6327581694  1.00000000E-03  0.49022477323
2 -0.369860057  0.304568604      0.64200907323
3  0.0000000000  1.00000000E-03  0.00139267494
.
.
.
*ELEMENT_SOLID
1  1  460149  460148  460155  460153  473979  473982  473981  473980
2  1  460148  460147  460156  460155  473982  473984  473983  473981
3  1  460147  460143  460142  460156  473984  473986  473985  473983
.
.
.
*END

```

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ประยูทธ์ คำเรืองศรี เกิดวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548

ขณะเดียวกัน นาย ประยูทธ์ คำเรืองศรี ยังสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากคณะนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2548 และสอบได้เนติบัณฑิต สมัยที่ 60 จากสำนักฝึกอบรมกฎหมายแห่งเนติบัณฑิตยสภา ในปีการศึกษา 2550



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย