

การออกแบบฝาปิดท่อระบายน้ำจากคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว  
โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DESIGN OF MANHOLE COVER FROM FIBERGLASS REINFORCED  
EPOXY COMPOSITE BY FINITE ELEMENT METHOD

วัชรินทร์ มีเครือรอด

WATCHARIN MEEKRUEAROD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL.-2007-SC-M-014-065

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบฝาปิดท่อระบายน้ำจากคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว  
โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DESIGN OF MANHOLE COVER FROM FIBERGLASS REINFORCED  
EPOXY COMPOSITE BY FINITE ELEMENT METHOD

วัชรินทร์ มีเครือรอด

WATCHARIN MEEKRUEAROD

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 76729  
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.H. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-014-065

DESIGN OF MANHOLE COVER FROM FIBERGLASS REINFORCED  
EPOXY COMPOSITE BY FINITE ELEMENT METHOD

WATCHARIN MEEKRUEAROD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

KMITL-2007-SC-M-014-065

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบฝาปิดท่อระบายน้ำจากคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายวัชรินทร์ มีเครือรอด
รหัสประจำตัว	48067903
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. สันติพีร์ เอम्मณี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและผลิตฝาปิดท่อระบายน้ำที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดผืนเส้นสั้น (E-glass CSM #450) ที่มีค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรอยู่ที่ 0.40 และเส้นใยแก้วชนิดผืนทอ (E-glass WR#600) ที่มีค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรอยู่ที่ 0.53 โดยที่ฝาปิดท่อระบายน้ำมีส่วนของการใช้เส้นใยทั้งสองชนิดเป็น 20 ต่อ 80 โดยความหนา ในการจัดเรียงเส้นใยทั้งสองชนิดในชิ้นงานจะเป็นแบบสมมาตร ที่มีทิศทางการวางเส้นใยเท่ากับ 0 และ 90 องศา เทียบกับแนวแกนทางเรขาคณิตแกนหนึ่งบนผิวระนาบของฝาปิดท่อระบายน้ำ การออกแบบจะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งทำการจำลองแบบของชิ้นงาน ออกเป็น 5 แบบ คือ FEM#1 ถึง FEM#5 ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ระยะความหนา  $h$  ของฝาปิดท่อระบายน้ำ เท่ากับ 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถของฝาปิดท่อระบายน้ำในการรับแรงกดสูงสุดที่ 250 กิโลนิวตัน และระยะขูดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ตามมาตรฐาน BS EN 124 (1990) ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าทุกแบบจำลองสามารถรับแรงกดได้ แต่จะมีระยะขูดตัวกับน้ำหนักของชิ้นงานที่แตกต่างกัน และมีความเค้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามความหนาของชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีความหนามากจะมีระยะขูดตัวน้อย และมีความเค้นเกิดขึ้นระหว่างชั้นลามิเนตน้อย แต่มีน้ำหนักมาก ในการผลิตชิ้นงานต้นแบบจะเลือกใช้แบบจำลองที่ FEM#3 เพราะมีความเค้นเกิดขึ้นเท่ากับ 34.1 MPa คิดเป็น 2.93 เท่าของความแข็งแรงต่ำสุดของวัสดุเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ และมีน้ำหนักและระยะขูดตัวที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ โดยมีการจัดเรียงจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วชนิด CSM และ WR แต่ละชนิดดังนี้  $[CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_3/WR_{18}/CSM_3]$ , ผลของการขึ้นรูปฝาปิดท่อระบายน้ำต้นแบบ (Prototype) ที่ได้จะมีน้ำหนักเท่ากับ 101 กิโลกรัม ซึ่งเบากว่าฝาเหล็กถึงร้อยละ 44 และ

ฝาปิดท่อระบายน้ำสามารถรับแรงกดสูงสุดได้เท่ากับ 250 กิโลนิวตัน สามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C 250 ตามมาตรฐาน BS EN 124 (1990) และมีระยะยวบตัวสูงสุดที่โหลดกระทำ 250 กิโลนิวตัน เท่ากับ 13.49 มิลลิเมตร ที่โหลดกระทำ 166.67 กิโลนิวตันทำให้ชิ้นงานยวบตัว 3.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเทียบกับมาตรฐานที่มีค่าเท่ากับ 9.2 มิลลิเมตร ถือว่าฝาปิดท่อระบายน้ำดินแบบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

<b>Thesis</b>	Design of Manhole Cover from Fiberglass Reinforced Epoxy Composite by Finite Element Method
<b>Student</b>	Mr. Watcharin Meekruearod
<b>Student ID.</b>	48067903
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Somsak Woramongkolchai
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee

### ABSTRACT

This research focused on the design and invention of manhole cover made of composite materials reinforced by fiberglass type E-glass (CSM#450 and WR#600). The fraction of both fibers was 0.40 and 0.53 respectively by volume and the ratio of both fiberglasses was 20:80 by the thickness. The fiberglass was arranged in symmetric pattern of 0 and 90 degree followed the cylindrical coordinate on the surface of the manhole cover. This design used the Finite Element Method (FEM) to create 5 models consisted of FEM#1 to FEM#5. The difference among them was the "h thickness" those were 20, 30, 40, 50 and 60 mm. The results were analyzed and compared the maximum compressive load at 250 kN and maximum displacement followed by BS EN 124 (1990). The results showed that the entire models resisted the compressive test load, but the displacement and weight were different. In addition, the stress was different depending on the thickness of models. The thicker model had a small displacement and stress between laminate layers, but the weight was very heavy. The selected prototype was FEM#3, because the stress was 34.1 MPa and 2.93 times of the minimum strength of original material. Moreover, the weight and displacement was in an acceptable range. The arrangement of CSM and WR fiberglass layers was [CSM<sub>4</sub>/WR<sub>18</sub>/CSM<sub>4</sub>/WR<sub>18</sub>/CSM<sub>4</sub>/WR<sub>18</sub>/CSM<sub>3</sub>/WR<sub>18</sub>/CSM<sub>3</sub>]. This prototype weight was 101 kg which was 44% lighter than iron manhole cover, and it can support compressive test load as high as 250 kN. In conclusion, this prototype was divided into C-250 high quality rank in BS EN 124

(1990) and when it was tested at 250 and 166.67 kN, the displacements were 13.49 and 3.0 mm, respectively, and it was in an acceptable level when comparing with standard.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย และ ผศ.ดร.สนธิพัทธ์ เอมมณี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร และรศ.ดร.เก็จวดี พฤกษาทรร กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณตราทิพย์ ทิพย์สุวรรณ ที่เป็นเสมือนคู่มือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา ขอขอบคุณ คุณประสงค์ เพิ่มอารยวงศ์ และ บริษัท ไทย คอม โพลีท ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านงบประมาณ วัสดุ และเครื่องมือ ตลอดระยะเวลางานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องนักศึกษาฝึกงานที่บริษัท ไทย คอม โพลีท ที่ช่วยทำให้เกิดชิ้นงานทดสอบ และผลการทดสอบ

ขอขอบคุณ น้องๆ ที่คณะทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ตลอดจนให้คำแนะนำ นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายคนที่มีได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือ ให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สำหรับความงุนงงความสับสนใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วัชรินทร์ มีเครือรอด

# สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 นิยามคำศัพท์.....	3
2.2 ชนิดและคุณลักษณะของวัสดุคอม โปสิต.....	3
2.3 สมบัติเบื้องต้นของลามิना.....	17
2.4 สมบัติเชิงกลเบื้องต้นของลามิना.....	21
2.5 สมบัติเชิงกลเบื้องต้นของลามิเนท.....	27
2.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์.....	35
2.6.1 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	37
2.6.2 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	42
2.6.3 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
2.7 มาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	51
3.3.1 การศึกษามาตรฐานและข้อกำหนด ตามมาตรฐาน BS EN 124.....	51
3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	51
3.3.3 การสร้างโมเดลชิ้นงานและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
3.3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์.....	55
3.3.5 ขั้นตอนการทดสอบผลิตภัณฑ์ .....	59
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
4.1 รายละเอียดของฝาปิดที่ระบายน้ำตามมาตรฐาน BS EN 124.....	60
4.2 ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุตั้งต้น.....	60
4.3 ผลการสร้างโมเดลชิ้นงานและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	67
4.4 ผลการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	77
4.5 ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ .....	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	81
เอกสารอ้างอิง .....	82
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก (มาตรฐาน BS EN 124 , 1990).....	85
ภาคผนวก ข (การทวนสอบการใช้ได้ของโปรแกรม FEM I-DEAS 11 NX).....	89
ภาคผนวก ค (ขั้นตอนการใช้โปรแกรม I-DEAS 11 NX) .....	94
ประวัติผู้เขียน .....	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 ชนิดของวัสดุคอมโพสิต.....	4
3.1 สรุปชนิดของเส้นใยและสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร เมื่อมีการปรับเปลี่ยน น้ำหนักเส้นใยที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.2 การปรับเปลี่ยนความหนาชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล.....	55
4.1 ค่า Tensile properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ.....	62
4.2 ค่า Compressive properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ.....	63
4.3 ค่า Flexural properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ.....	64
4.4 ค่าสมบัติเชิงกลสำหรับป้อนในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	66
4.5 รูปแบบการจัดวางเส้นใยในแต่ละ โมเดล.....	69
4.6 น้ำหนักของชิ้นงานและระยะขยุบตัวสูงสุดของชิ้นงานที่ความหนา h ต่างๆ .....	71
4.7 แรงเค้นสูงสุดและความเครียดที่เกิดขึ้นใน โมเดล จากการวิเคราะห์ด้วย ไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	72
4.8 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้ .....	78
4.9 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างฟาส์นิคเหล็กและคอมโพสิต.....	79
4.10 ผลการทดสอบหาค่าระยะขยุบตัวที่โหลดกระทำ 166.67 กิโลนิวตัน.....	79

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต.....	3
2.2 กลไกการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวชนิดทั่วไป.....	6
2.3 โครงสร้างของไวนิลเอสเทอร์เรซิน.....	7
2.4 กลไกการสังเคราะห์ฟีนอลิก.....	7
2.5 การเปลี่ยนจากกรดพอลิเอมิกไปเป็น พอลิอิมิด จากปฏิกิริยา ควบแน่นที่อุณหภูมิสูง.....	8
2.6 กลไกการสังเคราะห์อีพอกซีเรซินจากบิสฟีนอลเอกับอิพิกโลโรไฮดริน.....	9
2.7 ขั้นตอนการผลิตเส้นใยแก้วคาร์บอน.....	12
2.8 ชนิดของเส้นใยแก้ว.....	16
2.9 ชั้นลามิनाเส้นใยทิศทางเดียว ในระบบ โคออร์ดิเนต.....	17
2.10 วัสดุคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาวต่อเนื่องในทิศทางเดียว มีแรงดึงกระทำ ในแนวตามยาว.....	18
2.11 โมเดลที่ใช้ในการศึกษาความเค้นที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิตในทิศทาง ตั้งฉากกับเส้นใย.....	19
2.12 เอลิเมนต์ของคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาวต่อเนื่องภายใต้แรงเค้นเฉือน.....	20
2.13 การหมุนของแกนสำคัญหรือแกนหลักของวัสดุจากแกน xy ใดๆในทางบวก.....	25
2.14 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลามิเนตในระนาบ xz.....	29
2.15 การเปลี่ยนแปลงของความเครียดและความเค้นตลอดความหนาของแผ่นลามิเนต.....	31
2.16 แรงในระนาบที่กระทำบนแผ่นลามิเนต.....	32
2.17 โมเมนต์ที่กระทำบนแผ่นลามิเนต.....	32
2.18 ลามิเนตที่ประกอบด้วยลามิना N ชั้น.....	33
2.19 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปเปรียบเทียบกับกระบวนการประยุกต์ใช้ FEM.....	36
2.20 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	37
2.21 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน.....	39
3.1 แม่แบบไฟเบอร์กลาสสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน.....	49
3.2 ชุดกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	49
3.3 เครื่องกดไฮดรอลิก.....	50
3.4 หัวกดชิ้นงานทดสอบ.....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.5 รูปร่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (Tensile test) แบบชนิดที่ 1.....	53
3.6 รูปร่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงกด (Compressive test).....	53
3.7 ภาพด้านข้างแสดงความหนาโมเดล.....	54
3.8 ดันแบบที่ขึ้นรูปด้วยยูรีเทนโฟม.....	56
3.9 ดันแบบที่เลยปิดด้วยเส้นใยแก้วและเรซิน.....	56
3.10 ดันแบบขัด ตกแต่ง พร้อมถ่ายทำแม่แบบไฟเบอร์กลาส .....	57
3.11 แม่แบบไฟเบอร์กลาส .....	57
3.12 แม่แบบไฟเบอร์กลาสที่ทาเจล โค้ท.....	58
3.13 การรีดไล่ฟองอากาศชิ้นงาน.....	59
3.14 การกดอัดชิ้นงาน โดยใช้แผ่นเหล็ก.....	59
3.15 การติดตั้งชิ้นงานในเครื่องกด .....	60
4.1 ภาพแสดงระยะผ่าเปิด (Clear opening) .....	60
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านแรงดึงกับค่าสัดส่วนเส้นใยโดย ปริมาตร .....	62
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านแรงกดกับค่าสัดส่วนเส้นใย โดยปริมาตร.....	63
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการติดงอกกับค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร.....	64
4.5 กราฟแสดงค่า strength ของเส้นใยแก้วชนิดผืนเส้นสั้นเบอร์ 450.....	65
4.6 กราฟแสดงค่า strength ของเส้นใยแก้วชนิดผืนทอเบอร์ 600.....	65
4.7 รูปแบบโมเดลชิ้นงาน .....	68
4.8 ระยะเวลาตัวที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	70
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อระยะเวลาขุดตัวและน้ำหนักที่ ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	71
4.10 กราฟแสดงค่า Normal stress สูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 11 , 22 และ 12 .....	72
4.11 กราฟแสดงค่า Normal stain สูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 11, 22 และ 12.....	73
4.12 กราฟแสดงค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 11 ของแต่ละ โมเดล .....	73
4.13 กราฟแสดงค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 22 ของแต่ละ โมเดล.....	74
4.14 กราฟแสดงค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 12 ของแต่ละ โมเดล.....	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.15 กราฟแสดงค่า Normal strain ที่เกิดขึ้นในแกน 11 ของแต่ละ โมเดล.....	75
4.16 กราฟแสดงค่า Normal strain ที่เกิดขึ้นในแกน 22 ของแต่ละ โมเดล.....	75
4.17 กราฟแสดงค่า Normal strain ที่เกิดขึ้นในแกน 12 ของแต่ละ โมเดล.....	76
4.18 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป.....	78
4.19 ภาพเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบการรับแรงกดสูงสุด.....	80
ข-1 ชิ้นงานคอมโพสิตที่มีแรงดึงกระทำ.....	89
ข-2 ภาพชิ้นงาน การแบ่งเอลิเมนต์ และการกำหนด Boundary Condition.....	92
ข-3 ภาพวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	92
ค-1 ขั้นตอนการกำหนดชั้นลามิเนต.....	96
ค-2 ขั้นตอนการกำหนด Boundary Condition .....	98
ค-3 การกำหนดชนิดและขนาดของเอลิเมนต์.....	100
ค-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม I-DEAS 11 NX.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฝาปิดท่อระบายน้ำที่ใช้ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดหลายรูปแบบ ทั้งชนิดที่เป็นแผ่นกลม แผ่นสี่เหลี่ยมหรือแบบที่เป็นฝาทึบ และแบบที่เป็นตะแกรง ฝาปิดท่อระบายน้ำโดยปกติจะทำจากวัสดุประเภทเหล็กกล้าหรือปูนซีเมนต์เสริมเหล็กเส้นเพราะเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงกดอัดได้ดีมาก

ฝาท่อระบายน้ำแต่ละชนิดที่พบเห็นจะมีปัญหาแตกต่างกัน กล่าวคือฝาเหล็กจะมีน้ำหนักมากซึ่งทำให้การเคลื่อนย้ายลำบากและเกิดการสูญหายบ่อยเนื่องจากการลักขโมย ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือฝาเหล็กไม่ทนต่อการผุกร่อนและเป็นสนิมได้ง่ายเมื่อสัมผัสความชื้นในอากาศหรือน้ำโดยตรง ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ในสถานที่ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีหรือความชื้นอาจทำให้เกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานที่ต่ำ นอกจากนั้นในปัจจุบันยังพบว่าราคาเหล็กในตลาดโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี เป็นผลให้ฝาปิดท่อระบายน้ำแบบเหล็กมีราคาสูงขึ้น ส่วนฝาประเภทปูนซีเมนต์เสริมเหล็กเส้นจะมีรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่หนาและมีน้ำหนักมากประกอบกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความเปราะแตกหักได้ง่าย ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทบหรือตกกระทบอย่างรุนแรงอาจทำให้เกิดการแตกหักเสียหายได้ และเมื่อปูนซีเมนต์กระเทาะหลุดออกหมดแล้วจะเหลือโครงของเหล็กเส้น ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้สัญจรในบริเวณนั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาออกแบบและขึ้นรูปฝาปิดท่อระบายน้ำชนิดใหม่ให้เป็นไปตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดการใช้งานของฝาปิดท่อระบายน้ำ โดยเลือกใช้วัสดุ คอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติง (อีพอกซี) และใช้เส้นใยแก้วเป็นตัวเสริมแรงเพื่อนำมาผลิตฝาปิดท่อระบายน้ำที่สามารถนำไปใช้งานทดแทนฝาประเภทเดิม เพราะวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีความแข็งตึงและความแข็งแรงสูงมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่น สามารถที่จะออกแบบให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ มีน้ำหนักเบา วัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่าย และมีราคาไม่แพงนอกจากนี้ฝาปิดท่อระบายน้ำคอมโพสิตยังมีความสามารถในการทนต่อสารเคมีประเภทต่างๆ เช่น ปิโตรเคมีหรือความชื้น ได้อย่างดีและยังสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้เหล็กและปูนซีเมนต์เสริมเหล็กเส้นเป็นวัสดุได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบฝาปิดที่ระบายน้ำที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝา 1,000 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 124 Class C-250 โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อผลิตต้นแบบฝาปิดที่ระบายน้ำที่มีน้ำหนักต่ำกว่า 20 % ของน้ำหนักเดิม(ฝาเหล็ก) และมีสมรรถภาพในการรับแรงกดได้ไม่ต่ำกว่า 250 กิโลนิวตัน

## 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบฝาปิดที่ระบายน้ำและมาตรฐานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและทดสอบสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย
3. ออกแบบฝาปิดที่ระบายน้ำ และวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (I-DEAS 11 NX)
4. สร้างชิ้นงานต้นแบบ ตามแบบที่ได้
5. ทดสอบสมบัติของชิ้นงานตาม มาตรฐาน BS EN 124
6. เปรียบเทียบผลที่ได้และปรับปรุงให้เป็นไปตามมาตรฐาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำฝาปิดที่ระบายน้ำที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ทดแทนของเดิมที่เป็นชนิดฝาเหล็ก และ ฝาปูนซีเมนต์เสริมเหล็กเส้น
2. ฝาปิดที่ระบายน้ำที่ได้มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ง่าย สะดวกแก่ผู้ทำงาน
3. ลดการสูญหาย อันเนื่องจากการลักขโมย เพราะวัสดุประเภทคอมโพสิตในประเทศไทยยังไม่มีการซื้อขายแบบของเก่าหรือสินค้ามือสอง
4. ลดการนำเข้าฝาปิดที่ระบายน้ำจากต่างประเทศ
5. เป็นต้นแบบแนวคิดที่นำไปสู่การพัฒนาให้ฝาปิดที่ระบายน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 นิยามคำศัพท์ [1]

วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) คือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุต่างชนิดกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติใหม่ตรงตามความต้องการหรือตรงวัตถุประสงค์การใช้งาน

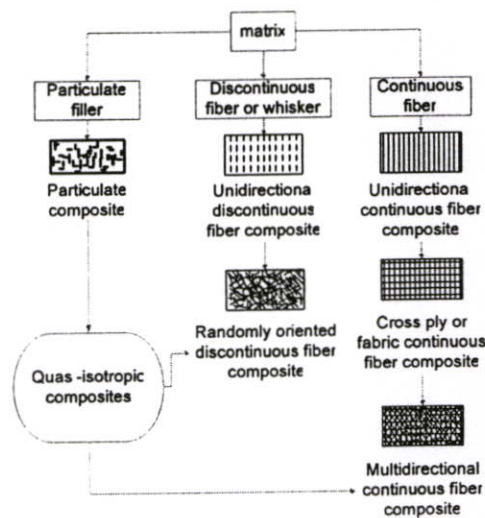
วัสดุประเภทออร์ทोटโรปิก (Orthotropic materials) คือ วัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันทั้งสามแกนและมีระนาบสมมาตรของสมบัติของวัสดุ 3 ระนาบตั้งฉากกัน ดังนั้นสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางต่างๆ ในเนื้อของวัสดุ

ลามิना (Lamina) คือ ชั้นบางๆ ของเส้นใยที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบหรือแบบสุ่ม ในเนื้อของเมทริกซ์

ลามิเนต (Laminate) คือ ลามิनाที่ประสานซ้อนกันหลายๆชั้น โดยในแต่ละชั้นจะมีแนวหรือทิศทางของเส้นใยต่างๆกัน

### 2.2 ชนิดและลักษณะของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะตามชนิด ลักษณะทางกายภาพ และการจัดเรียงตัวของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต [2]

ตารางที่ 2.1 ชนิดของวัสดุคอมโพสิต [2]

ชนิดคอมโพสิต	เส้นใย	เมทริกซ์
พอลิเมอร์	แก้ว คาร์บอน อะรามิก โบรอน	อีพอกซี ฟีนอลิก โพลีไอเมติก บิสเมลามีน โพลีเอสเตอร์ เทอร์โมพลาสติก
โลหะ	โบรอน คาร์บอน ซิลิกอน คาร์ไบด์ อะลูมิน่า	อะลูมินัม แมกนีเซียม ไทเทเนียม ทองแดง
เซรามิก	ซิลิกอน คาร์ไบด์ อะลูมิน่า ซิลิกอน ไนไตรด์	ซิลิกอน คาร์ไบด์ อะลูมิน่า แก้ว-เซรามิก ซิลิกอน ไนไตรด์
คาร์บอน	คาร์บอน	คาร์บอน

### 2.2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต [3]

พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer) จัดเป็นวัสดุวิศวกรรมประเภทหนึ่ง เพราะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและยังมีสมบัติเด่นจากพอลิเมอร์ เช่น มีน้ำหนักเบา ด้านทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีดีเยี่ยม และยังมีความเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดี ความแข็งแรงของวัสดุเป็นผลจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยคาร์บอน และ เส้นใยโบรอน เป็นต้น พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยหรือพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) จะมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุดั้งเดิม เช่น เหล็ก หรือโลหะประเภทอื่นๆ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่นหรือความด่างจำเพาะ ซึ่งเรียกว่า ความแข็งแรงจำเพาะ และนอกจากนั้นยังมีค่ามอดุลัสจำเพาะสูงอีกด้วย [4] ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตจึงเป็นวัสดุที่เบาแต่มีสมบัติเชิงกลที่ดี การขึ้นรูปทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับการใช้งาน

วัสดุคอมโพสิตในยุคปัจจุบันที่มีการใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติเชิงกลที่สูงและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น การพัฒนาเส้นใยในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความแข็งแรง ลักษณะ โครงสร้าง ความสามารถในการยึดเกาะกับเมทริกซ์ ความ

หลากหลายของเส้นใยเป็นผลให้นำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและเหมาะสมกับความต้องการมากขึ้น แต่ทำให้ราคาของวัสดุสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการผลิตหรือขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต นอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการแล้วจะต้องพิจารณาถึงต้นทุนและอาศัยขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์เข้ามาช่วย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเลือกใช้วัสดุที่ดีและคุ้มค่าที่สุด

### 2.2.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิต ประกอบด้วยองค์ประกอบใหญ่ๆ สองส่วนคือ

1. ส่วนเมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ในการยึดให้ส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันและจัดเรียงตัวในแนวที่กำหนดพร้อมทั้งทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของส่วนเสริมแรง เนื่องจากการเสียดสีจากสภาพแวดล้อม ความชื้น อีกทั้งยังช่วยในการส่งถ่ายแรงไปยังส่วนเสริมแรงในชิ้นงาน
2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) จัดเป็นส่วนที่เป็นโครงสร้างสำคัญของวัสดุคอมโพสิต เพราะจะทำหน้าที่ในการให้ความแข็งแรงแก่วัสดุ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนที่รับแรงหลักของวัสดุ

#### 2.2.1.1.1 เมทริกซ์ (Matrix) [2]

พอลิเมอร์เมทริกซ์ ที่นิยมใช้ในงานคอมโพสิตได้แก่เทอร์โมเซตติง เพราะเป็นสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความหนืดต่ำ สามารถผสมและแทรกตัวเข้ากับส่วนเสริมแรงได้ดี ซึ่งในขั้นตอนการทำให้สุกหรือเซตตัวจะมีการใช้สารเชื่อมโยงช่วยทำให้เกิดการเชื่อมโยงของพันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ จนในที่สุดได้โครงสร้างแบบร่างแหสามมิติ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิ และสารเคมีได้ดี เมทริกซ์ในตระกูลเทอร์โมเซตติงมีหลายชนิด ดังนี้

##### (1) พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin)

เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่นของแอนไฮดรายด์ชนิดไม่อิ่มตัว เช่น มาเลอิก แอนไฮดรายด์ กับไกลคอล เช่น เอธิลีนไกลคอล ได้เป็นพอลิเอธิลีน มาลิกแอต ซึ่งในเบื้องต้นถือเป็น พอลิเมอร์ปฐมภูมิเพราะเป็นพอลิเมอร์โมเลกุลแบบเส้นที่มีความยาวไม่มากและยังไม่สามารถรับแรงได้ จึงมีการเติมสารจำพวกไวโนลอะซิเตด หรือ สไตรีน มอนอเมอร์ เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ

พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นเรซินที่นิยมใช้ในงานคอมโพสิตอย่างมาก เพราะมีราคาถูกหาได้ง่ายมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่จะมีข้อเสียคือมีการหดตัวมาก ระหว่างขั้นตอนการเชื่อมโยงของโครงสร้างและไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีเท่ากับอีพอกซีเรซิน แต่สามารถปรับให้ทนทานต่อแสงยูวีได้ เพราะในการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดดซึ่งมีแสงยูวีเป็นเวลานานๆจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีเหลืองเข้มมากขึ้นหรือความแข็งแรงลดลงไปบ้าง และยังทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้โดยผิวหนังเริ่มสีกกร่อน ดังนั้นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการ

เปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่นำมาผสม เป็น มอนอเมอร์จำพวกเมธาอะคริเลต เพราะจะทำให้มีความคงทนต่อแสง ยูวีดีกว่า อีกทั้งยังได้คอมโพสิตที่มีความใสของเนื้อวัสดุ

(1.1) ออร์โธเรซิน (Ortho resin)

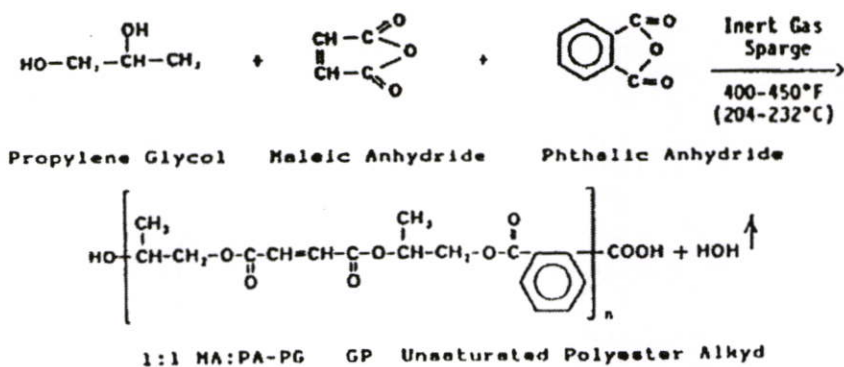
เตรียมได้จากพทาสิกแอนไฮดรายด์ กับ มาเลอิกแอนไฮดรายด์ หรือ กรดฟูมาริกได้เป็นออร์โธพทาสิก ซึ่งถือว่าเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดแรกที่ยังคงมีความนิยมใช้งานในปัจจุบัน เพราะมีราคาถูก หาได้ง่าย มีหลายชนิดให้เลือกใช้ ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและความต้องการของผู้ใช้ แต่ออร์โธเรซินมีข้อจำกัดทางด้านความเสถียรภาพต่อความร้อน สารเคมี และมีการหดตัวสูงมาก มีลักษณะโครงสร้างดังรูป 2.2

(1.2) ไอโซเรซิน (Iso resin)

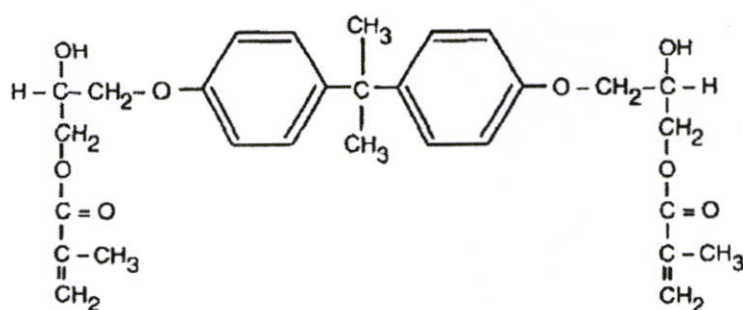
เตรียมได้จากกรดไอโซพทาสิกกับมาเลอิกแอนไฮดรายด์หรือกรดฟูมาริก ได้เป็นไอโซพทาสิก ถือว่าเป็นเรซินที่ดีกว่าออร์โธเรซินในด้านความทนต่อความร้อน สารเคมี และ สมบัติเชิงกล เพราะมีโครงสร้างเป็นแบบเชิงเส้นและมีน้ำหนักโมเลกุลมาก

(1.3) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl ester) [5]

เตรียมได้จากกรดไม่อิ่มตัว เช่น กรดเมธาอะคริลิก หรือ กรดอะคริลิก กับบิสฟีนอลไดอ็อกไซด์ เกิดเป็นสายโซ่ไวนิลเอสเทอร์ที่มีพันธะคู่ที่หมู่ปลาย ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยงได้ สารเชื่อม โยงที่นิยมใช้ได้แก่สไตรีนมอนอเมอร์หรือไวนิลมอนอเมอร์ที่วงไวต่อปฏิกิริยา รูปลักษณะภายนอก สมบัติต่างๆ และการทำให้สุกจะทำได้เช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์ทั่วไป ดังนั้นไวนิลเอสเทอร์จึงสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์ประเภทอื่นๆ ไวนิลเอสเทอร์มีราคาที่แพง แต่ให้สมบัติทนต่อสารเคมี ความร้อน และสมบัติเชิงกลที่ดี มีลักษณะโครงสร้าง ดังรูป 2.3



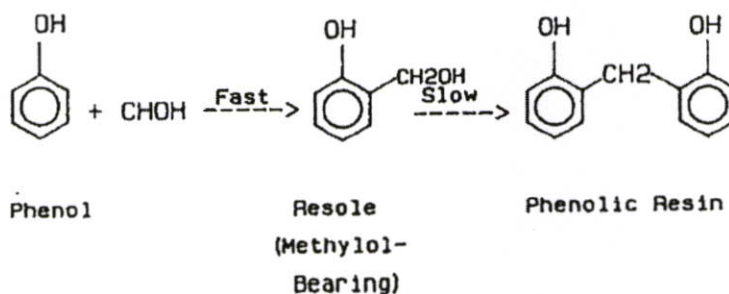
รูปที่ 2.2 กลไกการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวชนิดทั่วไป [6]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไวนิลเอสเทอร์เรซิน [7]

## (2) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

ฟีนอลิกเรซิน จัดเป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดแรก เตรียมได้จากฟีนอล กับฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบควบแน่น ฟีนอลิกเรซิน มีราคาถูก มีเสถียรภาพต่อความร้อนสูง และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี แต่มีสีดำ สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงนิยมใช้ฟีนอลิกเรซินในด้านความปลอดภัย อุปกรณ์ที่ต้องทนความร้อนสูง ทนการขีดไฟ ปฏิกิริยาการเตรียมฟีนอลิกเรซิน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน [6]

## (3) อะมิโนเรซิน (Amino resin)

กลุ่มอะมิโนเรซินประกอบด้วยยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซินและเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เตรียมได้จากปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์กับกลุ่มเอมีนของยูเรีย (มีสองกลุ่มเอมีนหรือสี่ไฮโดรเจนที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยา) หรือ เมลามีน (เป็นวงมีสามกลุ่มเอมีน) ดังสมการ



ปฏิกิริยาในลำดับต่อไปจะเป็นการควบแน่นของกลุ่ม  $-\text{CH}_2\text{OH}$  กับกลุ่มเอมีน ซึ่งจะได้น้ำและผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมต่อกันด้วยกลุ่มเมทิลีน (methylene bridge) ดังสมการ

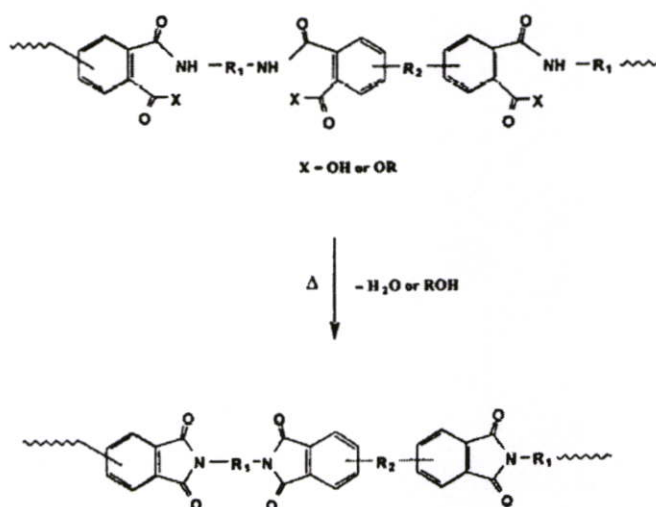


ไฮโดรเจนในกลุ่มเอมีนของยูเรียหรือเมลามีน (6 ไฮโดรเจน) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเชื่อม โยงเข้ากับฟอร์มาลดีไฮด์เกิดเป็นโครงข่ายสามมิติ จึงมีความแข็งแรง มีสมบัติเป็นฉนวน ทนต่อการกัดกร่อน

#### (4) พอลิอิมิด (Polyimides)

พอลิอิมิดเป็นสารพวกอะโรมาติก (aromatic) ที่ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นจึงเป็นผลให้พอลิอิมิดมีความสามารถในการทนความร้อนได้สูงและไม่หลอมละลาย แต่ก็มีผลเสียคือทำให้ขึ้นรูปได้ยากเพราะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมหรือหาตัวทำละลายได้ยาก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมเตรียมให้อยู่ในรูปของกรดพอลิเอมิก (polyamic acid) แล้วให้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำและเกิดปฏิกิริยาปิดวงเอมิด เพราะกรดพอลิเอมิกสามารถละลายน้ำได้ดี กลไกการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.5 พอลิอิมิดสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามความสามารถในการทนความร้อนประเภทที่หนึ่งจะทนความร้อนได้ไม่ต่ำกว่า  $232^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ บิสมาเลอิมิด (bismaleimides, BMI) รวมทั้ง พอลิอิมิดที่ได้จากการควบแน่นบางตัว เช่น อะวิมิด เค 3 (Avimid K-III) และประเภทที่สองจะทนความร้อนได้สูงถึง  $316^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ ทีเอ็มอาร์-15 (PMR-15) แอลเออาร์ซี ทีพีไอ (LARC TPI) อะวิมิด เอ็น (Avimid N) เป็นต้น

พอลิอิมิดจะมีความคงทนต่อความร้อนสูงไม่เปลี่ยนแปลงขนาด จึงนิยมนำไปใช้มากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านวัสดุคอมโพสิตจะใช้ในการทำตัวสำหรับเครื่องอัดความดันในระบบหล่อเย็นก๊าซของเครื่องปฏิกรณ์หรือชิ้นส่วนเครื่องบิน

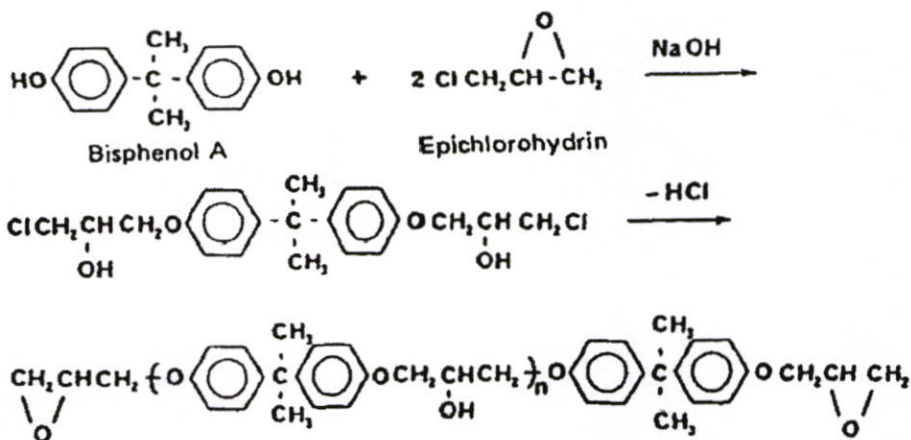


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนจากกรดพอลิเอมิกไปเป็นพอลิอิมิดโดยปฏิกิริยาควบแน่นที่อุณหภูมิสูง [6]

## (5) อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin)

อีพอกซีเรซินสำหรับงานคอมโพสิตมีให้เลือกมากมายหลายชนิดและมีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการเข้ากันได้กับเส้นใยได้ทุกชนิด สามารถนำไปขึ้นรูปได้หลายกระบวนการ เช่น ขึ้นรูปด้วยมือ(hand-lay up) การพันรอบแกน (Filament) เป็นต้น ดังนั้นจึงทำให้อีพอกซีเรซินได้รับความนิยมในการเลือกใช้มากที่สุด ทั้งนี้โครงสร้างทางเคมีของอีพอกซี ชนิดของสารทำให้สุก (Curing agent) ชนิดของสารดัดแปลงโครงสร้าง (Modifying reactants) ที่มีมากมายหลายชนิดจะเป็นตัวกำหนดสมบัติความเหนียว ความทนทานต่อสารเคมี ตัวทำละลายและสมบัติทางกล (ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง การต้านทานต่อการไหลคืบ (Creep) และความล้า เป็นต้น) นอกจากนี้อีพอกซียังเด่นในด้านการยึดเกาะกับเส้นใยได้อย่างดี มีความทนต่อความร้อนและสมบัติทางไฟฟ้าอย่างดียเยี่ยม ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ร่วม (by product) และมีการหดตัวที่ต่ำ ข้อเสียที่สำคัญของอีพอกซี คือ การดูดความชื้นสูงและเปราะแตกหักได้ง่าย

ขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการสังเคราะห์อีพอกซีเรซินจากบิสฟีนอลเอกับอีพิคลอโรไฮดริน [6]

อีพอกซีเรซินมีมากมายหลายชนิดซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะกับงานได้ อีพอกซีที่ประกอบด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนอะโรมาติกจะมีความแข็งแรงสูง มีเสถียรภาพทางความร้อนดี และมีค่า  $T_g$  สูง การเกิดโครงสร้างแบบร่างแหในอีพอกซีเรซินจะต้องใช้สารเชื่อมโยงเข้ามาช่วยซึ่งจะส่งผลให้สมบัติของอีพอกซีที่ได้มีความแตกต่างกัน สรุปได้ดังนี้

1. สารเชื่อมโยงประเภทแอนไฮไดรด์ (anhydrides) จะทำให้อีพอกซีที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนและสภาพภูมิอากาศได้ดี

2. สารเชื่อมโยงประเภทอะโรมาติกเอมีน (aromatic amines) ทำให้ได้อีพอกซีที่ทนอุณหภูมิสูง แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเชื่อมโยงด้วยเช่นกัน
3. สารเชื่อมโยงประเภทเอมีนโซ่ตรง (aliphatic amines) จะช่วยทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็ว และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง

#### 2.2.1.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) [3]

ในการเสริมแรงของวัสดุคอมโพสิตนั้น องค์ประกอบที่สำคัญมากที่สุดคือเส้นใย เพราะเส้นใยจะเป็นส่วนที่รับแรงและทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง เส้นใยที่ใช้ในงานคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งประเภทของเส้นใยได้ดังนี้

1. เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)
2. เส้นใยแร่ (Mineral Fibers)
3. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibers)
  - เส้นใยสังเคราะห์อินทรีย์ (Synthetic Organic Fibers)
    - เส้นใยอะรามิด (Aramid Fibers)
    - เส้นใยเพท (PET Fibers)
    - เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene Fibers)
  - เส้นใยสังเคราะห์อนินทรีย์ (Synthetic Inorganic Fibers)
    - เส้นใยแก้ว (Glass Fibers)
    - เส้นใยคาร์บอนและกราไฟต์ (Carbon and Graphite Fibers)
    - เส้นใยอะลูมินา (Alumina Fibers)
    - เส้นใยโบรอน (Boron Fibers)
    - เส้นใยซิลิกอน (Silicon Fibers)

ถึงแม้ว่าเส้นใยจะแบ่งออกเป็นหลายชนิดหลายประเภท แต่มีส่วนที่เหมือนกันนั่นคือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่

1. สมบัติเชิงกลของเส้นใย
2. ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์
3. ปริมาณของเส้นใย
4. การจัดเรียงตัวของเส้นใย

ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อวัสดุคอมโพสิต มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติเฉพาะตัวของเส้นใยที่นำมาประกอบขึ้นเป็นชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้จะใช้เส้นใยประเภทเส้นใยแก้ว (Glass Fibers)

### (1) เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติที่รู้จักกันดี ได้แก่ ฝ้าย ปอ กก ไหม หรือ ป่าน เป็นต้น การนำเอาเส้นธรรมชาติมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตนั้นมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ต้นทุนต่ำ ชีงงานมีน้ำหนักเบา นอกจากนั้นเส้นใยธรรมชาติจัดเป็นเส้นใยที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ (Renewable Resource) ผลึกภัณฑ์ที่ได้สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ แต่ข้อเสียหลักของเส้นใยธรรมชาติคือจะมีค่า Aspect Ratio ต่ำไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานเสริมแรงทั้งในด้านความแข็งแรงและความเหนียว นอกจากนี้เรื่องของสมบัติเชิงกลแล้วยังมีข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ เรื่องอุณหภูมิ เพราะเส้นใยธรรมชาติทนความร้อนได้ต่ำและจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ  $170 - 200^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ความแข็งแรงของเส้นใยจะเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ  $124^{\circ}\text{C}$  นอกจากนั้นยังมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือเชื้อจุลินทรีย์ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ความชื้นเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง

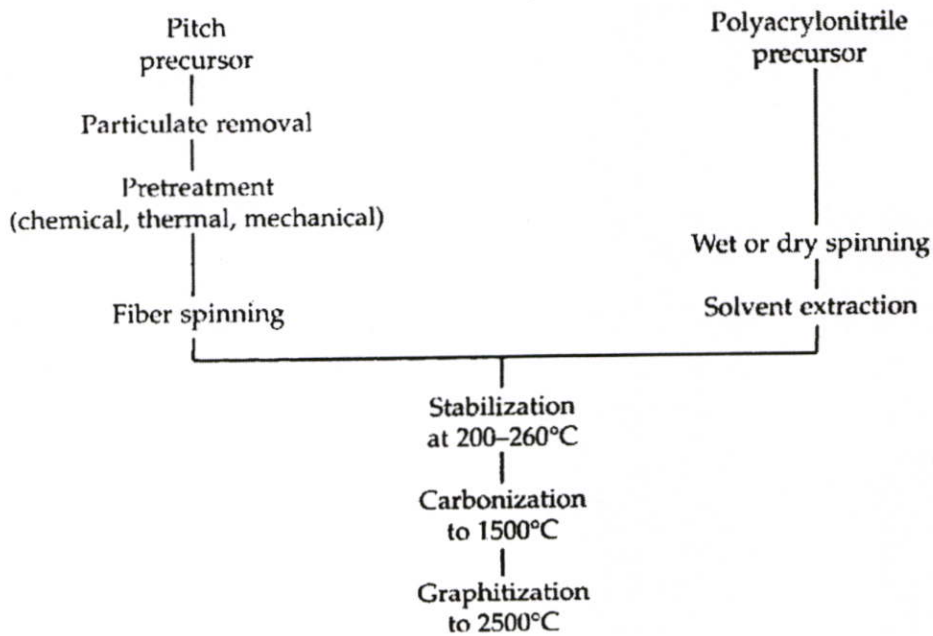
### (2) เส้นใยอะรามิดหรือเส้นใยอะโรมาติกพอลิเอไมด์ (Aramid or Aromatic polyamide fiber)

เส้นใยอะรามิดหรือในเชิงการค้าที่รู้จักคือ “เคฟลาร์” ซึ่งจะมียอดประกอบของ Poly(Para-Phenylene terephthalamide) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่าง Para-Phenylene Diamine กับ Terephthaloyl Chloride จากโครงสร้างของเส้นใยจะพบว่ามียวงแหวนเบนซีนเป็นโครงสร้างหลัก จึงทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพต่อความร้อนสูง ในขณะที่โครงสร้างแบบพารานั้นจะทำให้โมเลกุลมีความแข็งแรงและทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและมีค่ามอดูลัสสูง เส้นใยเคฟลาร์เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการฉีกขาด มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สลายตัวที่อุณหภูมิ  $425^{\circ}\text{C}$  ด้านทานการติดไฟ มี  $T_g$  ประมาณ  $360 - 375^{\circ}\text{C}$  มีเสถียรภาพทางขนาดที่ดี ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในทิศทางตามขวางนานไปกับเส้นใยเป็นลบเล็กน้อย (ประมาณ  $-2 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) และในทิศทางตรงข้ามหรือตั้งฉากกับเส้นใยเป็นบวก ( $60 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) มีการนำความร้อนและไฟฟ้าที่ต่ำจัดเป็นฉนวนไฟฟ้า โดยสรุปเส้นใยอะรามิดนั้นมีจุดเด่นที่มีความเหนียวสูงเมื่อเทียบกับเส้นใยประเภทอื่นๆ มีความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกได้สูง น้ำหนักเบา ด้านทานการล้าดีเยี่ยม มีราคาปานกลาง อย่างไรก็ตามการใช้งานยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเส้นใยมีความสามารถในการรับแรงกดได้ต่ำ ด้านทานแสงยูวีไม่ดี ดูดซึมน้ำ ความชื้น และการยึดเกาะกับเมทริกซ์ไม่ดี

### (3) เส้นใยคาร์บอนและกราไฟต์ (Carbon and graphite fiber)

เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่นิยมใช้กันอย่างมากในงานที่ต้องการสมบัติสูงๆ (high-performance materials) เพราะเส้นใยมีความแข็งแรงและมีค่ามอดูลัสที่สูง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวโครงสร้างผลึกของอะตอมคาร์บอนในเส้นใย การจัดเรียงตัวของผลึกมีสองลักษณะคือ กราไฟต์ เป็นผลึกคาร์บอนสีดำ และ เพชร เป็นผลึกคาร์บอนสีใส ทั้งสองโครงสร้างต่างมีพันธะ

โควาเลนต์ที่แข็งแรงเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมคาร์บอนแต่จะมีการจัดเรียงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กราไฟต์เป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดของคาร์บอนซึ่งจะมีโครงสร้างแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal) ซึ่งประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมที่เรียกว่าเบซอลเพลน (Basal plane) โดยที่อะตอมคาร์บอนจะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง มีพลังงานพันธะประมาณ 525 กิโลจูลต่อโมล และมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดระหว่างชั้นด้วยพลังงานที่ไม่แข็งแรงน้อยกว่า 10 กิโลจูลต่อโมล ความแตกต่างของพันธะในชั้นเดียวกัน (Intra-layer bonding) และพันธะระหว่างชั้น (interlayer bonding) นี้เองจัดให้กราฟไฟต์ เป็นวัสดุที่มีสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) เนื่องจากความแข็งแรงระหว่างเพลนที่ค่อนข้างต่ำเป็นผลให้ค่ามอดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus) ต่ำซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างของเพชรซึ่งมีการจัดเรียงโครงสร้างของอะตอมในลักษณะของคิวบิก (Cubic) ทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องของมอดูลัสแรงเฉือน ขั้นตอนการผลิตเส้นใยคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตเส้นใยคาร์บอน [7]

เส้นใยคาร์บอนและกราฟไฟต์เป็นเส้นใยที่มีความแข็งตึงจำเพาะ(Specific stiffness)สูงที่สุดในกลุ่มเส้นใยทั้งหมด มีความแข็งแรงสูงทั้งในแนวการดึง (Tension) หรือกด (Compression) ด้านทานการกัดกร่อน (Corrosion) การล้า (Fatigue) การคืบ (Creep) ได้ดี โดยทั่วไปเส้นใยที่ผลิตจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 – 7 ไมครอนและมีสมบัติเด่นในด้านอื่นๆ เช่น ด้านทานสารเคมีดีเยี่ยม การขยายตัวทางความร้อนต่ำมากหรือเท่ากับศูนย์ มีสมบัติทางด้านการเสียดทาน(Friction

properties) ที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง และนำความร้อนได้ดีเยี่ยม แต่อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของเส้นใยประเภทนี้คือจะมีความเปราะ ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ หรือมีความเหนียวที่ต่ำ ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศได้ที่อุณหภูมิประมาณ 700 K

#### (4) เส้นใยอะลูมินา (Alumina fiber)

เส้นใยอะลูมินามีโครงสร้างเป็นแบบ Poly Crystalline ที่มีผลึกแบบแอลฟา ( $\alpha$ -form) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะลูมินามากกว่าร้อยละ 95 โครงสร้างผลึกของเส้นใยชนิดนี้จะมีขนาดของเกรน (grain size) ประมาณ 0.5 ไมครอน จากที่โครงสร้างเป็นผลึกนี้เองทำให้เส้นใยชนิดนี้จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า 2000 °C และมีความหนืดต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะหลอมเหลว ดังนั้นจึงไม่สามารถผลิตแบบเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนได้ จึงต้องใช้วิธีการผลิตเฉพาะซึ่งสามารถผลิตได้สองวิธีคือ กระบวนการแขวนลอยในน้ำ และกระบวนการสารละลายหรือโซล-เจล

สมบัติที่เด่นของเส้นใยอะลูมินาคือ สามารถรักษาสมบัติเชิงกลไว้ได้เกือบ 100% ที่อุณหภูมิสูงๆ ไม่ว่าจะเป็นความแข็งแรง หรือมอดูลัส ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 100 °C ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยชนิดนี้จะมีราคาสูง เป็นผลให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### (5) เส้นใยโบรอน (Boron fiber)

เส้นใยโบรอนจัดเป็นเส้นใยที่มีสมรรถภาพสูงที่ผลิตขึ้นทางการค้าเป็นชนิดแรก ในปัจจุบันเส้นใยชนิดนี้นิยมใช้เสริมแรงอีพอกซีในงานด้านยานอวกาศและอุปกรณ์กีฬา การใช้งานของเส้นใยประเภทนี้ถูกจำกัดด้วยราคา เพราะเป็นเส้นใยที่มีราคาแพง เส้นใยโบรอนจะมีความแข็งแรงและแข็งดีเยี่ยม เนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ทำให้เส้นใยมีความสามารถในการทนต่อแรงกดได้ดี จากความเด่นในด้านของสมบัติเชิงกลไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงกด แรงดัด รวมทั้งความสามารถในการทนอุณหภูมิได้สูง จึงนิยมนำเส้นใยประเภทนี้ไปใช้ในการทหารเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยชนิดนี้ยังมีข้อเสียคือ ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ เนื่องจากเส้นใยจะมีแกนกลางเป็นลวดทังสเตน ทำให้เส้นใยมีความหนาแน่นสูง มีสมบัติจำเพาะปานกลาง นอกจากนี้ความใหญ่ของเส้นใยทำให้ยากต่อการนำไปขึ้นรูป

#### (6) เส้นใยซิลิกอน (Silicon fiber)

เส้นใยที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบโดยทั่วไป คือ เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งเป็นเส้นใยประเภทเซรามิกส์ นิยมนำมาเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ที่เป็นโลหะอัลลอยด์ประเภทไทเทเนียมและอะลูมิเนียม รวมทั้งเมทริกซ์ที่เป็นเซรามิกส์เองอีกด้วย เส้นใยชนิดนี้มีสมบัติและกระบวนการผลิตคล้ายกับเส้นใยโบรอน สามารถทนต่อแรงกดได้ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากพันธะในโครงสร้างเป็นแบบโควาเลนต์จึงทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง

เช่นเดียวกับเส้นใยที่มีสมรรถภาพสูงประเภทอื่นๆ เส้นใยซิลิกอนถูกนำไปใช้งานทางด้านเครื่องบิน การก่อสร้างสะพาน และอุปกรณ์กีฬา อย่างไรก็ตามเส้นใยประเภทนี้ยังไม่นิยมใช้มากนักเพราะมีราคาแพง

#### (7) เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

เส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่มีราคาถูกและนิยมใช้กันอย่างมากเมื่อเทียบกับบรรดาเส้นใยประเภทต่างๆ นอกจากนั้นยังมีสมบัติเด่น คือ ความแข็งแรงดึงและความทนแรงกระแทกสูง และความต้านทานต่อสารเคมีสูง แต่มีข้อเสียคือค่ามอดุลัสต่ำ ไม่ทนต่อการถูกเสียดสี มีความสามารถในการยึดเกาะกับเมทริกซ์ต่ำ

เส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติผสมระหว่างแก้วและเส้นใย กล่าวคือ มีความใส แข็ง ด้านทานสารเคมี มีความเฉื่อยเหมือนแก้ว และมีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่น น้ำหนักเบา เส้นใยแก้วมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่ายของซิลิกา (Silica network) สามารถเตรียมได้จากการหลอม ซิลิกา และออกไซด์ต่างๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) เหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นต้น ผ่านรูเล็กๆ (Orifice) แล้วดึงยืดออกเป็นเส้นใยโดยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการเกิดผลึก ดังนั้นโครงสร้างจึงไม่เป็นระเบียบแต่จะมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic properties) เส้นใยที่เตรียมได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 – 20 ไมครอน และมีความยาววิกฤต (Critical length) ประมาณ 50-100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งถือว่าเป็นความยาวที่เหมาะสมต่อการนำเส้นใยไปใช้งาน

เส้นใยแก้วสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณขององค์ประกอบที่อยู่ภายใน ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลแตกต่างกันไป เส้นใยที่นิยมใช้มีดังนี้ [4]

1. เส้นใยแก้วชนิด E (E-glass ; Electrical grade) นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีความแข็งแรงสูง มีสมบัติทางไฟฟ้าดี ราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่าย
2. เส้นใยแก้วชนิด ECR (ECR-glass ; Electrical-chemical grade) มีความแข็งแรงมากกว่า E-glass ทนทานต่อสารเคมี มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี แต่ราคาสูง
3. เส้นใยแก้วชนิด C (C-glass ; Chemical grade) เป็นเส้นใยที่มีความทนต่อสารเคมีดีเยี่ยม แต่มีความแข็งแรงต่ำ นิยมใช้เป็นผิวหน้าที่สัมผัสสารเคมีโดยตรง
4. เส้นใยแก้วชนิด S (S-glass ; Strength grade) เป็นเส้นใยที่มีค่ามอดุลัสสูงและทนต่ออุณหภูมิการใช้งานสูง มีความแข็งแรงมากกว่า E-glass ถึง 30% แต่มีราคาแพงกว่าถึง 7 เท่า นิยมใช้ในงานทางการทหารและยานอวกาศ

เส้นใยแก้วมีรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ ได้ดังนี้ [8]

1. เส้นใยแก้วชนิดยาว (Roving)

มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ม้วนเป็นหลอด ดังรูป 2.8(ก) เหมาะสำหรับกรรมวิธีการผลิตแบบใช้เครื่องพ่น (Spray up) แบบพันท่อ (Filament Winding) แบบดึงแนวยาว (Pultrusion) และแบบ SMC (Sheet molding compound) ให้ความแข็งแรงในด้านการรับแรงดึงและแรงบิดงอได้สูงสุด

2. เส้นใยแก้วชนิดสั้น (Chopped Strands)

เป็นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ดังรูป 2.8(ข) เหมาะสำหรับใช้กับกรรมวิธีการผลิตแบบอัดเหลว คือใช้เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นผสมกับเรซินเสียก่อนแล้วจึงเทอัดลงในแม่แบบ ขนาดเส้นมาตรฐานยาว 3 และ 6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ใยแก้วชนิดเส้นสั้นยังนิยมนำไปผสมเป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกพวก ฟีนอลิก เอบีเอส พอลิพรอพิลีน เป็นต้น

3. เส้นใยแก้วชนิดCSM (Chopped Strands Mat)

เป็นเส้นใยที่นิยมใช้กับงานทั่วไป มีผืนขนาดแตกต่างกัน แล้วแต่การใช้งาน เช่น ผืนเบอร์ 300 450 และ 600 (ตัวเลขของผืนเบอร์ คือ น้ำหนักเป็นกรัมต่อหนึ่งตารางเมตร) ดังรูป 2.8 (ค)

4. เส้นใยแก้วชนิดผืนเส้นยาว (Continuous Strand Mat)

เส้นใยแก้วชนิดนี้เสริมให้ชิ้นงานแข็งแรงกว่าชนิดCSM เพราะเส้นใยแก้วยาวตลอดเป็นเส้นเดียวกัน ใช้กับชิ้นงานที่มีผิวเรียบตลอด โดยปกติจะใช้กับการผลิตแบบอัดขึ้นรูป

5. เส้นใยแก้วชนิดผืนเส้นใยละเอียด (Surfacing Mat)

ใช้สำหรับเสริมชั้นแรกต่อจากชั้นเจล ใค้ด ในชิ้นงานพิเศษหรือขนาดเล็ก ขนาดที่นิยมใช้คือเบอร์ 30

6. เส้นใยแก้วชนิดผืนละเอียด (Woven Roving)

ใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษหรือชั้นที่ 2 - 3 ต่อจากชั้นเจล ใค้ด หรือมีชื่อเรียกง่ายๆทั่วไปว่า ใยแก้วสานเล็ก ขนาดที่นิยมใช้ คือ เบอร์ 25 100 130 200 และ 300 ดังรูป 2.8(ง)

7. เส้นใยแก้วชนิดผืนหยาบ (Woven Roving)

เป็นเส้นใยแก้วที่ให้ความแข็งแรงสูงๆ กับชิ้นงานขนาดใหญ่ซึ่งการใช้จะสลับกับใยแก้วชนิดCSM มีชื่อเรียกง่ายๆ ทั่วไปว่า ใยแก้วสานใหญ่

8. เส้นใยแก้วชนิดเส้นด้าย (Yarn)

มีลักษณะเป็นเส้นยาวเหมือนเส้นด้าย ผ่านการพันบิดรวมเส้นแล้วนำไปทอเป็นเส้นใยแก้วทอชนิดพิเศษ (Fabrics) มีหลายขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.08 ถึง 0.50 มิลลิเมตร

### 9. เส้นใยแก้วทอชนิดพิเศษ (Fabrics)

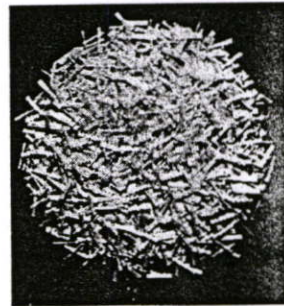
เป็นเส้นใยแก้วชนิดที่ทอเป็นพิเศษ มีความแข็งแรงสูง มีเบอร์หลากหลาย เช่น 25 ถึง 330 เป็นต้น

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการลดความแข็งแรงของเส้นใยแก้วคือ รอยตำหนิ ที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผลิต การขนส่ง ดังนั้นในการผลิตจึงมีการปรับปรุงและลดปัญหาการเสียดสีของเส้นใย โดยการใช้สารเคลือบลงบนเส้นใย เรียกว่า “ไซซิ่งเอเจนต์” (Sizing agent) ที่สำคัญได้แก่สารคู่ควบจำพวกซิลเลน (Silane coupling agent) ซึ่งทำหน้าที่ดังนี้ [4]

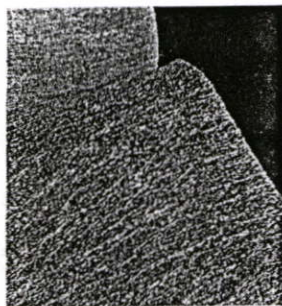
- ป้องกันผิวของเส้นใยไม่ให้เกิดตำหนิอันเนื่องจากการเสียดสี
- เชื่อมเส้นใยให้ติดเข้าด้วยกัน เพื่อความสะดวกในการผลิตและขึ้นรูป
- หล่อลื่นเส้นใยให้สามารถต้านทานต่อการขูดเสียดสีในระหว่างขั้นตอนการผลิต
- ให้สมบัติต่อต้านไฟฟ้าสถิตย์ (Anti-static properties)
- เพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย เพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุของเส้นใยกับเมทริกซ์



2.8 (ก)



2.8 (ข)



2.8 (ค)



2.8 (ง)

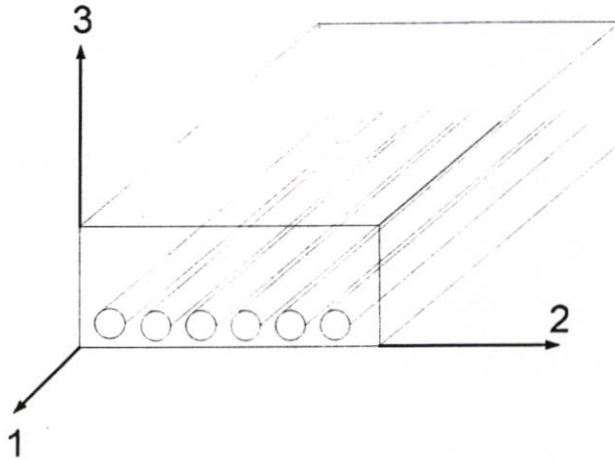
รูปที่ 2.8 ชนิดของเส้นใยแก้ว (ก) เส้นใยแก้วชนิดยาวต่อเนื่อง (Roving),

(ข) เส้นใยแก้วตัดสั้น (Chopped glass), (ค) เส้นใยแก้วชนิดCSM (Chopped stand mat),

(ง) เส้นใยแก้วทอชนิดพิเศษ (Woven roving) [9]

### 2.3 สมบัติเบื้องต้นของลามิना [1]

จะเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลในระดับจุลภาค (Micromechanics) เพราะลามิเนตหรือวัสดุคอมโพสิตจะสร้างขึ้นจากลามิनाหลายๆชั้นรวมกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการง่ายต่อการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิต จึงต้องเรียนรู้สมบัติเบื้องต้นของลามินำก่อน



รูปที่ 2.9 ชั้นลามินำเส้นใยทิศทางเดียวของคอมโพสิตในระบบโคออร์ดิเนต [1]

จากรูปที่ 2.9 จะได้สมบัติต่างๆในแต่ละแนวแกน ดังนี้

- $E_1, E_2, E_3$                       คือ โมดูลัสของคอมโพสิตในทิศทาง 1,2 และ 3
- $G_{12}, G_{23}, G_{13}$                 คือ โมดูลัสแรงเฉือนในระนาบ 1-2, 2-3 และ 1-3
- $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$                 คือ อัตราส่วนพัวซองในระนาบ 1-2, 2-3 , และ 1-3
- $F_{1t}, F_{2t}, F_{3t}$                     คือ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ในทิศทาง 1,2 และ 3
- $F_{1c}, F_{2c}, F_{3c}$                     คือ ค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) ในทิศทาง 1,2 และ 3
- $F_{12}, F_{23}, F_{13}$                 คือ ค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ในระนาบ 1-2, 2-3 และ 1-3

การหาสมบัติต่างๆของลามินำ จำเป็นที่จะต้องทราบลักษณะเฉพาะของลามินำ ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังนี้

$$\text{สัดส่วนเส้นใยต่อปริมาตร (V}_f\text{)} = \frac{\text{ปริมาตรของเส้นใย}}{\text{ปริมาตรของคอมโพสิต}}$$

$$\text{สัดส่วนเส้นใยต่อน้ำหนัก (} W_f \text{)} = \frac{\text{น้ำหนักของเส้นใย}}{\text{น้ำหนักของคอมโพสิต}}$$

$$\text{สัดส่วนเมทริกซ์ต่อปริมาตร (} V_m \text{)} = \frac{\text{ปริมาตรของเมทริกซ์}}{\text{ปริมาตรของคอมโพสิต}} = 1 - V_f$$

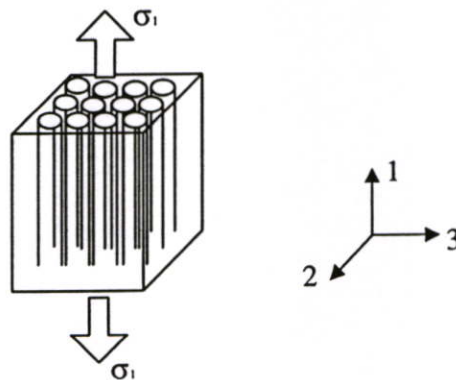
$$\text{สัดส่วนเมทริกซ์ต่อน้ำหนัก (} W_m \text{)} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทริกซ์}}{\text{น้ำหนักของคอมโพสิต}} = 1 - W_f$$

$$\text{สัดส่วนช่องว่างต่อปริมาตร (} V_v \text{)} = 1 - \frac{W_f / \rho_f + (W_c - W_f) / \rho_m}{W_c / \rho_c}$$

### 2.3.1 การทำนายสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุคอมโพสิต

#### 2.3.1.1 สมบัติการยืดหยุ่นในแนวตามยาวของเส้นใยชนิดต่อเนื่องทิศทางเดียว

สมบัติในแนวตามยาวของเส้นใยจะขึ้นกับโพลดที่กระทำในทิศทางของเส้นใยเป็นหลัก ซึ่งเส้นใยจะมีความแข็งแรง ความแข็งตึง และมีระยะของการยืดตัวที่ต่ำมาก จากรูปที่ 2.10 สมมติให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ดี มีความเครียดในแนวตามยาวสม่ำเสมอ และเท่ากันทั้งในเส้นใยและเมทริกซ์ จะนำไปสู่ “กฎของของผสม (Rule of mixture)” เพื่อใช้ในการหาค่ามอดุลัสในแนวแกนหรือแนวตามยาว (Longitudinal modulus) ซึ่งในที่นี้จะสมมุติว่าไม่มีช่องว่างในคอมโพสิต



รูปที่ 2.10 วัสดุคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาวต่อเนื่องในทิศทางเดียว มีแรงดึงกระทำในแนวตามยาว [2]

$$E_1 = V_f E_{1f} + V_m E_m \tag{2.1}$$

- เมื่อ  $E_1$  คือ มอดุลัสในแนวแกนหรือแนวตามยาว
- $E_{1f}$  คือ มอดุลัสของเส้นใยในแนวตามยาวหรือทิศทาง 1
- $E_m$  คือ มอดุลัสของเมทริกซ์
- $V_f$  คือ สัดส่วนเส้นใยต่อปริมาตร
- $V_m$  คือ สัดส่วนเมทริกซ์ต่อปริมาตร

จากสมมติฐานเดียวกัน ยังสามารถใช้หาอัตราส่วนของพัชองได้จากสมการ

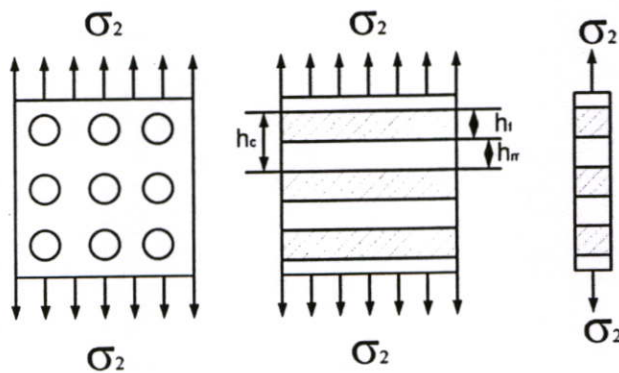
$$\nu_{12} = \nu_{12f} V_f + \nu_m V_m \tag{2.2}$$

- เมื่อ  $\nu_{12f}$  คือ อัตราส่วนพัชองของเส้นใยในระนาบ 1-2
- $\nu_m$  คือ อัตราส่วนพัชองของเมทริกซ์

2.3.1.2 สมบัติการยึดหยุ่นในแนวตั้งฉากกับเส้นใยชนิดต่อเนื่องทิศทางเดียว

โหลดที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยจะเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเมทริกซ์รอบๆเส้นใยและจะมีการกระจายของโหลดไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นค่ามอดุลัสที่เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยจะขึ้นกับสมบัติของเมทริกซ์เป็นหลักและการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง การหาค่ามอดุลัสจึงสร้างโมเดลที่มีลักษณะเป็นแผ่นประกอบด้วยภาคตัดขวางของเส้นใยและเมทริกซ์ ดังรูป

2.11



รูปที่ 2.11 โมเดลที่ใช้ในการศึกษาความเค้นดึงที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิตในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใย [2]

จากโมเดลสมมติให้เมทริกซ์และเส้นใยอยู่ภายใต้ความเค้นดึงที่สม่ำเสมอ จากนั้นหาความสัมพันธ์ของมอดุลัสในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยได้จากสมการ [10]

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{2f}} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_{2f}$  คือ ค่ามอดุลัสของเส้นใยในทิศทาง 2

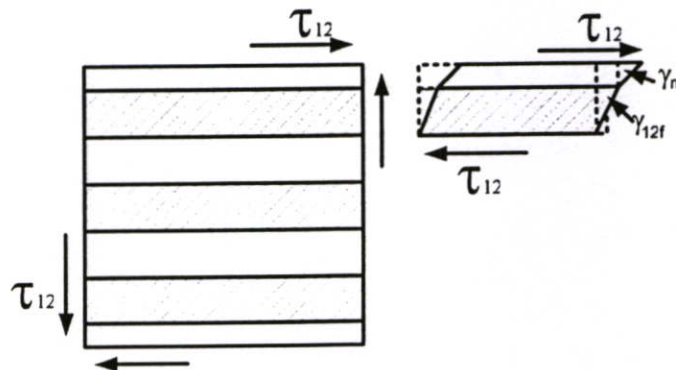
จากสมการ (2.3) พบว่ายังมีความผิดพลาดของสมการซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไม่ได้กำหนดให้  $\epsilon_{1r} = \epsilon_m$  แต่ในความเป็นจริงจะต้องมีค่าเท่ากันเนื่องจากเส้นใยและเมทริกซ์ต้องติดกันไปและการถ่ายแรงจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ จึงต้องมีตัวแปรเพื่อทำการแก้ค่าของ  $E_2$  ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังสมการ

$$\frac{1}{E_2} = \left( \frac{V_f}{E_{2f}} + \frac{\eta V_m}{E_m} \right) \left( \frac{1}{V_f + \eta V_m} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ Stress partitioning factor จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 – 0.6

### 2.3.1.3 ค่ามอดุลัสแรงเฉือนในระนาบ

พฤติกรรมของคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาวต่อเนื่องภายใต้แรงเฉือน จะขึ้นกับสมบัติของเมทริกซ์ และตำแหน่งของการกระจายความเค้น การตอบสนองของชั้นวัสดุคอมโพสิตภายใต้แรงเฉือนที่ขนานกับแนวเส้นใย สามารถเขียนโมเดลได้ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 เอลิเมนต์ของคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาวต่อเนื่องภายใต้แรงเค้นเฉือน [2]

จากรูป 2.12 แรงเค้นเฉือนทำให้เส้นใยและเมทริกซ์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่เท่ากันทั้งที่มีแรงกระทำเท่ากัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉลี่ยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\gamma_{12} = \gamma_{12f} V_f + \gamma_m V_m \quad (2.5)$$

หรืออยู่ในรูปของมอดุลัสแรงเฉือน ดังสมการ

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12f}} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.6)$$

แต่ในสมการ (2.6) ยังมีการส่งผ่านแรงเฉือนที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องแก้สมการโดยใช้ Stress partitioning factor จะได้สมการเป็น

$$\frac{1}{G_{12}} = \left( \frac{V_f}{G_{12f}} + \frac{\eta' V_m}{G_m} \right) \left( \frac{1}{V_f + \eta' V_m} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\eta'$  คือ Stress partitioning factor จะมีค่าประมาณ 0.6

## 2.4 สมบัติเชิงกลของลามิना [1]

เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตประกอบขึ้นจากชั้นลามินำหลายๆชั้น ที่มีการจัดวางของเส้นใยที่หลากหลายมุม หลายความหนา และซับซ้อนมากเป็นผลให้เมื่อพิจารณาหรือทำนายสมบัติของวัสดุคอมโพสิตรวมจะทำให้เกิดความยุ่งยาก และการคำนวณต้องใช้สมการชั้นสูงและอุปกรณ์ที่มีความสามารถสูงช่วยในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการทำนายสมบัติของวัสดุคอมโพสิต จึงต้องศึกษาสมบัติและทำความเข้าใจเกี่ยวกับชั้นลามินำ

### 2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุประเภทแอนไอโซทรอปิก

จากกฎของฮุก สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยย่อได้ดังนี้

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad \text{เมื่อ } i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.8)$$

โดยที่  $\sigma_i$  คือ องค์ประกอบความเค้น (Stress components)  
 $C_{ij}$  คือ เมทริกซ์ความแข็งตึง (Stiffness matrix)  
 $\varepsilon_j$  คือ องค์ประกอบความเครียด (Strain components)

เมทริกซ์ความแข็งดึงในสมการ (2.8) จะประกอบด้วยค่าคงที่ทั้งหมด 36 ค่า แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของวัสดุยืดหยุ่น ตามหลักของพลังงานความเครียดค่าอิสระคงที่จะน้อยกว่า 36 ค่า จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.9)

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (2.9)$$

ทำให้ค่าคงที่อิสระจาก 36 ค่า ลดลงเหลือ 21 ค่า สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ดังสมการ (2.10)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

แต่เมื่อพิจารณาสมบัติของวัสดุออร์โททรอปิก จะมีระนาบสมมาตรของสมบัติทั้ง 3 ระนาบตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นสามารถลดค่าคงที่อิสระลงได้ ตามสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

ความเค้นปกติ  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  และ ความเครียดเฉือน  $\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$  จะไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน เหมือนกับที่เกิดขึ้นในวัสดุประเภทไอโซทรอปิก ความเค้นเฉือนและความเครียดก็เช่นเดียวกัน กล่าวคือ ไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน มีค่าคงที่อิสระ 9 ค่าในเมทริกซ์แข็งดึง นอกจากนั้นยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของคอมไพแอนซ์เมทริกซ์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

#### 2.4.2 ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมสำหรับวัสดุประเภทออร์โททรอปิก

จากองค์ประกอบของคอมไพแอนซ์เมทริกซ์ ( $S_{ij}$ ) สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าคงที่เชิงวิศวกรรมได้ดังนี้

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.4.3 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสำหรับความเค้นระนาบในวัสดุออร์โททรอปิกของลามิनाในระนาบ 1-2 ดังแสดงในรูป 2.10 ความเค้นของระนาบสามารถหาได้โดยกำหนดให้  $\sigma_3 = 0$ ,  $\tau_{23} = 0$  และ  $\tau_{13} = 0$  จากสมการ 2.12 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) สามารถเขียนกลับเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{22} &= \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{66} &= G_{12}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

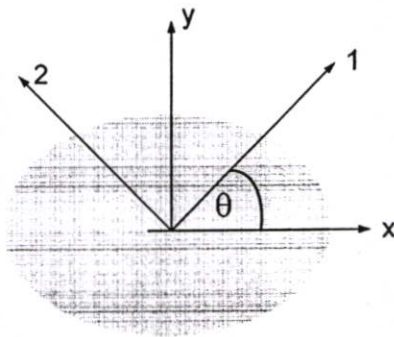
2.4.4 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสำหรับลามิनाเสริมแรงด้วยเส้นใยที่วางทำมุมต่างกัน

ความเค้นและความเครียดที่พิจารณาในหัวข้อที่ผ่านมานั้นจะเป็นความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางหลักหรือในแกนสำคัญ ซึ่งถือเป็นแกนเดียวกับแกนหลักของวัสดุออร์โททรอปิก แต่ในการใช้งานจริงทิศทางของเส้นใยอาจจะไม่อยู่ในแนวทิศทางหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในการเปลี่ยนระบบแกน สมการการแปลงระบบแกนของความเค้น จากระบบแกน x-y ไปเป็นระบบแกน 1-2 มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \tag{2.17}$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมระหว่างแกน x ถึงแกน 1 ดังรูป 2.13 ในทำนองเดียวกันสมการการเปลี่ยนระบบแกนของความเครียด คือ

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.13 การหมุนของแกนสำคัญหรือแกนหลักของวัสดุจากแกน  $xy$  ใดๆในทางบวก [1]

จากสมการ (2.15), (2.17) และ (2.18) สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในระบบแกน  $xy$  คือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดยที่  $\bar{Q}_{ij}$  แทนค่าความแข็งดิ่งที่แปลงรูป (Transformed) มาจากความแข็งดิ่ง  $Q_{ij}$  ในทางตรงข้ามสามารถเขียนสมการของความเครียดในเทอมของความเค้นในระบบแกนของรูปทรงวัตถุต่างๆ (ระบบแกน  $xy$ ) ได้ 2 วิธี คือ

- (1) จากสมการความสัมพันธ์ของความเครียดและความเค้นในสมการ (2.19) กลับกันโดยคำนวณหาอินเวอร์สของเมทริกซ์  $\bar{Q}_{ij}$
- (2) แปลงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นในระบบแกนของรูปทรงวัตถุ (ระบบแกน  $xy$ ) ดังแสดงข้างล่าง

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 เลือกใช้วิธีการที่ 2 จะได้สมการ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11} &= S_{11}\cos^4\theta + 2(S_{12}+2S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{22}\sin^4\theta \\ \bar{S}_{12} &= (S_{11}+S_{22}-4S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{12}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) \\ \bar{S}_{22} &= S_{11}\sin^4\theta + 2(S_{12}+2S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{22}\cos^4\theta \\ \bar{S}_{16} &= (S_{11}-S_{12}-2S_{66})\sin\theta\cos^3\theta + (S_{12}-S_{22}+2S_{66})\sin^3\theta\cos\theta \\ \bar{S}_{26} &= (S_{11}-S_{12}-2S_{66})\sin^3\theta\cos\theta + (S_{12}-S_{22}+2S_{66})\sin\theta\cos^3\theta \\ \bar{S}_{66} &= (S_{11}+S_{22}-2S_{12}-2S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) \end{aligned} \quad (2.23)$$

เปรียบเทียบค่าของเทอมต่างๆ ในคอมไพแอนซ์เมทริกซ์สำหรับวัสดุออร์โททรอปิกที่แปลงระบบแกนแล้วในสมการ (2.23) กับค่าของเทอมต่างๆ ในคอมไพแอนซ์เมทริกซ์สำหรับวัสดุออร์โททรอปิกในเทอมของค่าคงที่เชิงวิศวกรรมในสมการที่ (2.13) จะพบว่าสัมประสิทธิ์การมีอิทธิพลซึ่งกันและกันจะมีผลต่อเมื่อลามีนำของวัสดุออร์โททรอปิก มีความเค้นกระทำในทิศทางที่ไม่ใช่ทิศทางหลักหรือทิศทางสำคัญ (ทิศทางตามแนวเส้นใย) การกำหนดระบบแกน 1 และ 2 ขึ้นมาใหม่จากคอมไพแอนซ์เมทริกซ์ เช่นเดียวกับแกน xy แต่วัสดุออร์โททรอปิกไม่ขึ้นกับทิศทางหลัก จากนั้นแทนค่า  $S_{ij}$  ลงในระบบแกนที่กำหนดขึ้นมาใหม่ จะได้ค่าคงที่เชิงวิศวกรรมสำหรับลามีนำของวัสดุออร์โททรอปิก ซึ่งมีความเค้นกระทำในทิศทางที่ไม่ใช่ทิศทางสำคัญหรือทิศทางหลักของวัสดุ (xy) คือ

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_x} &= \frac{1}{E_1}\cos^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{1}{E_2}\sin^4\theta \\ \nu_{xy} &= E_x\left(\frac{\nu_{12}}{E_1}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta\right) \\ \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{E_1}\sin^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{1}{E_2}\cos^4\theta \\ \frac{1}{G_{xy}} &= 2\left(\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{1}{G_{12}}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) \end{aligned} \quad (2.24)$$

จากสมการข้างต้นทั้งหมดเป็นการทำนายสมบัติในทิศทางต่างๆของลามิनाที่ประกอบขึ้นจากเส้นใยทิศทางเดียว แต่ในหัวข้อวิจัยได้เลือกใช้เส้นใยแก้วทอชนิดผืน ที่มีลักษณะการเรียงเส้นใยแบบ 0 และ 90 องศาสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้ [11]

$$\begin{aligned} E_x &\approx kE_1 + (1-k)E_2 \\ E_y &\approx (1-k)E_1 + kE_2 \\ G_{xy} &= G_{12} \\ \nu_{xy} &= \frac{\nu_{12}}{\left(k + (1-k)\frac{E_1}{E_2}\right)} \end{aligned} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $k = n_1/(n_1+n_2)$   
 $n_1$  = จำนวนเส้นใยในแนวยาว (Warp) ต่อ เมตร  
 $n_2$  = จำนวนเส้นใยในแนวตั้งฉาก (Fill) ต่อเมตร

และเส้นใยชนิดCSM ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{mat} &= \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2 \\ G_{mat} &= \frac{E_{mat}}{2(1+\nu_{mat})} \\ \nu_{mat} &\approx 0.3 \end{aligned} \quad (2.26)$$

## 2.5 สมบัติเชิงกลของลามิเนต

เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตประกอบขึ้นจากชั้นของลามิनाหลายๆ ชั้น เรียงซ้อนกันหลายทิศทางขึ้นอยู่กับการจัดเรียงและการออกแบบ ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรม และสมบัติในด้านต่างๆ สามารถทำนายจากทฤษฎีการลามิเนต ดังนี้

### 2.5.1 ทฤษฎีการลามิเนตชั้นสูง

#### 2.5.1.1 สมบัติเกี่ยวกับความเค้นและความเครียดของลามิना

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในระบบแกนสำคัญของลามิनाในวัสดุออร์โททรอปิก ภายใต้อุณหภูมิและความเค้นระนาบดังแสดงในสมการที่ (2.15)

โดยที่ค่า  $Q_{ij}$  ในเทอมของค่าคงที่เชิงวิศวกรรมมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.16) ส่วนความเค้นในระบบแกนอื่นๆ (xy) ในระนาบของลาจะสัมพันธ์กับค่า  $Q_{ij}^-$  เป็นดังสมการ (2.20) สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในระบบแกน (xy) ดังสมการ (2.19) มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์หาค่าความแข็งตึงของลามิเนตอย่างมาก เพราะลามิเนตประกอบขึ้นจากชั้นของลามิเนตหลายๆชั้นรวมกัน ซึ่งจากสมการที่ (2.15) และ (2.19) สามารถใช้คำนวณหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของลามิเนตในแต่ละชั้นที่  $k$  ได้ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโดยย่อได้ดังนี้

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad (2.27)$$

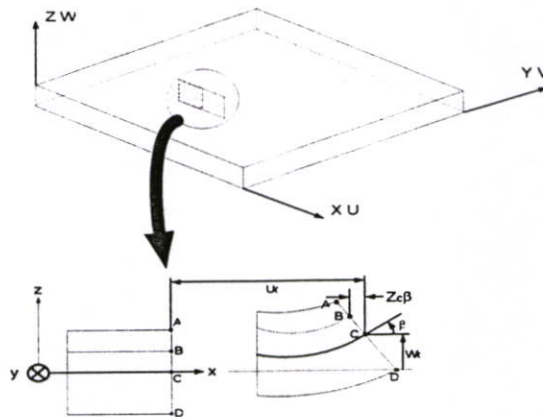
### 2.5.2 การเปลี่ยนแปลงของความเครียดและความเค้นในลามิเนต

การเปลี่ยนแปลงของความเค้นและความเครียดตลอดความหนาของลามิเนต นั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการกำหนดค่าความแข็งตึง เนื่องจากการยึดและการดัดโค้งของลามิเนต โดยกำหนดให้ลามิเนตประกอบขึ้นจากลามิเนตที่ประสานติดกันดี มีรอยประสานบางมากจนถือว่าเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ดังนั้นลามิเนตจึงมีพฤติกรรมเสมือนวัสดุชั้นเดียวที่มีสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ถ้ากำหนดให้ ลามิเนตมีความบางมากๆ และเส้นตรงที่สมมติขึ้นตั้งฉากกับระนาบกึ่งกลางความหนาของลามิเนต เมื่อมีแรงกระทำต่อแผ่นลามิเนต จะไม่คำนึงถึงความเครียดเฉือนในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบกึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต นั่นคือ  $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$  โดยที่  $z$  คือทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบกึ่งกลางความหนาของลามิเนต ดังรูปที่ 2.14 และสมมติให้แนวตั้งฉากกับผิวหน้ากึ่งกลางความหนาของลามิเนตมีความยาวคงที่ จึงไม่ต้องคำนึงถึงความเครียดฉากในแนวความหนาของลามิเนต นั่นคือ  $\varepsilon_z = 0$  จากรูป 2.14 เป็นภาพตัดขวางของลามิเนตในระนาบ  $xz$  ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาการกระจัดของลามิเนต  $U, V$  และ  $W$  ในแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ จากสมมติฐานของเคอร์คอฟ การกระจัดในแกน  $x$  ของจุด C จากสถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปสู่สถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง คือ  $U_0$  เนื่องจากเส้น ABCD ยังคงมีสภาพเป็นเส้นตรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลามิเนต ดังนั้น จุด B จะเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  เป็นการกระจัด

$$U_B = U_0 - Z_B \beta \quad (2.28)$$

แต่เนื่องจากภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเส้น ABCD ยังคงตั้งฉากกับผิวหน้ากึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต ดังนั้น  $\beta$  จึงเป็นความชัน (Slope) ของผิวหน้ากึ่งกลางความหนาของลามิเนตในแกน  $x$  นั่นคือ

$$\beta = \frac{\partial W_0}{\partial x} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลามิเนตในระนาบ xz [2]

และการกระจัด  $U$  ที่จุดใดๆ  $z$  ตลอดความหนาของลามิเนต คือ

$$U = U_0 - z \frac{\partial W_0}{\partial x} \quad (2.30)$$

และทำนองเดียวกันการขจัด  $V$  ในแกน  $y$  คือ

$$V = V_0 - z \frac{\partial W_0}{\partial y} \quad (2.31)$$

จากสมมติฐานของเคอร์คอฟ ความเครียดของลามิเนตจะเหลือเพียงแค่  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\gamma_{xy}$  ที่มีค่าและ  $\epsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$  สำหรับความเครียดน้อยๆ ในช่วงขีดยุ่นสามารถเขียนในเทอมของการขจัดได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.320) และ (2.31) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial U_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial V_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 W_0}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{2.33}$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}\tag{2.34}$$

เมื่อความเครียดของระนาบกึ่งกลางความหนาของลามิเนต คือ

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial U_0}{\partial x} \\ \varepsilon_y^0 &= \frac{\partial V_0}{\partial y} \\ \gamma_{xy}^0 &= \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x}\end{aligned}\tag{2.35}$$

และความโค้งของผิวหน้ากึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต คือ

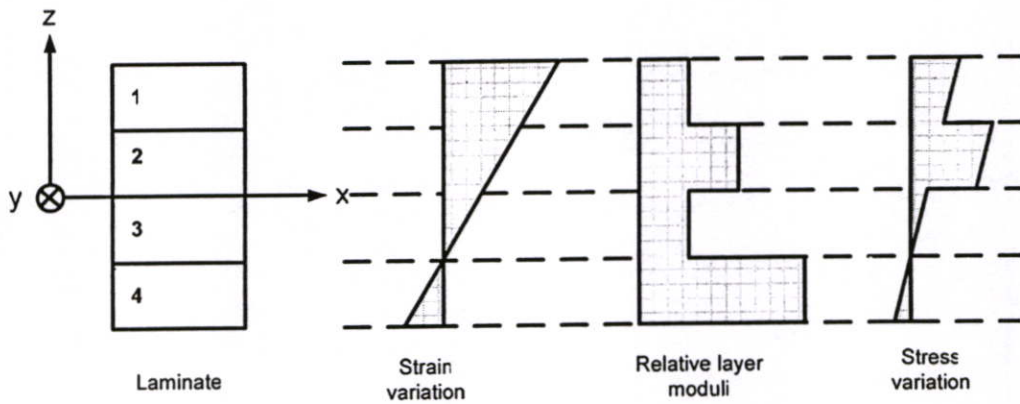
$$\begin{aligned}\kappa_x &= \frac{\partial^2 W_0}{\partial x^2} \\ \kappa_y &= \frac{\partial^2 W_0}{\partial y^2} \\ \kappa_{xy} &= 2 \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{2.36}$$

จากสมการ (2.32) และการวิเคราะห์ความเครียดที่อธิบายผ่านมาทั้งหมดเป็นการวิเคราะห์ความเครียดของแผ่นลามิเนตเท่านั้น แทนค่าจากสมการ (2.34) ลงในสมการ (2.29) จะได้สมการความเค้น

ในชั้น  $k$  ในเทอมของความเครียดและการกระจัดของระนาบที่กึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \right\} \quad (2.37)$$

เนื่องจาก  $\bar{Q}_{ij}$  ในแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตลอดความหนาของแผ่นลามิเนตจึงไม่จำเป็นต้องเป็นสมการเชิงเส้นตรง แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความเครียดตลอดความหนาของแผ่นลามิเนตจะเป็นเชิงเส้นตรงก็ตาม รูป 2.15 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของความเครียดและความเค้นตลอดความหนาของแผ่นลามิเนต



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของความเครียดและความเค้นตลอดความหนาของแผ่นลามิเนต [1]

### 2.5.3 แรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ของลามิเนต

แรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ที่กระทำกับลามิเนตนั้นหาได้โดยการอินทิเกรตความเค้นตลอดความหนา ( $t$ ) ของลามิเนต ดังสมการ

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \\ M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \end{aligned} \quad (2.38)$$

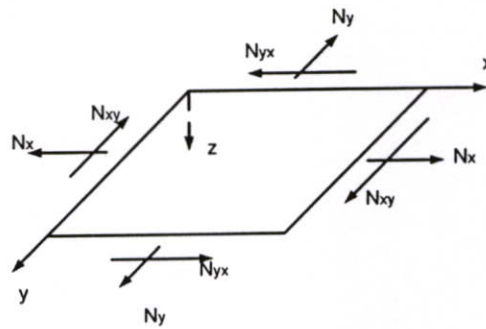
เมื่อ  $N_x$  เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยความยาวตามแนวแกน  $y$  ของหน้าตัดขวางของลามิเนตดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในทำนองเดียวกันกับ  $M_x$  ก็เป็นโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวตามแนวแกน  $y$  เช่นกัน

ผังรูป 2.17 ผลลัพธ์ของแรงและโมเมนต์ทั้งหมดที่สามารถกระทำกับแผ่นลามิเนตได้แสดงไว้ในรูป 2.16 และ 2.17 และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

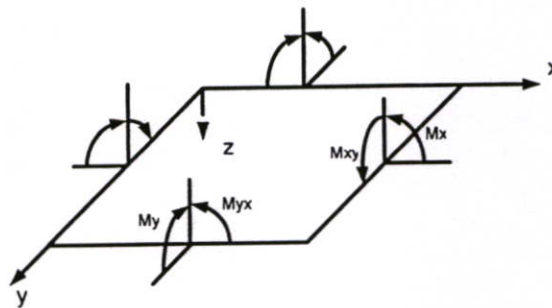
$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (2.39)$$

และ

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (2.40)$$

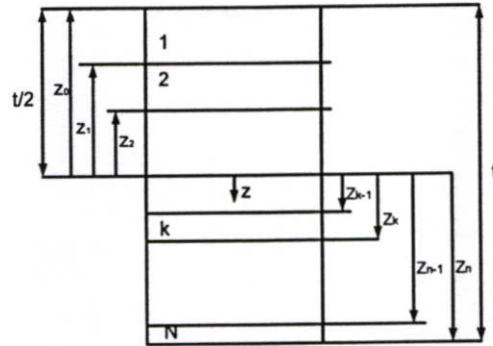


รูปที่ 2.16 แรงลัพธ์ในระนาบที่กระทำบนแผ่นลามิเนต [1]



รูปที่ 2.17 โมเมนต์ลัพธ์ที่กระทำบนแผ่นลามิเนต [1]

เมื่อ  $Z_k$  และ  $Z_{k-1}$  เป็นระยะจากระนาบและพบว่า  $Z_0 = -t/2$  กึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต ดังแสดงในรูป 2.18 ผลลัพธ์ของแรงและโมเมนต์จะไม่ขึ้นกับค่า  $Z$  จากการอินทิเกรต แต่จะเป็นฟังก์ชันของ  $x$  และ  $y$  ซึ่งเป็นระบบแกนในระนาบของผิวหน้ากึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต



รูปที่ 2.18 ลามิเนตที่ประกอบด้วยลามิเนต N ชั้น [1]

เมื่อแทนค่า  $\{\sigma\}_k$  จากสมการ (2.37) ลงในสมการ (2.39) และ (2.40) พบว่าเทอมของเมทริกซ์ความแข็งแรงสำหรับลามิเนตนั้นคงที่ภายในแผ่นลามิเนต ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (2.41)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (2.42)$$

เนื่องจาก  $\varepsilon_x^0$ ,  $\varepsilon_y^0$ ,  $\gamma_{xy}^0$ ,  $\kappa_x$ ,  $\kappa_y$ , และ  $\kappa_{xy}$  ไม่เป็นฟังก์ชันของ  $z$  เพราะเป็นค่าความเครียดของระนาบกึ่งกลางความหนาของแผ่นลามิเนต ดังนั้นจึงสามารถเขียนไว้นอกเครื่องหมายแสดงผลรวมได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned}
 A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\
 B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\
 D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

เมื่อค่า  $A_{ij}$  คือ ค่าความแข็งดึงการยืด (Extensional stiffness)  
 $B_{ij}$  คือ ค่าความแข็งดึงคู่ควบ (Coupling stiffness)  
 $D_{ij}$  คือ ค่าความแข็งดึงการคด (Bending stiffness)

จากสมการที่ (2.43) และ (2.44) สามารถนำมาเขียนรวมเป็นสมการเมทริกซ์ ได้ดังนี้ [10]

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \tag{2.46}$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.46) สามารถเขียนสมการกลับ ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ b_{11} & b_{12} & b_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \tag{2.47}$$

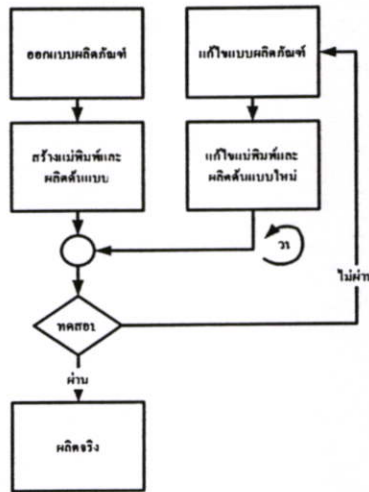
$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } [a_{ij}] &\text{ คือ } [A_{ij}]^{-1} \\
 [b_{ij}] &\text{ คือ } [B_{ij}]^{-1} \\
 [d_{ij}] &\text{ คือ } [D_{ij}]^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

## 2.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) [12]

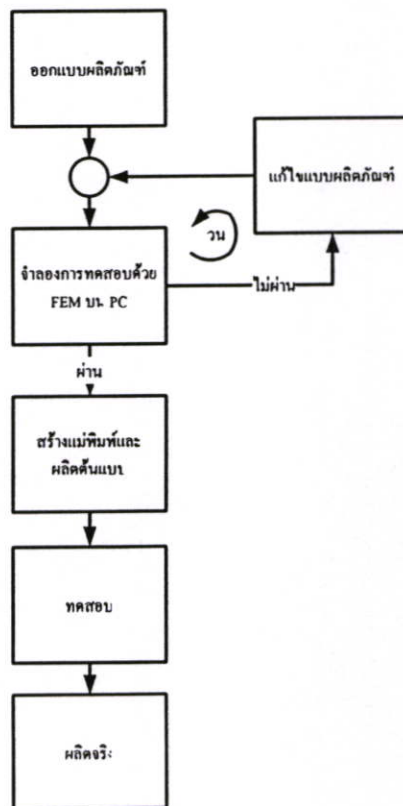
กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปจะเริ่มจากขั้นตอนการออกแบบให้ตรงความต้องการของลูกค้าหรือผู้ใช้งานเป็นหลัก เช่น มีรูปทรงที่สวยงาม เหมาะสมต่อการใช้งาน และมีความแข็งแรงต่อการใช้งาน เป็นต้น ในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะใช้ประสบการณ์ วิจารณ์เฉพาะส่วนตัว และผลการคำนวณเบื้องต้น เพื่อใช้ร่วมในการตัดสินใจออกแบบรูปร่างของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงนำไปสร้างแม่พิมพ์ตามแบบที่ได้ร่างไว้ ค่อยจากนั้นจึงนำแม่พิมพ์ไปผลิตต้นแบบ (Prototype) เพื่อนำไปทดสอบการรับภาระแรงให้เหมือนกับสภาพการใช้งานจริง ขั้นตอนดังกล่าวถือว่าเป็นหนึ่งรอบในกระบวนการออกแบบ ดังรูป 2.19 (ก) หากต้นแบบดังกล่าวเกิดความเสียหายเนื่องจากการทดสอบ ผู้ออกแบบต้องกลับมาแก้ไขปรับปรุงแบบใหม่และทำการทดสอบใหม่อีกครั้ง ทำให้รอบการออกแบบมากกว่าหนึ่งรอบ หรืออาจจะมากกว่านั้นจนกว่าต้นแบบจะสามารถทดสอบผ่าน ซึ่งถือว่าการออกแบบในลักษณะนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการออกแบบเพื่อช่วยลดจำนวนรอบในการออกแบบด้วยเทคโนโลยีการคำนวณขั้นสูงหรือที่เรียกว่า “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” มาร่วมในการออกแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

FEM เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้จะใช้ FEM ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล การถ่ายเทมวลเป็นต้น [13] การคำนวณที่ซับซ้อนเหล่านี้ ได้ถูกนำมาเขียนเป็นโปรแกรมการคำนวณอยู่ในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจำหน่ายทั่วไปซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบโปรแกรมเพื่อง่ายต่อการใช้งาน

การประยุกต์ใช้ FEM กับกระบวนการออกแบบจะช่วยให้ผู้ออกแบบไม่ต้องสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อน กล่าวคือภายหลังจากที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการแล้วจะใช้ FEM ช่วยในการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นของโครงสร้างขณะรับแรงจริง ดังรูป 2.19 (ข) เปรียบเสมือนกับการจำลองการทดสอบจริง ผลการวิเคราะห์จาก FEM จะทำให้ทราบค่าความเค้นสูงสุดบริเวณที่รับแรง ถ้าค่าที่ได้สูงมากๆผู้ออกแบบสามารถทำการแก้ไขแบบได้ในคอมพิวเตอร์จนได้แบบที่มีรูปร่างที่เหมาะสมและสามารถรับแรงได้ จึงนำแบบที่ได้ไปสร้างแม่พิมพ์และผลิตต้นแบบ จากนั้นนำต้นแบบไปทดสอบจริงต่อไป จะเห็นได้ว่า FEM สามารถช่วยลดจำนวนรอบในการออกแบบส่งผลให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก (รูปที่ 2.19 (ข))



2.19 (ก) แสดงรอบการออกแบบแบบเดิม



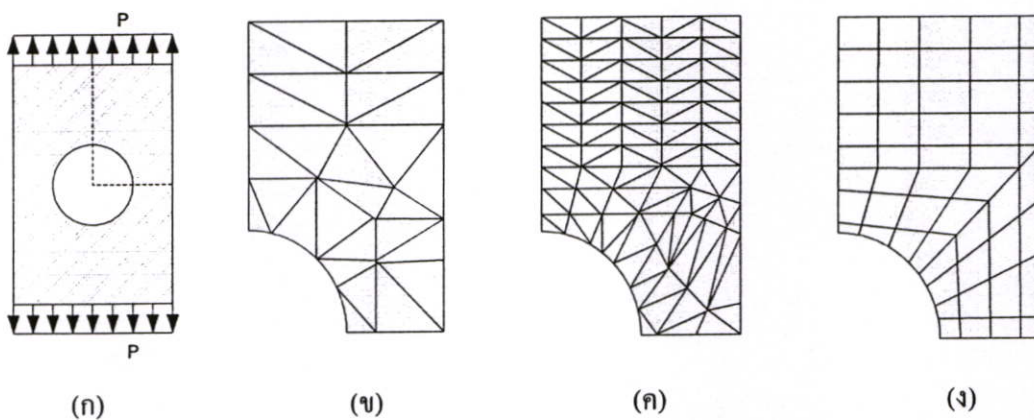
2.19 (ข) แสดงการออกแบบโดยการใช่ FEM

รูป 2.19 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป เปรียบเทียบกับการประยุกต์ใช้ FEM [12]

### 2.6.1 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐานสองวิธี คือวิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น (Force or flexibility method) และวิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนส (Displacement or stiffness method) วิธีแรกสามารถหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรงและสมการเงื่อนไขการกระจัด (Compatibility equation) ส่วนวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อหรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกันไม่ว่าก่อนและหลังโหลดกระทำยังคงมีความต่อเนื่องเหมือนเดิม ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดก็สามารถจะหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นนิยมใช้วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนสหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่าทั้งนี้เพราะสามารถจะหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่า ดังนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีการกระจัดด้วยหลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ เช่นรูป 2.20 ซึ่งเรียกว่า เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ (node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และโดยอาศัยสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงานทำให้สามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน



รูป 2.20 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (ก) แผ่นโลหะมีรูตรงกลางและมีโหลด P กระทำ (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมหยาบ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมละเอียด (ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง [13]

ขั้นตอนต่างๆของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน เช่น สปริง ท่อนโลหะ เพลลา โครงข้อหมุน โครงข้อแข็ง แผ่นโลหะ ดั้งความดัน และอื่นๆ ภายใต้สภาวะต่างๆของโหลด มีขั้นตอนต่างๆไปคล้ายกันดังนี้

#### 2.6.1.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิม คือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับ โครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วน โคน หรือมีรู หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลันจำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องและแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักอาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูป 2.20 แต่ถ้าแบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์ที่มากเกินไปก็จะเป็นทำให้มีค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ คืออาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ดังต่อไปนี้

##### (ก) เอลิเมนต์มิติเดียว

เป็นเอลิเมนต์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียว เป็นต้น

##### (ข) เอลิเมนต์สองมิติ

นิยมใช้วิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ(Plane stress or plane strain condition) [14] โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือ สี่เหลี่ยม ที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

##### (ค) เอลิเมนต์สามมิติ

นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบสามมิติ เอลิเมนต์จะมีรูปร่างเป็นแบบทรงหกหน้า (Hexahedral) และ สี่หน้า (Tetrahedral)

##### (ง) เอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร (Axisymmetric element)

ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบสามมิติที่มีรูปทรงแบบสมมาตร เอลิเมนต์จะเกิดจากการหมุนรอบแกน 360 องศา

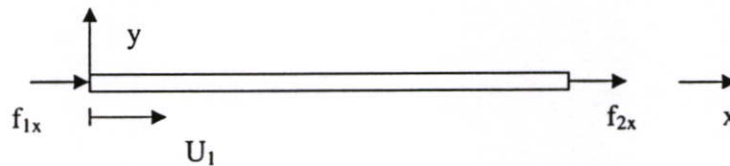
#### 2.6.1.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันคือ “พอลิโนเมียลฟังก์ชัน” ซึ่งอาจจะเป็นพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือ กำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็น

อนุกรมทางเรขาคณิตสามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม ทั้งนี้เพราะพอลิโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า ในกรณีของปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันการกระจัดที่จุดต่อจะเขียนอยู่ในเทอมของฟังก์ชันราบ เช่น ราบ  $x-y$  เป็นต้น ฟังก์ชันการกระจัดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยมีความต่อเนื่องทั้งภายในเอลิเมนต์และแบบจำลองของระบบรวม

### 2.6.1.3 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด/การกระจัด และความเค้น/ความเครียด

การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในกรณีของปัญหามิติเดียว รูปที่ 2.21 แสดงการยืดตัว  $U$  ของเอลิเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ทิศทาง  $x$  จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด  $\epsilon_x$  ในกรณีที่  $\epsilon_x$  มีค่าน้อยๆ,



รูปที่ 2.21 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน [13]

$\epsilon_x = du / dx$  และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น จากกฎของฮุก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดคือ  $\sigma_x = E\epsilon_x$  ซึ่ง  $\sigma_x$  คือความเค้นในทิศทาง  $x$  และ  $E$  คือค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น ผลเฉลยของการกระจัด ความเค้น ความเครียด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

### 2.6.1.4 หาสมการพีเนสมเมทริกซ์และสมการของเอลิเมนต์

การหาสมการพีเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการแรงของแต่ละเอลิเมนต์ สามารถหาได้หลายวิธี เช่น

(ก) วิธีสมดุลโดยตรง (Direct equilibrium method)

วิธีสมดุลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สามารถหาสมการพีเนสมเมทริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสมการพีเนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง ท่อนโลหะ เพลลา และคาน เป็นต้น

## (ข) วิธีที่อาศัยงานหรือพลังงาน (Work or Energy method)

โดยอาศัยหลักการของงานสมมติ (Principle of virtual work) หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of minimum potential energy) และ ทฤษฎีของแคสติกลีโยโน (Castigliano's theorem) จะสามารถหาสมการของเอลิเมนต์และหาสทิฟเนสของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้โดยสะดวก สำหรับวิธีของงานสมมตินั้นสามารถใช้หาสทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุด และทฤษฎีแคสติกลีโยโน ใช้หาสทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการ สามารถหาสทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน

## (ค) วิธีวัดสารคงเหลือโดยน้ำหนัก (Method of weighted residuals)

วิธีนี้นิยมกันมาก คือวิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin's method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีของพลังงาน ส่วนมากนิยมใช้ในกรณีวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ได้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนมวล (Mass transport) เป็นต้น

โดยวิธีข้างต้นวิธีใดวิธีหนึ่งตามที่กล่าวมา จะได้รับสมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิฟเนสเมทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ สมการดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdot & \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.49)$$

หรือ

$$\{ f \} = [ k ] \{ d \} \quad (2.50)$$

ซึ่ง  $\{ f \}$  คือเมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ  $[ k ]$  คือสทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ และ  $\{ d \}$  คือ การกระจัดที่จุดต่อซึ่งยังไม่ทราบค่า  $n$  คือจำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

### 2.6.1.5 หาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบ

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จากการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ในชั้นที่ 4 เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition method) หรือเรียกว่า วิธีสทิฟเนสโดยตรง (Direct stiffness method) โดยอาศัยหลักการของสมมูลแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์และความต่อเนื่อง (Continuity) ของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ สามารถ เขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{ F \} = [ K ] \{ d \} \quad (2.51)$$

ซึ่ง  $\{ F \}$  คือเมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ,  $[ K ]$  คือสทิฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบ และ  $\{ d \}$  คือเมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบซึ่งอาจจะทราบค่าบางค่า และบางตัวอาจจะไม่ทราบค่า เนื่องจากเมทริกซ์  $[ K ]$  ในสมการ (2.51) เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular matrix) ทั้งนี้เพราะตัวกำหนด (Determinant) เท่ากับศูนย์ จึงไม่สามารถหาค่า  $\{ d \}$  โดยตรงจากสมการได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยขอบเขตเงื่อนไข (Boundary conditions) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constraints) หรือจุดรองรับ (Supports) เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์  $[ K ]$  ในสมการ (2.51) ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

### 2.6.1.6 หาค่าการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับลงในสมการ (2.51) แล้วสามารถที่จะหาการกระจัด  $d_1, d_2 \dots d_n$  ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อมๆกัน ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.52)$$

การหาการกระจัด  $\{d\}$  อาจจะใช้วิธีของเกาส์ (Gauss's elimination method) หรือวิธีทำซ้ำ (Iteration method) หรืออาจจะหาได้จากการคูณสมการที่ (2.52) ด้วย  $[ K ]^{-1}$  ตลอด (จะใช้ได้เมื่อ  $[K]$  ไม่ใช่เมทริกซ์เอกฐาน)

### 2.6.1.7 การหาค่าความเค้นและความเครียด

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักร นอกจากต้องทราบการกระจัดแล้วยังต้องทราบค่าความเครียด ความเค้น หรือค่าของโมเมนต์ และแรงเฉือน ค่าต่างๆเหล่านี้สามารถจะคำนวณได้โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง อาทิเช่น ปัญหามิติเดียว ถ้าทราบค่าการกระจัด  $U$  ก็สามารถหาค่าความเครียดจาก  $\epsilon_u = du/dx$  และหาความเค้นได้จาก  $\sigma_x = E\epsilon_x$  (ตามขั้นตอนที่ 2.3.1.3)

### 2.6.1.8 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2.6.1.6 และ 2.6.1.7 สามารถทราบได้ว่าที่จุดต่อใดในเอลิเมนต์หรือบริเวณใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง หรือบริเวณใดที่มีความเค้นสูง เพื่อที่จะลดขนาดหรือการกระจัด และ/หรือความเค้นให้ต่ำลง โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมหรืออาจจะต้องเลือกวัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า เป็นต้น

## 2.6.2 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากข้างต้นพบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง จึงเป็นที่นิยมใช้ในงานทั่วไปทางด้านวิศวกรรม ข้อได้เปรียบของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดา มีดังนี้

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก รวดเร็ว
2. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่างๆ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ได้โดยไม่มี ความยุ่งยาก
4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าเงื่อนไขขอบ เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับ จะอยู่ในลักษณะใดๆ
5. สามารถเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามความเป็นจริง
6. ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถเลือกหรือปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สะดวกและทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

7. ในระบบการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรสมัยใหม่ (CAD และ CAM) นิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อน ก่อนที่จะทำการผลิตชิ้นส่วนจริง เพื่อช่วยในการลดต้นทุนและยังมีความถูกต้องแม่นยำสูง
8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ในช่วงของพลาสติก ก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์สิ่งที่ต้องการทราบได้ เช่น การวิเคราะห์หาความล้า และการคืบของชิ้นงานพลาสติก

### 2.6.3 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกค้ำยันน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการ คือ

- ประการที่หนึ่งการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด
- ประการที่สองการประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่
- ประการที่สามความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆของเครื่องคอมพิวเตอร์

การกำหนดหรือแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆ ให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากเท่าไร จะทำให้ผลเฉลยที่ได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น เช่น ถ้าต้องการวิเคราะห์ความเค้นในแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมที่มีรูตรงกลางและมีโหลด P มากระทำตามรูป 2.20 (ก) โดยอาศัยหลักการสมมาตร แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นโลหะควรจะใช้พื้นที่แค่หนึ่งในสี่ของพื้นที่ทั้งหมด เช่นแบบจำลองในรูป 2.20 (ข, ค และ ง) ส่วนเอลิเมนต์ย่อยๆ บริเวณรู ควรจะมีขนาดเล็กมากๆ เพื่อสามารถแทนส่วนโค้งของรูให้ได้มากที่สุด เช่นรูป 2.20 (ค) และอาจเลือกใช้เอลิเมนต์ที่สามารถแทนส่วนเว้าส่วนโค้งของรูหรือเลือกเอลิเมนต์ที่สามารถแทนการกระจัดในเชิงเส้นโค้งได้ เช่น การเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านโค้งดังเช่นรูปที่ 2.20 (ง)

ส่วนการได้มาของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ อาจจะไม่สอดคล้องกับการยึดตัวอย่างต่อเนื่องของวัสดุ เช่นถ้าเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีการยึดตัวเชิงเส้น เอลิเมนต์ชนิดนี้จะให้ความแม่นยำตรง ถ้าเป็นปัญหาแบบท่อนโลหะที่รับแรงดึงแรงอัด เป็นการรับแรงกระจายเนื่องจากมวลแล้วการกระจัดที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบสมการกำลังสอง ซึ่งถ้าใช้สมการเชิงเส้นไปใช้ในการวิเคราะห์จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนและไม่ถูกต้อง ดังนั้นการเลือกเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับลักษณะปัญหาและการเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กๆจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้

ส่วนการเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขนั้น จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่นำมาใช้ การใช้ความแม่นยำระดับสอง (Double precision) และขนาดของ Bandwidth ที่เล็ก จะสามารถช่วยลดความ

คลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ การเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีมาตรฐานระดับสูง ความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนจากการเลือกใช้ชนิดและขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหานั้นๆ สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาตรฐานทั่วไป ข้อมูลที่จะต้องให้กับคอมพิวเตอร์คือ ตำแหน่งหรือพิกัดของจุดต่อต่างๆของเอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ สมบัติเชิงกลของวัสดุของแต่ละเอลิเมนต์ ลักษณะของโหนดที่กระทำ ลักษณะของเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับ และต้องระบุชนิดของการวิเคราะห์ด้วย เช่น ความเค้นระนาบหรือความเคียวระนาบเป็นต้น เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูลเหล่านั้นในการคำนวณสิ่งต่างๆที่ต้องการ

## 2.7 มาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1994 มาตรฐาน BS EN 124 [15] “ Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas – Design requirements, type testing, marking, quality control ” มีเนื้อหาเกี่ยวกับการแบ่งชนิด ชั้นคุณภาพของฝาปิดท่อระบายน้ำ วัสดุที่ใช้ในการผลิต สมบัติเชิงกล การทดสอบสมบัติต่างๆ การทำสัญลักษณ์ และการควบคุมคุณภาพของการผลิต เพื่อให้เป็นไปตามหลักสากลของผู้ผลิต (รายละเอียดดู ภาคผนวก ก)

ปี 1995 Maheri M.R. and Adams R.D. [16] ได้ศึกษาโดยเลือกใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายสมบัติ Damping ของวัสดุ ในการทดลองนี้ใช้วัสดุคอมโพสิตที่ต่างกัน 4 ชนิด ดังนี้ HMS/DX-210 Glass/DX-210 CF/PEEK และ 913C/TS โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ผลเทียบกับการทดสอบจริง พบว่าค่าความถี่ และ Damping ระหว่างการทดสอบเพราะการคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก สรุปได้ว่าสามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานทฤษฎีแผ่นลามิเนตคอมโพสิต ในการทำนายสมบัติคอมโพสิตได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง

ปี 2001 FACTA “ Fabricated access covers trade association ” – Specification for fabricated access covers [17] ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการกำหนดนิยามคำจำกัดความ ชั้นคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการผลิต และสมบัติของฝาท่อระบายน้ำ มาตรฐานฉบับนี้จะรวมถึงวัสดุที่เป็นโลหะด้วย รายละเอียดคล้ายคลึงกับมาตรฐาน BS EN 124

ปี 2001 Duffy L. [18] ได้ทำการออกแบบฝาปิดท่อระบายน้ำโดยใช้วัสดุคอมโพสิต ที่มีเรซินโบรมิเนตเต็ดไวนิลเอสเทอร์ (Brominated vinyl ester resin) เป็นเมทริกซ์ เพราะมีสมบัติทนต่อการติดไฟและต้านทานการกัดกร่อนได้ดี และใช้เส้นใยเสริมแรงประเภท โยแก้วชนิดทอเป็นผืน (Woven roving) เกลฟาร์ และ เส้นใยคาร์บอน ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ อาร์ทีเอ็ม (RTM ; Resin transfer molding) จากการออกแบบเป็นไปตามมาตรฐาน EN 124 ขึ้นงานอยู่ในชั้นคุณภาพ (class)

C-250 สามารถรับแรงกดได้ 25 ตัน นอกจากนั้นยังมีการทดสอบการต้านทานการตีไฟ การทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อม การหาค่าความแข็ง การทดสอบการตัด และการต้านทานที่ผิว

ปี 2003 Tita V., De Carvalho J. and Lirani J. [19] ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมไดนามิกของคานที่ทำจากคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ด้วยวิธี Hand lay up คอยแบ่งการจัดเรียงเส้นใยออกเป็นสองแบบคือ  $[(\pm 45)_2/0/90]_s$  และ  $[(0/90)_2]_s$  หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปตัดทดสอบขนาด 40 x 2.5 ซม.หนา 1.6 มม. ในการทดสอบจะแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนที่หนึ่งเป็นการนำโมเดลไปวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และส่วนที่สองจะเป็นการนำชิ้นงานไปทดสอบการกระแทก (Impact) แล้วนำผลที่ได้มาเทียบกัน พบว่าค่าทั้งสองใกล้เคียงกัน แต่การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าที่ละเอียดกว่า การเรียงใยทั้งสองทิศทางจะให้ผลที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาผลจากแรงบิด การวางเส้นใยแบบที่หนึ่งจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า แต่ถ้าพิจารณาผลของแรงตัด การวางใยแบบที่สองจะแข็งแรงกว่า

ปี 2003 Zako M., Uetsuji. Y and Kurashiki T. [20] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายของวัสดุคอมโพสิตโดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ และใช้การทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองจะใช้ E-glass woven roving และเรซินไวนิลเอสเทอร์ เตรียมเป็นชิ้นงานแล้วนำไปทดสอบแรงดึง (Tensile test) ขณะที่ทำการดึงโดยติดตั้งชุด Charged Coupled Device (CCD) เพื่อศึกษาถึงกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้น พบว่าการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง

ปี 2003 Ashby M.F. และ Brechet Y.J.M. [21] ได้ศึกษาทางทฤษฎีด้านการออกแบบวัสดุประกอบโดยการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน การคาดเดาถึงสมบัติที่ได้ของวัสดุประกอบ สมการในการคำนวณหาความหนาแน่น มอดุลัส ของวัสดุประกอบ การออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือโครงสร้างที่รับแรงมากๆ โดยผลการทดสอบนำมาประยุกต์ใช้เป็นสมการในการหาค่าสมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต

ปี 2004 Galib H. Abumeri and Latife H. Kugnoglu [22] ได้ทำการศึกษาและออกแบบใบพัดสำหรับเครื่องบิน โดยประกอบด้วยใบพัดเดี่ยว 28 ใบ ใช้งานที่ความดัน 1.5 เท่า ออกแบบโดยใช้วัสดุคอมโพสิต มีน้ำหนักประมาณ 5.6 กิโลกรัม ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที การออกแบบอาศัยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการออกแบบ ในการวิเคราะห์แบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 40 เอลิเมนต์ 55 จุดต่อเชื่อม เลือกใช้กราฟต์-อีพอกซีเรซิน มีค่า  $V_f$  เท่ากับ 0.55 จัดเรียงใยแบบ [30/-30/0/0/30/0] ผลวิเคราะห์ด้วย Exo-Skeletal Engine (ESE) ทำให้ทราบว่า การออกแบบมีประสิทธิภาพ ทนต่อการตัดโค้ง ได้ดีเยี่ยม การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบถึงจุดเริ่มเสียหายที่ 4870 รอบต่อนาที และชาร์คที่ 7639 รอบต่อนาที

ปี 2004 Rastogi N. [23] ได้ทำการออกแบบเพลลาขับด้วยวัสดุคอมโพสิตในงานยานยนต์ ในการออกแบบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ออกแบบเพลลาขับ และออกแบบการยึดติดด้วยกาว พบว่าใน

การออกแบบเพลาคับจะใช้ คาร์บอน-อีพอกซีเรซิน คอมโพสิต ใช้โปรแกรมMS-Excel macro ในการคำนวณหาการจัดเรียงเส้นใยดังนี้  $[\pm 60/(\pm 30)_2/0]_s$  หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SDRC – IDEAS ทำให้ทราบว่า การจัดเรียงตัวที่ดีดังนี้ 1)  $[90/(\pm 25)_2/0]$  2)  $[\pm 65/\pm 25/0_2]$  และ 3)  $[\pm 60/\pm 30/0_2]$  ส่วนในด้านการออกแบบการยึดติดด้วยกาวจะใช้ อะลูมิเนียมเชื่อมติดกับเพลาคอมโพสิตด้วยกาว หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SDRC – IDEAS เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงเฉือน (Shear strength) และ ค่าแรงดึงลอก (Peel strength) ผลพบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

ปี 2006 Sancho J. และ Miravete A. [24] ได้ทำการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น (Interlaminar normal stresses,  $\sigma_z$ ) และความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น (Interlaminar shear stress,  $\tau_{xz}$ ;  $\tau_{zy}$ ) ของวัสดุคอมโพสิตโดยการใช้ทฤษฎีการอัดชั้นแบบฉบับ (Classical Lamination theory; CLT) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3-Dimension analysis) ของทั้งสามชนิด พบว่าค่าของ  $\sigma_z$  และ  $\tau_{xz}$  จะมีค่าไม่เท่ากัน เป็นเพราะว่าการกำหนดขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน ซึ่งโปรแกรม MARC จะสามารถแบ่งเอลิเมนต์ได้ละเอียดกว่า ANSYS แต่จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า และใช้เวลาในการคำนวณนานกว่า ดังนั้นในการออกแบบวัสดุคอมโพสิตจะต้องใช้มากกว่าหนึ่งโปรแกรม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น และหาสภาวะที่ดีที่สุด

ปี 2006 Kalyanasundaram S. , Lowe A. และ Watters A.J. [25] ได้ทำการออกแบบตัดแปลงวงล้อของเก้าอี้ล้อเข็น (Wheelchair) สำหรับใช้ในการแข่งขัน Paralympics โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หารูปร่างและผลอันเนื่องจากการกระทำของแรงต่างๆ พบว่าแบบที่ดีที่สุดคือการออกแบบตัดแปลงให้ขอบคันล้อ (pushrim) มีขนาดบางและยึดติดเข้ากับซี่ล้อและคัมล้อ และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์สามารถบอกให้ทราบถึง ทิศทางการจัดเรียงของซี่ล้อ เส้นใยคาร์บอน และ จำนวนชั้นของเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจาก ต้นแบบดังกล่าวสามารถลดน้ำหนักลงถึง 49% ลดโมเมนต์การหมุนถึง 41% และ ลดพื้นที่หน้าตัดลงถึง 95% เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม นอกจากนั้นยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับขอบล้อถึง 27% และ บริเวณขอบคันล้อ 55%

### บทที่ 3

## การดำเนินการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและผลิตฝาที่ระบายน้ำจากวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ฝาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,000 มิลลิเมตร และสามารถรับแรงกดสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 25,000 กิโลกรัมหรือ 250 กิโลนิวตัน เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 124 – Class C-250 โดยแบ่งการทดลองออกเป็นหกขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกจะเป็นการศึกษามาตรฐาน BS EN 124 ว่าด้วยข้อกำหนดของสมบัติของฝาปิดที่ระบายน้ำ ขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเพื่อเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนที่สามเป็นการสร้างโมเดลและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม I-DEAS 11 NX เพื่อหาโมเดลที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน ขั้นตอนี่สี่เป็นการขึ้นรูปชิ้นงานตามโมเดลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนที่ยี่ห้าเป็นการทดสอบสมบัติในการรับแรงของชิ้นงานให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin); DER 331 เกรดทั่วไป มีค่า EEW เท่ากับ 190 ของบริษัท DOW CHEMICAL CO., LTD. มีคุณสมบัติดังนี้

Viscosity @ 25 °C	=	11,000 – 14,000 cps
Specific Heat @ 25 °C	=	0.5
Specific Gravity @ 25 °C	=	1.16 g/cm <sup>3</sup>
Flash Point	=	251 °C

3.1.2 ไซโคลอะลิฟาติกเอมีน (Cycloaliphatic amine); H-3895 ของบริษัท NANYAN CHEMICAL CO., LTD. มีคุณสมบัติดังนี้

Viscosity @ 25 °C	=	400 cps
Specific Gravity @ 25 °C	=	1.03 g/cm <sup>3</sup>
Amine value (mgKOH/g)	=	280

3.1.3 เส้นใยแก้วขนาดเส้นสั้นชนิดผืน (Chopped stand mat; CSM) ชนิด E-glass เบอร์ 450 ของบริษัท JUSHI GROUP CO., LTD. มีคุณสมบัติดังนี้

Alkali Content	=	< 0.8 %
Moisture Content	=	≤ 0.3 %
Length of Chop	=	50 mm
Binder Content	=	3-5 %
Type of binder	=	Polyester Powder
Sizing	=	Silane
Unit Weight	=	450 g/m <sup>2</sup>

3.1.4 เส้นใยแก้วทอชนิดผืน (Woven roving; WR) ชนิด E-glass เบอร์ 600 ของบริษัท JUSHI GROUP CO., LTD. มีคุณสมบัติดังนี้

Alkali Content	=	< 0.8 %
Sizing	=	Silane
Thickness	=	0.6 mm
Density (ends/10 cm)	=	Wrap 31 ± 3; Weft 30 ± 3 Tex
Roving	=	Wrap 990; Weft 990 Tex
Breaking Strength	=	Wrap 2700; Weft 2500 N
Filament Diameter	=	13 μm
Weight	=	540 ± 60 g/m <sup>2</sup>

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 อุปกรณ์ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.1.1 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (LLOYD 30 KN)

- Tensile properties
- Compressive properties
- Flexural properties

3.2.1.2 เครื่องมือวัด

- เวอร์เนีย ; Mitutoyo ขนาด 150 มิลลิเมตร
- ไมโครมิเตอร์ ; Mitutoyo ขนาด 25 มิลลิเมตร
- ไดออร์เกจ ; Mitutoyo ขนาด 30 มิลลิเมตร
- คัลิปเปอร์

### 3.2.1.3 อุปกรณ์ ตัดชิ้นงาน

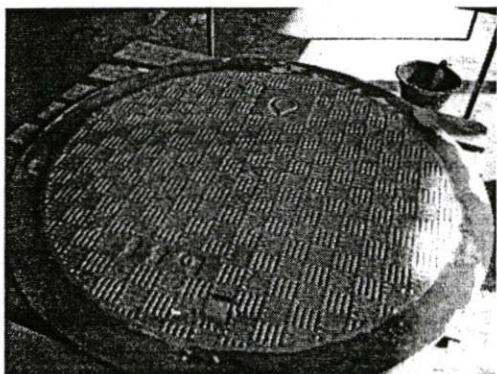
## 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับออกแบบโมเดลและวิเคราะห์

3.2.2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ HDD 40 GB และ RAM 1 GB

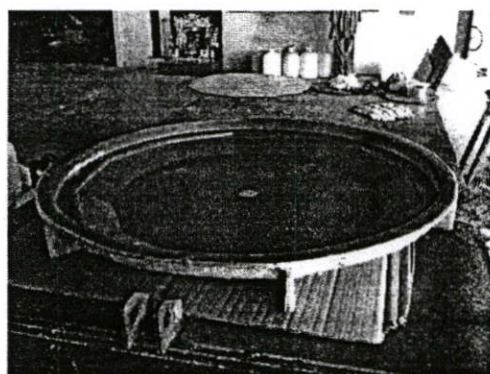
3.2.2.2 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ NX™ I-DEAS® ของบริษัท UGS

## 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.3.1 แม่แบบ (Mold) ไฟเบอร์กลาส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 มิลลิเมตร ดังรูป 3.1



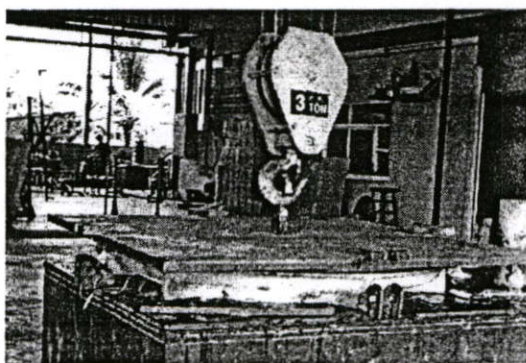
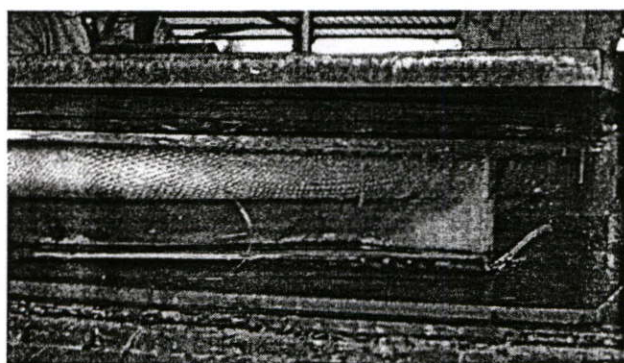
รูป 3.1(ก)



รูปที่ 3.1 (ข)

รูปที่ 3.1 แม่แบบไฟเบอร์กลาสสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน (ก) ฝาปิดแม่แบบตัวผู้ (ข) ฝาปิดแม่แบบตัวเมีย

3.2.3.2 แผ่นเหล็กหนา 1 ½ นิ้ว สำหรับกดอัดแม่แบบขึ้นงาน พร้อมเพลากลึงสำหรับขันแรงให้แผ่นเหล็กบีบเข้าหากัน ขนาด 1 นิ้วดังรูปที่ 3.2



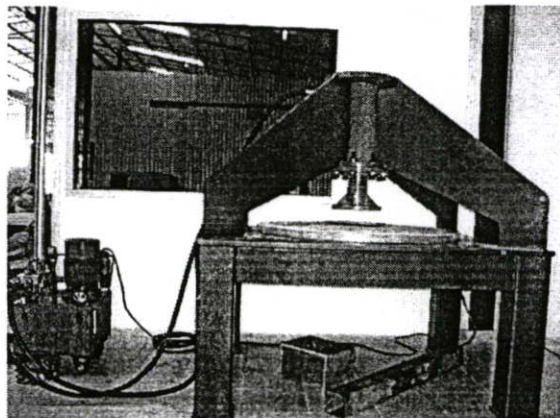
รูปที่ 3.2 ชุดกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.3.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ขนาด 1,000 กิโลกรัม

3.2.3.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับ Hand-lay up

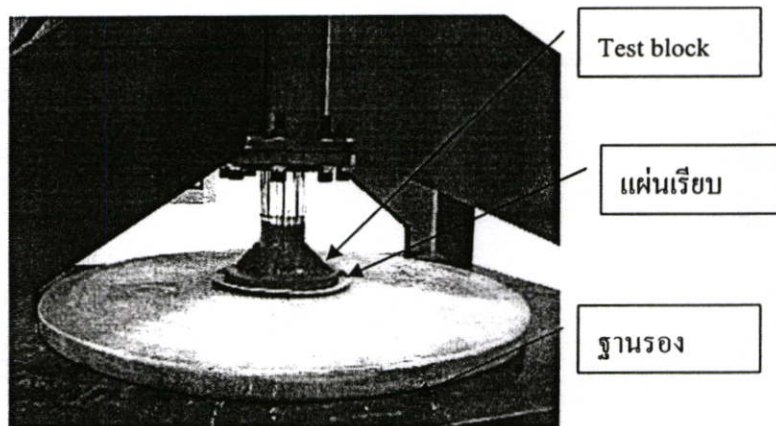
### 3.2.4 อุปกรณ์ทดสอบผลิตภัณฑ์

3.2.4.1 เครื่องกดไฮดรอลิก (Hydraulic test press) ขนาด 30 ตัน ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องกดไฮดรอลิก

3.2.4.2 ชุดหัวกดทดสอบ (Test block) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หัวกดชิ้นงานทดสอบ

3.2.4.3 แผ่นไม้หรือแผ่นเรียบเส้นใยกลาส สำหรับวางรองหัวกด

3.2.4.4 ฐานรองชิ้นงาน

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การศึกษา มาตรฐาน และ ข้อกำหนด ตามมาตรฐาน BS EN 124 ดังนี้

- ระยะเวลาต่างๆ ขนาด รูปร่าง
- ชั้นคุณภาพ ชนิดของผลิตภัณฑ์
- ชนิดของวัสดุที่เลือกใช้
- การรับแรงสูงสุด ของผลิตภัณฑ์
- วิธีการทดสอบ และ อุปกรณ์การทดสอบ

#### 3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาตรของเส้นใยที่ใช้ โดยจะทำการควบคุมความหนาของชิ้นงาน จากการควบคุมดังกล่าวจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร ( $V_f$ ) ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร โดยการกำหนดจำนวนชั้นของชนิดเส้นใยแก้ว

ขั้นตอนนี้จะเลือกใช้เส้นใยแก้ว 2 ชนิดคือ เส้นใยแก้วชนิดCSMเบอร์ 450 และ เส้นใยแก้ว WR เบอร์ 600 โดยจะกำหนดให้มีจำนวนชั้นเท่ากับ 6, 7 และ 8 ชั้น โดยควบคุมความหนาเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร จากปัจจัยที่กำหนดสามารถหาค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรจากสมการที่ (3.1)

$$V_f = \frac{m}{\rho_f \cdot t} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$V_f$	คือ สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร
	$m$	คือ น้ำหนักเส้นใยที่ใช้ทั้งหมด มีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเมตร
	$\rho_f$	คือ ความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว มีค่าประมาณ 2.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	$t$	คือ ความหนาของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

จากสมการสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปรูปชนิดของเส้นใย และ สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร เมื่อมีการปรับเปลี่ยนน้ำหนักเส้นใยที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง	ชนิดของเส้นใย	น้ำหนักเส้นใย (กรัม/ตร.ม.)	จำนวนชั้น เส้นใย	ความหนา ชั้นงาน (มิลลิเมตร)	สัดส่วนเส้นใย โดยปริมาตร
1	CSM	450	6	3.1	0.34
2			7	3.1	0.40
3			8	3.1	0.45
4	WR	600	6	3.1	0.45
5			7	3.1	0.53
6			8	3.1	0.60

### ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

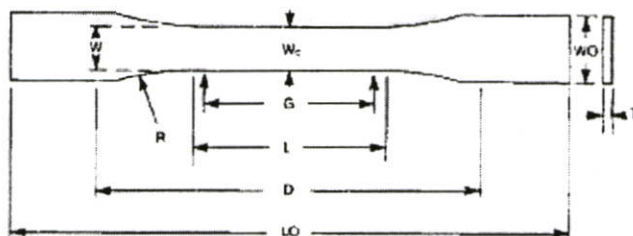
การเตรียมชิ้นงานจะใช้หลักการขึ้นรูปแบบอัดเย็น ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เตรียมแม่แบบให้สะอาด ลงแว็คหรือน้ำยาถอดแบบ
2. ผสมอีพอกซีเรซิน : ไซโคอะลิฟาติกเอมีน (H-3895) ในอัตราส่วน 100 : 50 กวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ทาน้ำยาเรซินลงบนแม่แบบให้ทั่ว
4. วางเส้นใยแก้วลงบนแม่แบบ และทาเรซินให้ชุ่ม พร้อมทั้งรีดไล่ฟองอากาศ จนครบจำนวนชั้นที่กำหนด
5. นำแม่แบบบนมากดทับจนได้ความหนาเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร
6. ตั้งทิ้งไว้จนชิ้นงานเซตตัวประมาณ 2-3 ชั่วโมง
7. ถอดแบบชิ้นงานและนำไปทำการ Post cure ที่สภาวะแวดล้อมเป็นระยะเวลา 7 วัน
8. นำชิ้นงานไปเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบชิ้นงาน

#### 1. การทดสอบการต้านแรงดึง (Tensile test)

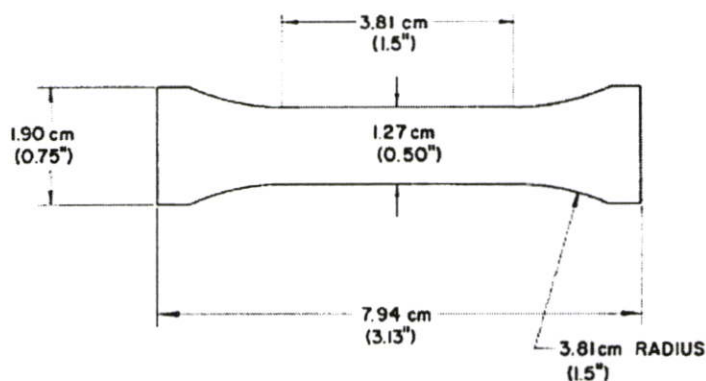
การทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638 ซึ่งจะตัดชิ้นงานทดสอบแบบชนิดที่หนึ่ง (Type I) ดังรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ด้วยอัตราเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อ นาที นำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Tensile strength , Tensile modulus , Tensile strain



รูปที่ 3.5 รูปร่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (Tensile test) แบบชนิดที่ 1

## 2. การทดสอบการต้านแรงกด (Compressive test)

การทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 695 ขนาดของชิ้นงานทดสอบจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่เตรียมได้ ดังนั้นชิ้นงานทดสอบของแต่ละตัวอย่างอาจจะไม่เท่ากัน แต่ต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด เช่น ถ้าชิ้นงานหนาน้อยกว่า 3 มิลลิเมตรให้เตรียมดังรูปที่ 3.6 ถ้าหนามากกว่านั้นให้ใช้สูตรคำนวณหาความยาวของชิ้นงาน นำชิ้นงานไปติดตั้งในชุดทดสอบ ตั้งค่าอัตราเร็วในการกด เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที นำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Compressive Strength, Compressive modulus



รูปที่ 3.6 รูปร่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงกด (Compressive test)

## 3. การทดสอบการต้านการคดงอ (Three point bending test)

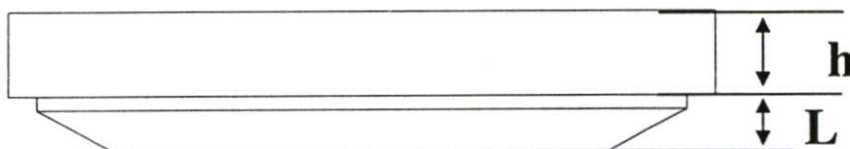
การทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 970 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน โดยมีขนาดความกว้างเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และระยะของฐานรอง (Span length) ของชิ้นงานจะมีสัดส่วนระหว่างระยะของฐานรอง ต่อความหนา (Span to depth ratio) เท่ากับ 40 : 1 แต่ถ้าต้องการศึกษาค่าโมดูลัส ต้องใช้เท่ากับ 60 : 1 เพื่อกำจัดผลอันเนื่องมาจากแรงเฉือน ดังนั้นชิ้นงานทดสอบจะมีขนาด 25 x 200 มิลลิเมตร และระยะของฐานรอง เท่ากับ 180 มิลลิเมตร เมื่อเตรียมชิ้นงานได้แล้วนำไปทดสอบด้วยการกดแบบ Three point bending อัตราเร็ว

17.50 มิลลิเมตรต่อนาที นำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Flexural strength , Flexural modulus

หลังจากนั้น เลือกค่า  $V_f$  ของชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าทดสอบเฉลี่ยสูงสุด ของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดสำหรับเป็นข้อมูลของชั้นลามิनाในการออกแบบการจัดวางเส้นใยสำหรับวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี และใช้ค่าที่นอกเหนือจากการทดสอบโดยเลือกใช้ค่าจากหนังสืออ้างอิง หรือ ผลการทดสอบ

### 3.3.3 การสร้างโมเดลชิ้นงานและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างโมเดลจำลองด้วยโปรแกรม I-DEAS 11 NX เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์จะทำการจำลองโมเดลที่มีรูปร่าง รายละเอียดเหมือนฝาชนิดที่เป็นเหล็กแต่จะแตกต่างที่บริเวณขอบรองจะเรียบ และ โมเดลที่จำลองขึ้นจะทำการศึกษาความหนา  $L$  ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.7 และรายละเอียดในตารางที่ 3.2 ทำการควบคุมสัดส่วนของเส้นใยระหว่าง WR กับ CSM เป็น 80 : 20 โดยความหนาของฝาปิดที่ระบายน้ำ เพราะว่าถ้าเลือกใช้เส้นใยแก้วชนิด WR เพียงชนิดเดียวอาจจะทำให้การยึดเกาะระหว่างชั้นไม่ดี ชิ้นงานอาจจะเกิดการแยกชั้นของเส้นใยได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการเรียงสลับชั้นระหว่างเส้นใยแก้วชนิด CSM กับเส้นใยแก้วชนิด WR นำโมเดลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาระยะการยุบตัว (Displacement)หรือการกระจัด ที่เกิดขึ้น และนำหนักของชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 ภาพด้านข้างแสดงความหนาของ โมเดล

ตารางที่ 3.2 การปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

ตัวอย่างที่	ความหนา (h) ; mm	ความหนา (L) ; mm
FEM# 1	20	50
FEM# 2	30	50
FEM# 3	40	50
FEM# 4	50	50
FEM# 5	60	50

#### ขั้นตอนการใช้โปรแกรม I-DEAS 11 NX

เป็นขั้นตอนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ I DEAS 11 NX ในการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการสมมุติสภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 124 วิธีการใช้โปรแกรมดังกล่าวจะ

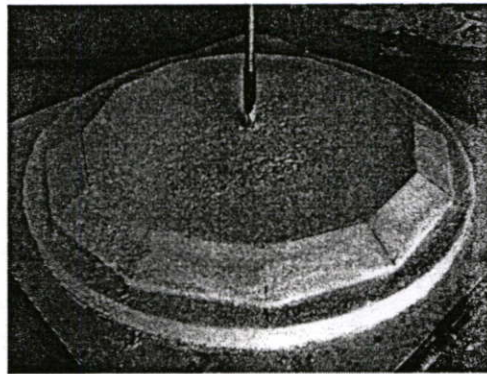
หลังจากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ ดังนี้

1. ชิ้นงานรับแรงกด 250 กิโลนิวตันแล้วชิ้นงานเสียหายหรือไม่
2. เมื่อรับแรงกด 250 กิโลนิวตัน ชิ้นงานขยับตัวเท่าไร
3. น้ำหนักของชิ้นงานเป็นเท่าไร
4. เลือกโมเดลที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการเป็นแบบในการสร้างชิ้นงานต้นแบบสำหรับทดสอบคุณสมบัติในการรับแรงกด

#### 3.3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

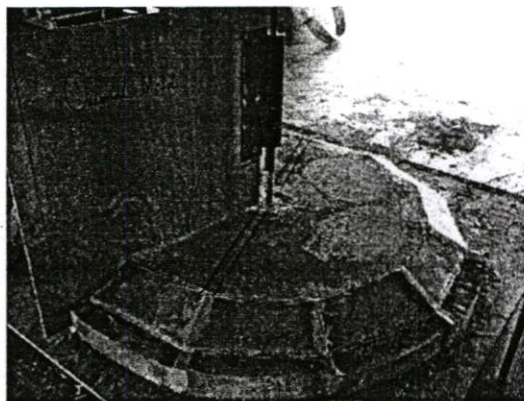
โมเดลที่เลือกจากขั้นตอน 3.3.3 จะถูกนำมาเป็นต้นแบบในการสร้างแม่แบบไฟเบอร์กลาส การขึ้นรูปแม่แบบไฟเบอร์กลาสจะมีวิธีการคร่าวๆ ดังนี้

1. สร้างต้นแบบ (Prototype) ที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนกับชิ้นงานที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้โพลียูรีเทนโฟมสำหรับสร้างต้นแบบ เพราะประหยัดเวลา ง่ายต่อการขึ้นรูปและปรับแต่งทรงรูปร่าง ดังรูปที่ 3.8



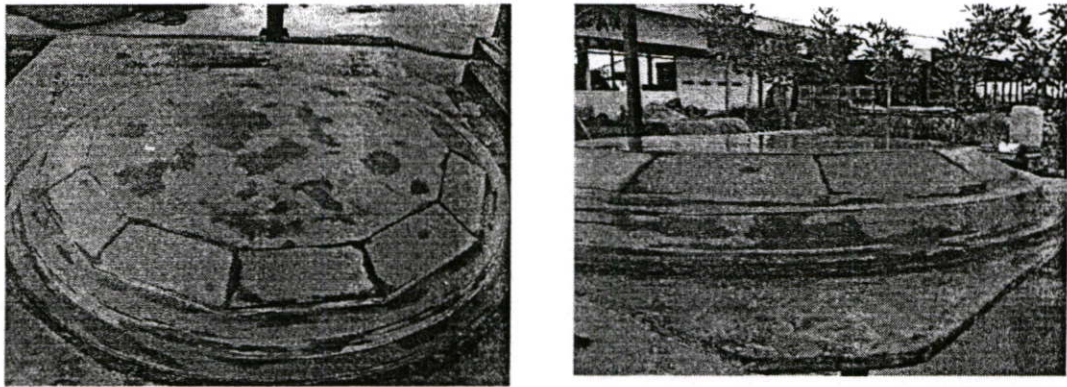
รูปที่ 3.8 ดันแบบที่ขึ้นรูปด้วยพอลิยูรีเทนโฟม

2. เลย์ปิดผิวโพนด้วยเรซินกับเส้นใยแก้ว CSM 2 ชั้น เพื่อยึดโพนให้เกาะกันและง่ายต่อการเก็บผิวละเอียด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ดันแบบที่เลย์ปิดด้วยเส้นใยแก้วและเรซิน

3. ใ้เปิดตัวตกแต่งผิวดันแบบให้มีขนาดเท่ากับโมเดล ในขั้นตอนนี้จะต้องทำการขัด ตกแต่งด้วยกระดาษทรายโดยไล่จากเบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด (80 ไปจนถึง 1200) เพื่อผิวดันแบบจะเรียบมัน เมื่อนำไปถอดแม่แบบจะถอดได้ง่ายและแม่แบบจะมีผิวที่เรียบสวยงาม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ดันแบบขัด ตกแต่ง พร้อมถ่ายทำแม่แบบไฟเบอร์กลาส

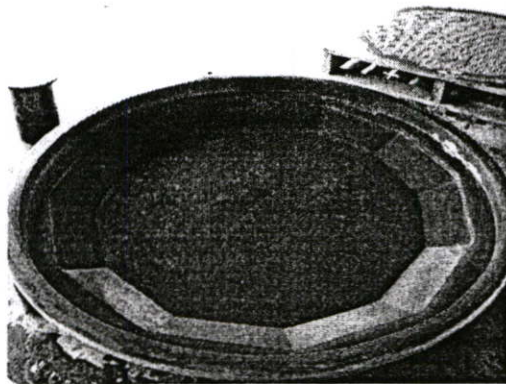
4. ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเสยถ่ายแม่แบบจากดันแบบที่ได้ โดยปกติจะใช้ออร์โทโทลีสเตอร์เรซินเป็นเมทริกซ์เพราะมีราคาถูก และมีความเหมาะสมในการขึ้นรูปแม่แบบขึ้นงาน ขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยดังนี้

4.1 ทาเจลโค้ทที่ผิวดันแบบหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ตั้งทิ้งไว้จนแห้ง

4.2 ผสมน้ำยาออร์โทเรซิน กับตัวเร่ง ทาลงบนดันแบบให้ชุ่ม หลังจากนั้นวางเส้นใยแก้วลงบนดันแบบ ทาน้ำยาเรซินให้ทั่วและชุ่ม พร้อมกับใช้ลูกกลิ้งไล่ฟองอากาศออก วางเส้นใยและทาเรซินจนครบ 20 ชั้น หรือความหนาประมาณ 15 มิลลิเมตร การทำแม่แบบให้หนาเพื่อป้องกันแม่แบบแตกหรือชำรุดระหว่างการนำไปใช้งาน

4.3 ตั้งทิ้งไว้จนเรซินเซตตัว จึงถอดแม่แบบออก และตัด ตกแต่ง ให้เรียบร้อย ดังรูป

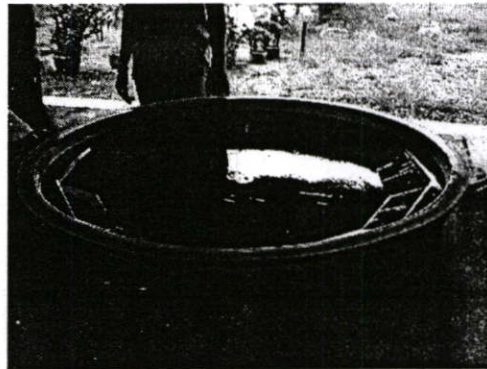
3.11



รูปที่ 3.11 แม่แบบไฟเบอร์กลาส

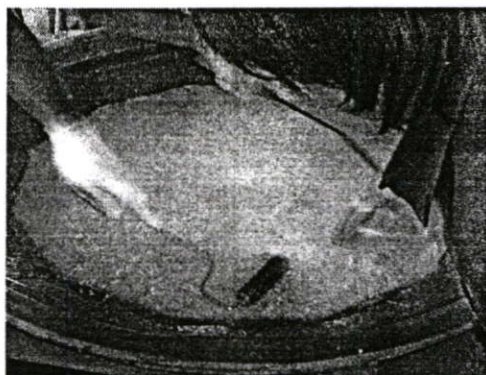
หลังจากที่ได้แม่แบบไฟเบอร์กลาสแล้ว กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะใช้หลักการขึ้นรูปแบบ การอัดเย็น (Cold Press Molding) เพราะเป็นกระบวนการที่ควบคุมสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรได้ดี และไม่ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบในข้อ 3.3.2 คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งยังสะดวกสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จำนวนน้อยๆ มีวิธีการโดยย่อ ดังนี้

1. ทำความสะอาดแม่แบบตัวผู้ และ ตัวเมีย ให้สะอาด
2. ลงแว็ครอให้แห้งและขัดมันผิวแม่แบบไฟเบอร์กลาสให้เรียบร้อย
3. ลงน้ำยาถอดแบบ หรือ ฟิล์ม น้ำ PVA เพื่อให้ง่ายต่อการถอดชิ้นงาน รอให้แห้ง
4. ทา หรือ พ่นเจล โค้ตลงในแบบที่ต้องการ ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ดังรูปที่ 3.12



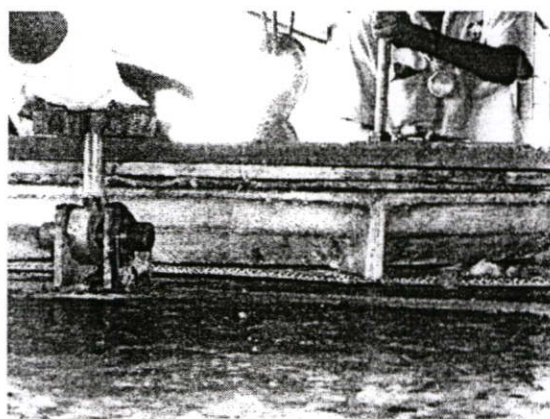
รูปที่ 3.12 แม่แบบไฟเบอร์กลาสที่ทาเจลโค้ต

5. ทาอีพอกซีเรซินที่ผสมกับ H-3895 ในอัตราส่วน 100 : 50 โดยน้ำหนัก ให้ชุ่มและวางเส้นใยแก้วลงในแม่แบบตัวเมีย ลักษณะการวางเส้นใยจะวางตามรูปแบบที่ได้จากการเรียงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ตามโมเดล FEM # 3 จะมีลักษณะเป็นแบบสมมาตร ดังนี้  $[CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_2]_s$  ทาน้ำยาเรซินให้ชุ่ม พร้อมทั้ง ริดไล่ฟองอากาศ ดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 การรีดไล่ฟองอากาศชิ้นงาน

6. กดทับด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ และแผ่นเหล็กหนา ชั้นนี้กดบีบให้แม่แบบบนประกบกับแม่แบบล่างจนสนิท เพื่อเป็นการควบคุมความหนาชิ้นงานและกำจัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร ค้างไว้จนชิ้นงานเซตตัว ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การกดอัดชิ้นงานโดยใช้แผ่นเหล็ก

7. ถอดแม่พิมพ์ และชิ้นงาน ตกแต่งชิ้นงาน หลังจากนั้นนำไปวางตากแดดเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน เพื่อทำการ Post cure ให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและชิ้นงานเซตตัวสมบูรณ์

### 3.3.5 ขั้นตอนการทดสอบผลิตภัณฑ์

การทดสอบผลิตภัณฑ์เป็นไปตามข้อที่ 8 ของมาตรฐาน BS EN 124 [15] ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอน จากขอบเขตงานวิจัยผลิตภัณฑ์ต้องสามารถรับแรงกดสูงได้ 25,000 กิโลกรัม หรือ 250 กิโลนิวตัน

3.3.5.1 การทดสอบความสามารถในการคงสภาพที่โหลดกระทำ  $2/3$  เท่าของโหลดทดสอบ หรือ 166.67 กิโลนิวตัน ตามหัวข้อที่ 8.3.1 ของมาตรฐาน BS EN 124

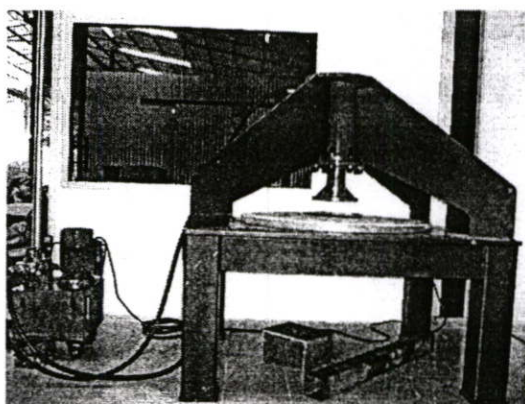
มีวิธีการทดสอบดังนี้

3.3.5.1.1 ติดตั้งชิ้นงานทดสอบในเครื่องกด (ดังรูป 3.15) และทำเส้นอ้างอิงที่ระดับกึ่งกลางชิ้นงาน

3.3.5.1.2 เริ่มกดโหลดทดสอบด้วยอัตราเร็วในช่วง 1 – 5 กิโลนิวตันต่อนาที จนกระทั่งโหลดมีค่าเท่ากับ 166.67 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นคลายโหลดออก ทำซ้ำจนครบห้าครั้ง

3.3.5.1.3 ทำการวัดระยะที่เปลี่ยนแปลงไปจากจุดอ้างอิง

3.3.5.1.4 นำค่าที่ได้ไปเทียบกับค่ามาตรฐาน คือ ต้องไม่เกิน 9.2 มิลลิเมตร จากตารางที่ 8 ของมาตรฐาน BS EN 124 [15]



รูปที่ 3.15 การติดตั้งชิ้นงานในเครื่องกด

3.3.5.2 การทดสอบความสามารถในการรับแรงกดสูงสุด ตามหัวข้อที่ 8.3.2 ของมาตรฐาน BS EN 124

มีวิธีการทดสอบดังนี้

3.3.5.2.1 นำชิ้นงานเดิมจาก 3.3.5.1 มาทดสอบความสามารถในการรับแรงกดสูงสุด โดยทำการกดด้วยอัตราเร็วในช่วง 1 – 5 กิโลนิวตันต่อนาที จนโหลดทดสอบมีค่าเท่ากับ 250 กิโลนิวตัน

3.3.5.2.2 ค้างโหลดทดสอบไว้อย่างน้อย 30 วินาที หลังจากนั้นทำการวัดระยะการยุบตัวของชิ้นงาน บันทึกระยะยุบตัวสูงสุด

3.3.5.2.3 คลายโหลดทดสอบ ตรวจสอบชิ้นงานว่าเกิดการชำรุด เสียหาย หรือไม่ ทำการบันทึกผล

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 รายละเอียดของฝาปิดท่อระบายน้ำคอมโพสิต ตามมาตรฐาน BS EN 124 [15]

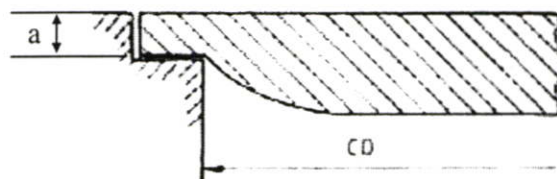
จากมาตรฐาน “Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas – Design requirement and type testing, marking, quality control. สามารถสรุปลักษณะและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ทำการออกแบบให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ฝาปิดท่อระบายน้ำจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C 250 หรือ กลุ่มที่ 3 ตามมาตรฐาน ใช้ติดตั้งบริเวณขอบทางเท้า หรือ ไหล่ทาง ขอบทางของถนน

4.1.2 วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตและขึ้นรูป คือ อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดที่เป็น CSM เบอร์ 450 และ เส้นใยแก้วชนิด WR เบอร์ 600 ในสัดส่วน 20:80 โดยความหนา

4.1.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝาท่อระบายน้ำเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร

4.1.4 ระยะฝาเปิด (Clear Opening; CO) เท่ากับ 920 มิลลิเมตร ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงระยะฝาเปิด (Clear Opening)

4.1.5 ความลึกของฐานรอง (a) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร

4.1.6 สามารถรับแรงกดสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 250 กิโลนิวตัน และระยะขยุบตัวที่โหลดกระทำ 2/3 เท่าของ 250 กิโลนิวตัน หรือ 166.67 กิโลนิวตันมีค่าไม่เกิน 9.2 มิลลิเมตร จากตารางที่ 8 ของมาตรฐาน BS EN 124

#### 4.2 ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุตั้งต้น

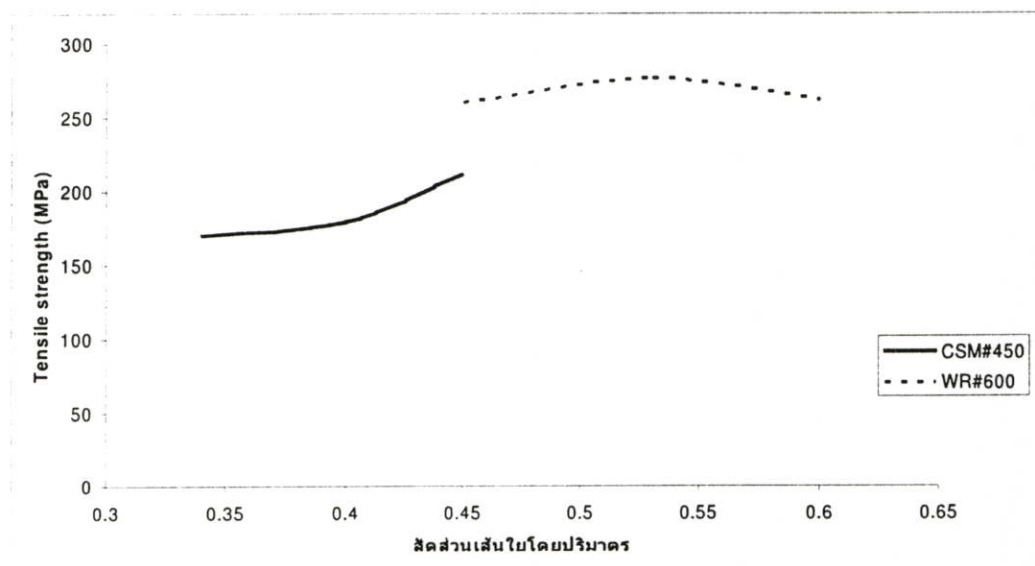
สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ชนิดของเรซิน ค่ะตะลิสที่ใช้ ชนิดของเส้นใย ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย ( $V_f$ ) และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย เป็นต้น

ในงานวิจัยได้เลือกใช้ฮีพอกซีเรซินที่ทำการเชื่อมโยงพันธะด้วยไซโคอะลิฟาติกเอมีน และ เส้นใย แก้วชนิด CSM กับชนิด WR โดยมีการปรับค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรตั้งแต่ 0.34 – 0.45 ของ เส้นใยแก้วชนิด CSM เบอร์ 450 และ 0.45 – 0.60 ของเส้นใยแก้วชนิด WR เบอร์ 600 เพื่อศึกษา สมบัติเชิงกลทางด้านต่างๆ

#### 4.2.1 ค่าการต้านแรงดึง (Tensile properties) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่า Tensile Properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ

ชนิดเส้นใย	สัดส่วนเส้นใย โดยปริมาตร ( $V_f$ )	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
CSM # 450	0.34	170.83 ± 6.01	8.80 ± 0.752	2,152.54 ± 89.94
	0.40	179.84 ± 4.28	9.03 ± 0.163	2,253.80 ± 50.78
	0.45	211.96 ± 13.93	10.43 ± 0.207	2,439.33 ± 174.24
WR # 600	0.45	260.50 ± 21.62	9.27 ± 1.063	3,402.23 ± 161.91
	0.53	277.10 ± 15.10	11.02 ± 0.724	3,132.33 ± 147.22
	0.60	261.68 ± 10.63	11.36 ± 0.836	2,678.97 ± 369.66

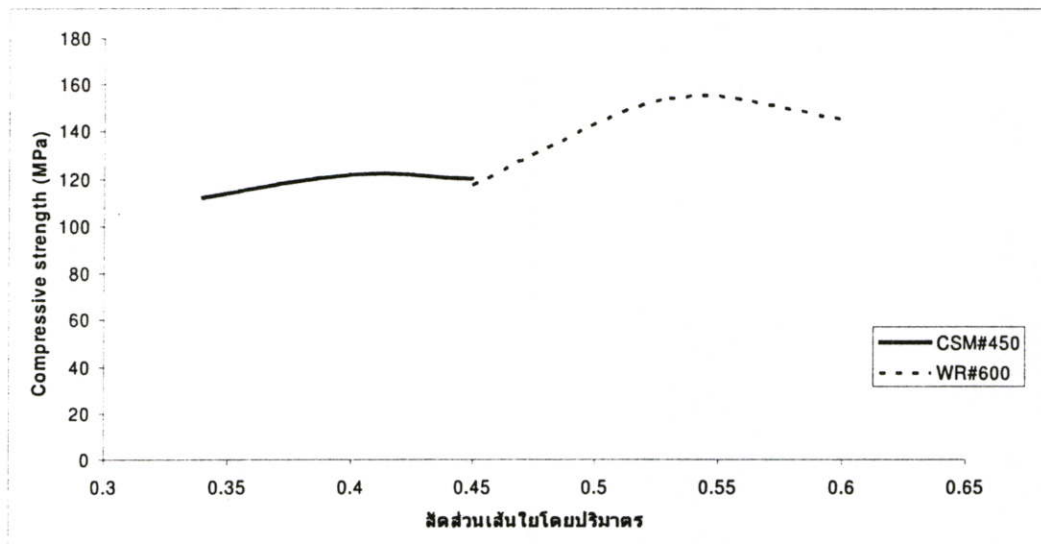


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านแรงดึงกับค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร

#### 4.2.2 ค่าการต้านแรงกด (Compressive properties) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่า Compressive Properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ

ชนิดเส้นใย	สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร ( $V_f$ )	Compressive strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
CSM # 450	0.34	$112.20 \pm 12.66$	$4,528.80 \pm 665.25$
	0.40	$122.20 \pm 1.47$	$5,354.70 \pm 564.00$
	0.45	$120.50 \pm 8.55$	$7,684.40 \pm 170.80$
WR # 600	0.45	$117.20 \pm 1.20$	$6,159.00 \pm 736.55$
	0.53	$154.50 \pm 1.27$	$8,097.80 \pm 567.02$
	0.60	$145.70 \pm 4.31$	$8,288.00 \pm 473.76$

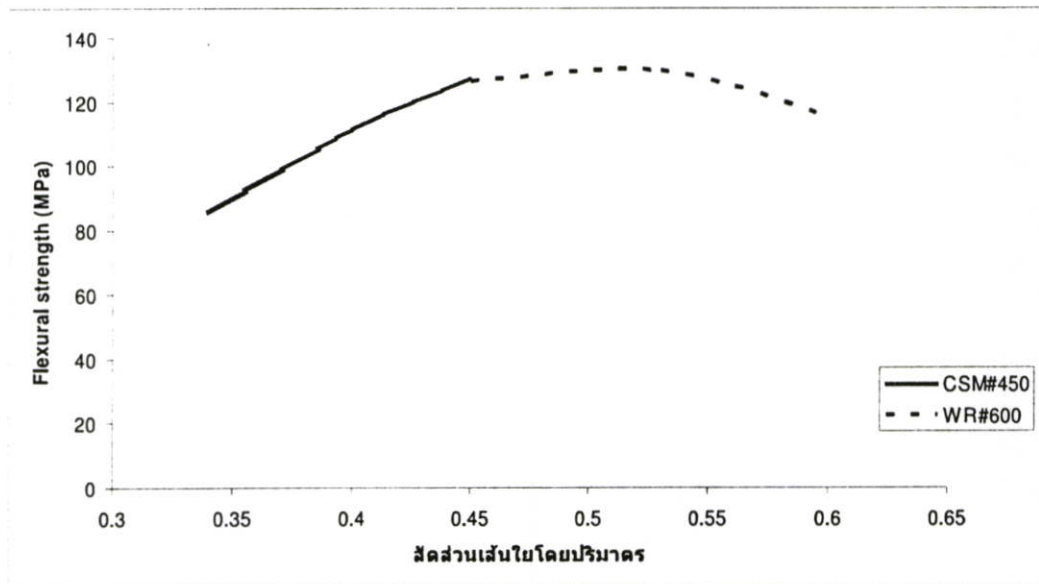


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านแรงกดกับค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร

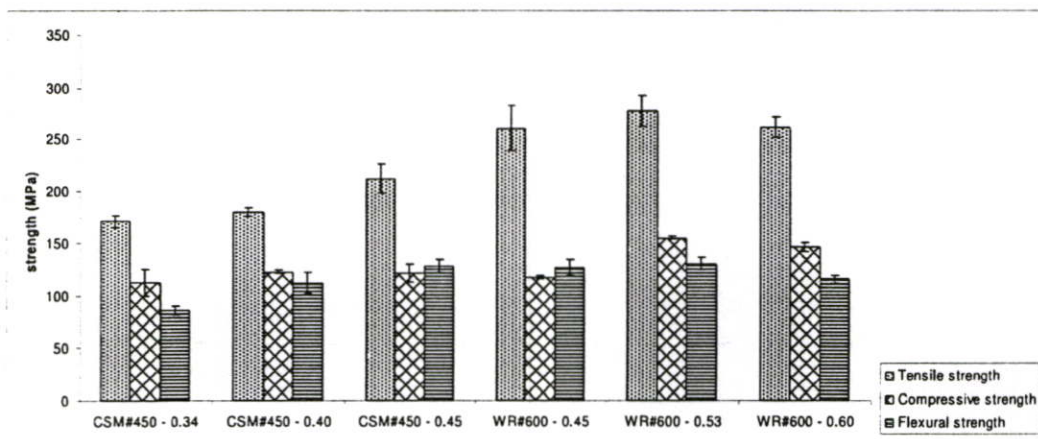
#### 4.2.3 ค่าการต้านการดัดงอ (Flexural properties) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่า Flexural Properties ที่สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรต่างๆ

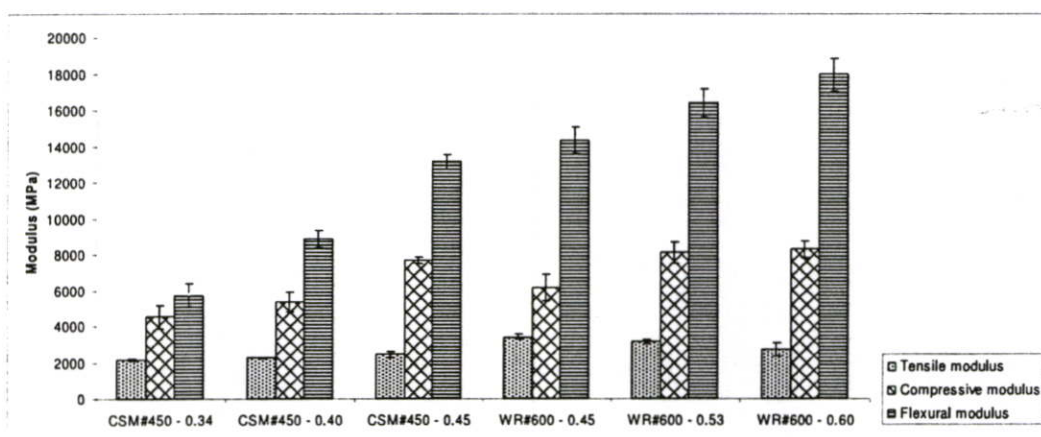
ชนิดเส้นใย	สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร ( $V_f$ )	Flexural strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
CSM # 450	0.34	$85.69 \pm 4.16$	$5,753.99 \pm 617.97$
	0.40	$111.57 \pm 10.28$	$8,866.27 \pm 488.23$
	0.45	$127.74 \pm 5.91$	$13,152.06 \pm 410.12$
WR # 600	0.45	$126.43 \pm 7.73$	$14,343.03 \pm 732.17$
	0.53	$129.76 \pm 5.77$	$16,401.26 \pm 781.47$
	0.60	$115.23 \pm 3.67$	$17,943.41 \pm 913.40$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านการดัดงอกับค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร



รูปที่ 4.5 ค่า Strength ของคอมโพสิตแบบเส้นใยแก้วชนิด CSM-450 และ WR-600



รูปที่ 4.6 ค่า Modulus ของคอมโพสิตแบบเส้นใยแก้วชนิด CSM-450 และ WR-600

จากผลทดสอบในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงของเส้นใยแก้วชนิด CSM จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $V_f$  สูงขึ้น เป็นไปตามทฤษฎีว่าด้วยกฎของผสม (สมการ 2.1) [9,10] เพราะปริมาณของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วเป็นแบบสุ่ม (Random) มีการเรียงตัวแบบกระจายซ้อนทับกันแบบหลวมๆ เป็นผลให้เมทริกซ์สามารถแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยได้ดี แต่เมื่อพิจารณาในเส้นใยแก้วชนิด WR พบว่าค่า  $V_f$  เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วค่าความแข็งแรงจะลดต่ำลง เป็นผลเนื่องจากเส้นใยแก้วชนิด WR จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบถักทอเป็นผืนที่แน่นในทิศทาง 0 และ 90 องศา เป็นระเบียบ เมื่อปริมาณของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เมทริกซ์ไม่สามารถแทรกผ่านไปยังระหว่างชั้นของเส้นใยได้ เป็นผลให้เกิดฟองอากาศแทรกอยู่ระหว่างชั้นของเส้นใยและมีเมทริกซ์น้อยทำให้การยึดเกาะระหว่างชั้นลามิเนตไม่ดี ถือเป็นจุดอ่อนของชิ้นงานส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดต่ำลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแข็งแรงของเส้นใยชนิด CSM กับ WR จะพบว่าเส้นใยประเภท WR จะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าเพราะการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบ CSM จะ

เป็นแบบสุ่มกระจายและความยาวของเส้นใยเฉลี่ยประมาณ 2 นิ้ว ซ้อนทับเป็นผืนเกาะกัน  
อย่างหลวมๆ เป็นผลให้ค่าความแข็งแรงของเส้นใย CSM น้อยกว่า WR ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวอย่าง  
เป็นระเบียบและมีความยาวของเส้นใยแบบต่อเนื่องในทิศทางของแรงกระทำ

เมื่อพิจารณาในผลของค่ามอดุลัส จะพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง  
(Tensile test) จะให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงเมื่อเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี (สมการ 2.25 และ  
2.26 ในบทที่ 2) เป็นผลมาจากในการทดสอบแรงดึงไม่สามารถวัดค่าระยะยืดที่เกิดขึ้นจริงกับ  
ชิ้นงานทดสอบในช่วงระยะวัด (Gage length) ได้ต้องใช้ค่าระยะยืดที่อ่านจากเครื่องซึ่งถือว่าเป็น  
ระยะยืดของชิ้นงานทั้งชิ้น ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณหาค่าระยะยืด (Elongation) และมอดุลัสของ  
ชิ้นงานจึงทำให้ได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่เมื่อพิจารณาในการทดสอบการคดงอ (Flexural test)  
จะให้ค่าของมอดุลัสที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี เพราะในการทดสอบใช้ระยะรองรับ (Span) เป็น 60 : 1  
ซึ่งจะขจัดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงาน

ดังนั้นค่ามอดุลัสที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ผลจากการทดสอบการคด  
งอ เพราะให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการที่ 2.25 และ 2.26 [2,11] ส่วนค่าความแข็งแรงจะ  
ใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงและการคด โดยเลือกค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ  
ได้แก่ เส้นใยแก้วชนิด WR จะเลือกใช้ค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตร ( $V_f$ ) เท่ากับ 0.53 และเลือกใช้  
ค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรของเส้นใยแก้วชนิด CSM เท่ากับ 0.40 เพราะเนื่องจากในขั้นตอนการ  
ออกแบบการจัดเรียงเส้นใยจะคำนวณหากถ้าเลือกใช้ค่า  $V_f$  ของ CSM เท่ากับ 0.45 และยังทำให้  
ขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตจะเกิดความยุ่งยาก ดังนั้นสามารถสรุปค่าต่างๆที่ต้องการได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติเชิงกลสำหรับป้อนในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เลขที่	รายการ	ชนิดของเส้นใยแก้ว		หน่วย
		CSM # 450	WR # 600	
1	Mass Density <sup>1</sup>	2.205e-009	2.205e-009	Tonne/mm <sup>3</sup>
2	Modulus of Elasticity x	13,000	17,000	MPa
3	Modulus of Elasticity y	13,000	17,000	MPa
4	Modulus of Elasticity z <sup>1</sup>	10,000	10,000	MPa
5	Possion Ratio xy <sup>2</sup>	0.3	0.25	-
6	Possion Ratio yz <sup>1</sup>	0.3	0.3	-
7	Possion Ratio xz <sup>1</sup>	0.3	0.3	-
8	Shear Modulus xy <sup>2</sup>	4,500	5,000	MPa
9	Shear Modulus yz <sup>1</sup>	2,000	2,000	MPa

ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติเชิงกลสำหรับป้อนในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ต่อ)

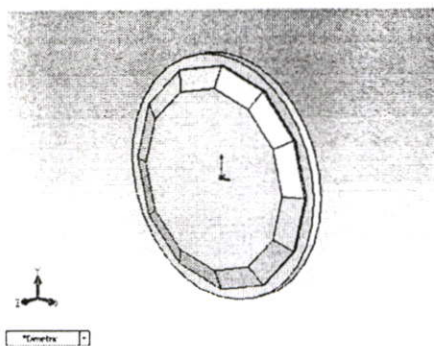
เลขที่	รายการ	ชนิดของเส้นใยแก้ว		หน่วย
		CSM # 450	WR # 600	
10	Shear modulus $xz^1$	2,000	2,000	MPa
11	Allowable stress in tension x-dir	170	250	MPa
12	Allowable stress in compressive x-dir	100	150	MPa
13	Allowable stress in tension y-dir	170	250	MPa
14	Allowable stress in compressive y-dir	100	150	MPa
15	Allowable In-plane shear stress <sup>1</sup>	80	100	MPa

หมายเหตุ

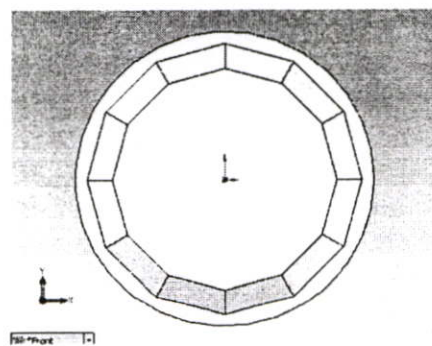
1. หมายถึง ค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี [1,10,11]
  2. หมายถึง ค่าจากหนังสืออ้างอิง ค่ามาตรฐานของวัสดุ [2,5,6,7,10,11]
- ค่าที่ใช้ในโปรแกรมเป็นตัวเลขที่ปัดลงเพื่อให้ตัวเลขไม่ซับซ้อน ยกในการคำนวณ

#### 4.3 การสร้างโมเดลชิ้นงานและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

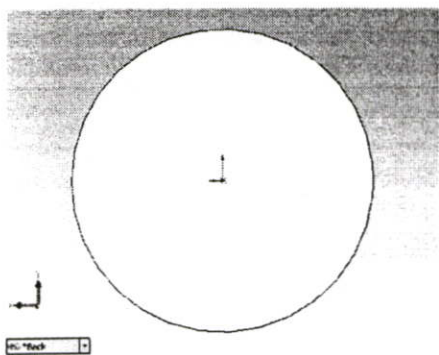
การจำลองคั่นแบบหรือโมเดลชิ้นงาน เป็นการจำลองมาจากชิ้นงานจริงที่เป็นเหล็ก โดยมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างบริเวณขอบที่ใช้รับแรงให้มีขนาดของปีกกว้างขึ้นและเรียบเสมอ ดังรูปที่ 4.7 (ก-ง) การจำลองโมเดลจะแบ่งความหนาของชิ้นงานออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นความหนา  $h$  และความหนา  $L$  ตามรูปที่ 3.1 และ 4.7 ซึ่งจะเป็นการปรับเปลี่ยนความหนา  $h$  โดยแบ่งออกเป็น 5 ความหนาคือ 20,30,40,50 และ 60 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการทนต่อแรงกด ระยะขูดตัวที่เกิดขึ้น และแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณฐานรองรับว่าจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายหรือไม่



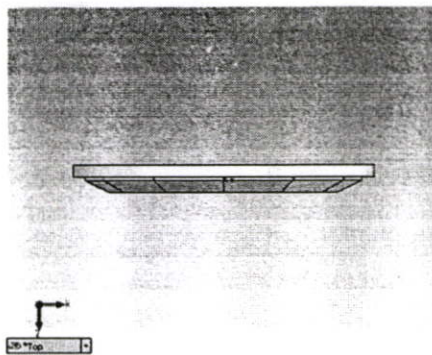
รูปที่ 4.7 ก



รูปที่ 4.7 ข



รูปที่ 4.7 ค



รูปที่ 4.7 ง.

รูปที่ 4.7 รูปแบบ โมเดลชิ้นงาน ก แสดงมุมมอง Dimetric ข. แสดงมุมมองด้านล่าง

ค. แสดงมุมมองด้านบน ง. แสดงมุมมองด้านข้าง

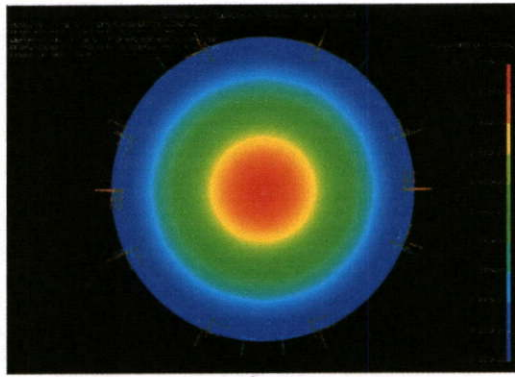
จากนั้นนำโมเดลที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาการยุบตัวสูงสุด (Displacement) ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของลามิเนต ในสภาวะการทดสอบที่แรงกดสูงสุดเท่ากับ 250 กิโลนิวตัน หรือ 25 ตันต่อพื้นที่วงกลมขนาด 0.049 ตารางเมตรตามข้อกำหนดในมาตรฐาน BS EN 124 [15] ในขั้นตอนการออกแบบการจัดเรียงเส้นใยแก้วจะเรียงตัวแบบสมมาตรและสัดส่วนระหว่างเส้นใยแก้วชนิด WR ต่อชนิด CSM เป็น 80 : 20 โดยความหนาเพื่อจะช่วยให้เรื่องการยึดเกาะระหว่างชั้นของชิ้นงาน เพราะถ้าเลือกใช้เส้นใยชนิด WR ที่มีความแข็งแรงสูงแต่การยึดเกาะระหว่างชั้นไม่ดี อาจจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเลื่อนสไลด์ระหว่างชั้นของลามิเนตและเกิดการแยกชั้นของเส้นใยแก้วอันเนื่องจากแรงเฉือนได้ การจัดเรียงเส้นใยจะเริ่มใช้เส้นใยแก้วชนิด CSM ก่อนและเป็นชั้นสุดท้ายของชิ้นงาน เพราะต้องการให้รายละเอียดของผิวชิ้นงานมีความสวยงามและไม่มีฟองอากาศ หลังจากนั้นจึงทำการจัดเรียงแบบสลับระหว่างเส้นใยแบบ WR และ CSM จนได้จำนวนสัดส่วนที่กำหนด การจัดเรียงทิศทางของเส้นใยในโปรแกรมไฟไนต์จะกำหนดให้มีทิศทางเป็น 0 องศา เพราะจากการทวนสอบการใช้ได้ของโปรแกรมหาคณนวก ข พบว่าเมื่อคำนวณจากสมการ 2.16, 2.20, 2.39, 2.48 และ 2.49 จะได้ว่าค่าการวางเส้นใยของเส้นใย CSM และ WR ในทิศทาง 0 และ 90 องศาจะให้ค่าความเค้นและความเครียดในแกน 11 และ 22 เท่ากัน แสดงว่าเส้นใยทั้งสองชนิดแสดงสมบัติเป็นแบบ Semi-Isotropic ดังนั้นจึงสมมุติให้การจัดเรียงตัวในโปรแกรมเป็นแบบ 0 องศาเพียงอย่างเดียว สามารถสรุปรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 รูปแบบการจัดวางเส้นใยในแต่ละโมเดล

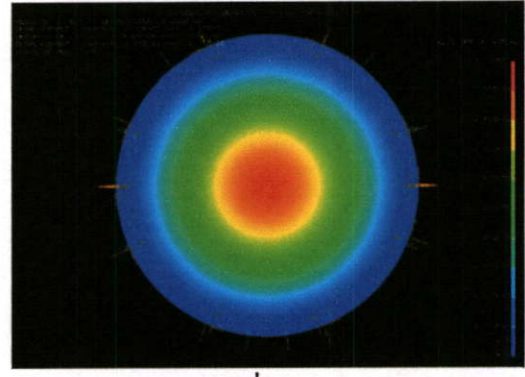
ตัวอย่างที่	รูปแบบการจัดวางเส้นใย
FEM# 1	$[C_3/W_{14}/C_3/W_{14}/C_3/W_{14}/C_3/W_{14}/C_2]_s$
FEM# 2	$[C_4/W_{16}/C_4/W_{16}/C_4/W_{16}/C_4/W_{16}/C_3]_s$
FEM# 3	$[C_4/W_{18}/C_4/W_{18}/C_4/W_{18}/C_3/W_{18}/C_3]_s$
FEM# 4	$[C_4/W_{20}/C_4/W_{20}/C_4/W_{20}/C_4/W_{20}/C_4]_s$
FEM# 5	$[C_6/W_{22}/C_4/W_{22}/C_4/W_{22}/C_4/W_{22}/C_4]_s$

กำหนดให้      C = เส้นใยแก้วชนิดCSM เบอร์ 450  
                     W = เส้นใยแก้วทอชนิดฝืน เบอร์ 600  
                     ตัวเลข = จำนวนชั้นของเส้นใยแก้ว  
                     S = สัญลักษณ์แสดงว่าเรียงตัวแบบสมมาตร

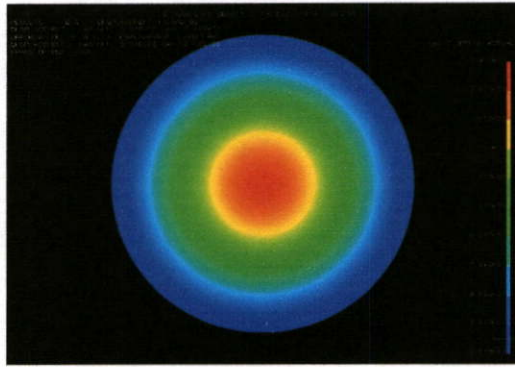
หลังจากการกำหนดรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้ว เริ่มการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการกำหนดสภาวะการทดสอบ สภาวะข้อจำกัด (Boundary condition) ต่างๆ ที่ต้องการศึกษา ซึ่งในขั้นตอนนี้จะจำลองให้ชิ้นงานไม่มีการเคลื่อนที่และหมุนในทุกแกน( r,z,θ) บริเวณขอบรองของชิ้นงาน และมีโหลดกระทำบริเวณบนกึ่งกลางผิวหน้าชิ้นงาน แรงกระทำแบบกระจายเป็นพื้นที่วงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 250 มิลลิเมตรหรือคิดเป็นพื้นที่ เท่ากับ 0.049 ตารางเมตร ด้วยแรงกระทำเท่ากับ 250 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นทำการกำหนดขนาด ชนิดของเอลิเมนต์ โดยกำหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบ Solid ชนิดสามมิติ มีความยาวของเอลิเมนต์เท่ากับ 30 และ มีการจัดเรียงเอลิเมนต์แบบสุ่ม (รายละเอียดการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ตามภาคผนวก ก) แล้วศึกษาผลที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6 - 4.7 และรูปที่ 4.8



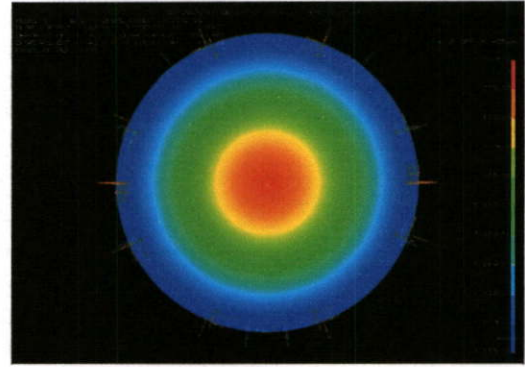
รูปที่ 4.8 ก



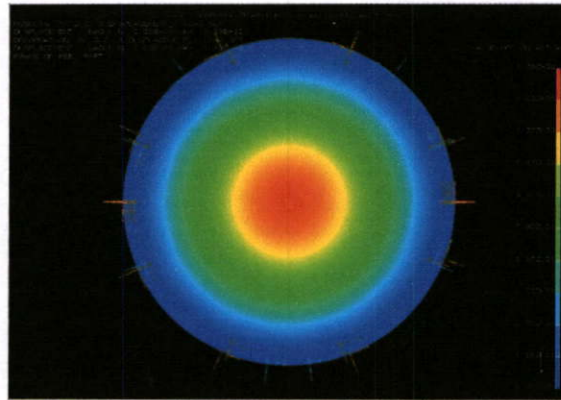
รูปที่ 4.8 ข



รูปที่ 4.8 ค



รูปที่ 4.8 ง



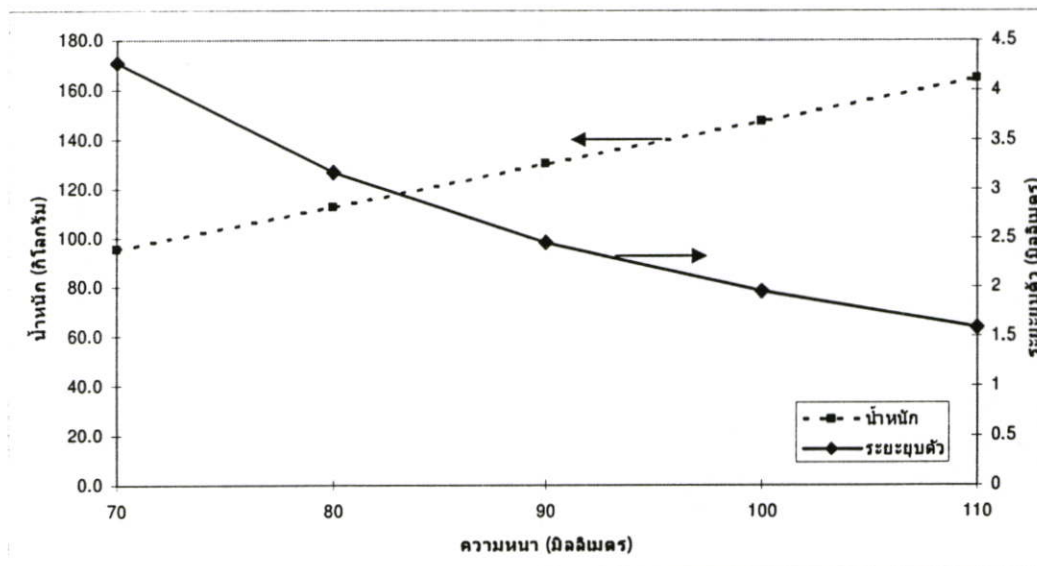
รูปที่ 4.8 จ

รูปที่ 4.8 ระบุขบดัวที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ก. โมเดล FEM#1  
 ข. โมเดล FEM#2 ค. โมเดล FEM#3 ง. โมเดล FEM#4 จ. โมเดล FEM#5

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักของชิ้นงาน และ ระยะการยุบตัวสูงสุดของชิ้นงานที่ความหนา h ต่างๆ  
(วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม I-DEAS 11 NX โหลดทดสอบ 250 กิโลนิวตัน)

ตัวอย่างที่	ความหนา (h) ; mm	ความหนา (L) ; mm	น้ำหนัก (kg)	ระยะการยุบตัวสูงสุด (Displacement); mm
FEM# 1	20	50	95.4	4.27
FEM# 2	30	50	112.7	3.17
FEM# 3	40	50	130.1	2.46
FEM# 4	50	50	147.4	1.96
FEM# 5	60	50	164.8	1.59

จากตารางสามารถนำมาเขียนกราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ต่อ ระยะการยุบตัว และ น้ำหนักชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.9



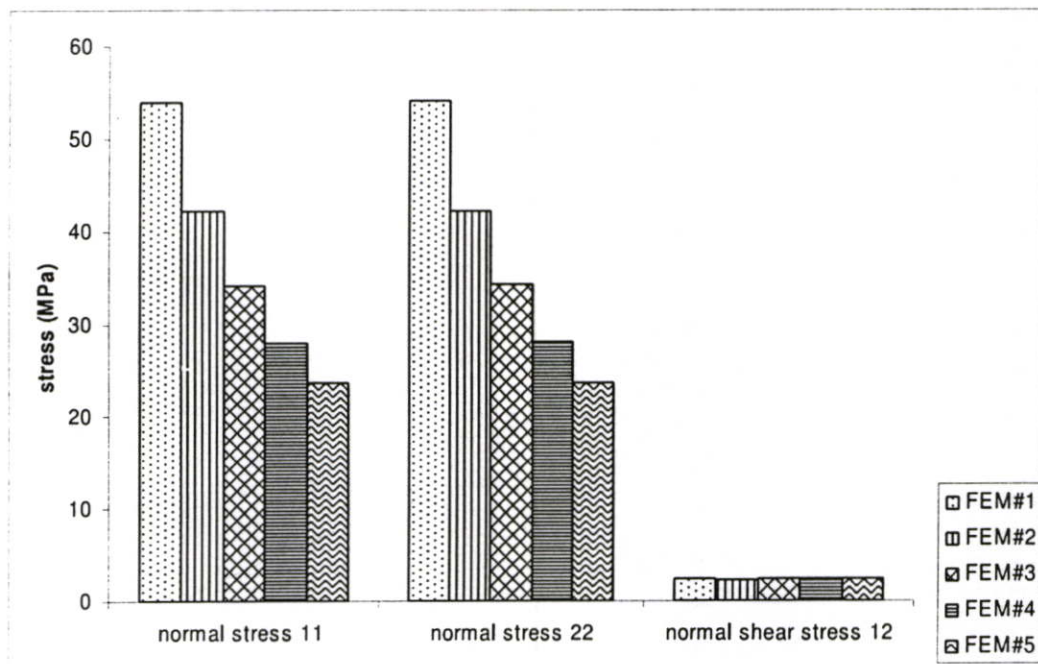
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ต่อ ระยะการยุบตัว และน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานจะทำให้ น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เป็นสมการเส้นตรง เนื่องจากโมเดลของชิ้นงานที่ออกแบบจะมีการเพิ่มความหนา h อย่างคงที่เป็นผลให้ปริมาตรของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสมการเชิงเส้นเมื่อนำ ไปคูณด้วยความหนานั่นของวัสดุคอมโพสิต จึงได้ค่าน้ำหนักที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นเส้นตรง ความหนาที่เพิ่มขึ้นยังเป็นผลให้ระยะยุบตัวของแบบจำลองมีแนวโน้มลดลง เพราะการเพิ่มความหนาจะมีการ

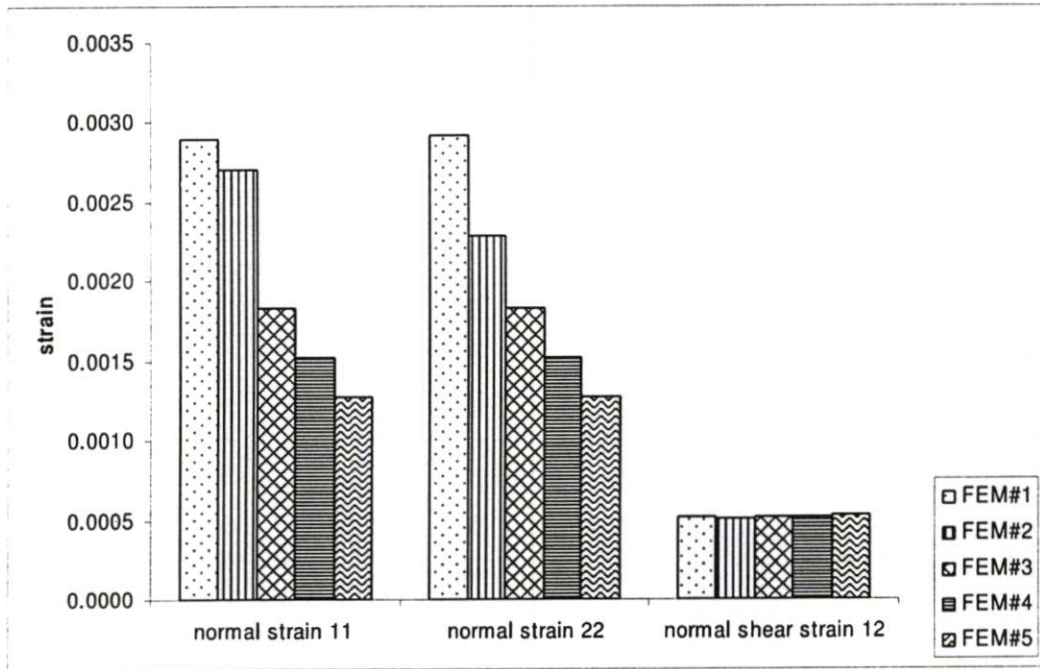
เพิ่มชั้นของเส้นใยแก้วมากขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และทนต่อแรงกดและดึงได้ดีขึ้น ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 -4.17 เป็นผลของการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 11 , 22 และ 12 บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานตลอดความหนา

ตารางที่ 4.7 แรงเค้นสูงสุด และความเครียดที่เกิดขึ้นในโมเดลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

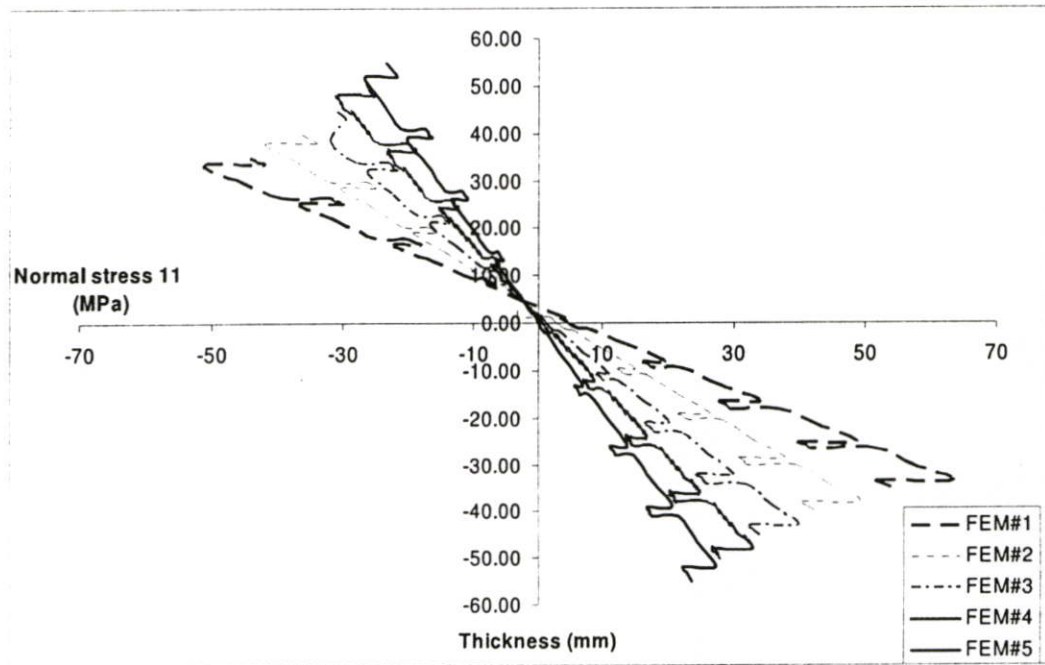
ตัวอย่างที่	Normal stress 11 (MPa)	Normal stress 22 (MPa)	Normal shear stress 12 (MPa)	Normal strain 11	Normal strain 22	Normal shear strain 12
FEM# 1	53.9	54.1	2.32	0.00290	0.00292	0.000515
FEM# 2	42.2	42.3	2.29	0.00270	0.00228	0.000510
FEM# 3	34.1	34.3	2.32	0.00183	0.00183	0.000516
FEM# 4	27.9	28.1	2.32	0.00152	0.00152	0.000516
FEM# 5	23.6	23.6	2.36	0.00127	0.00127	0.000525



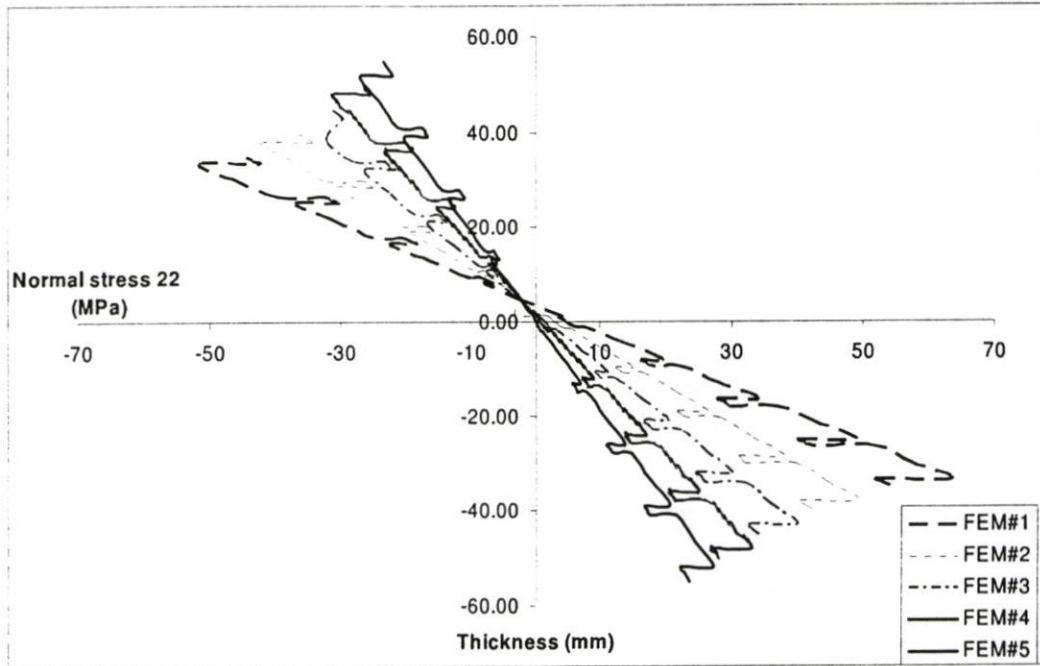
รูปที่ 4.10 ค่า Normal stress สูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 11, 22 และ 12



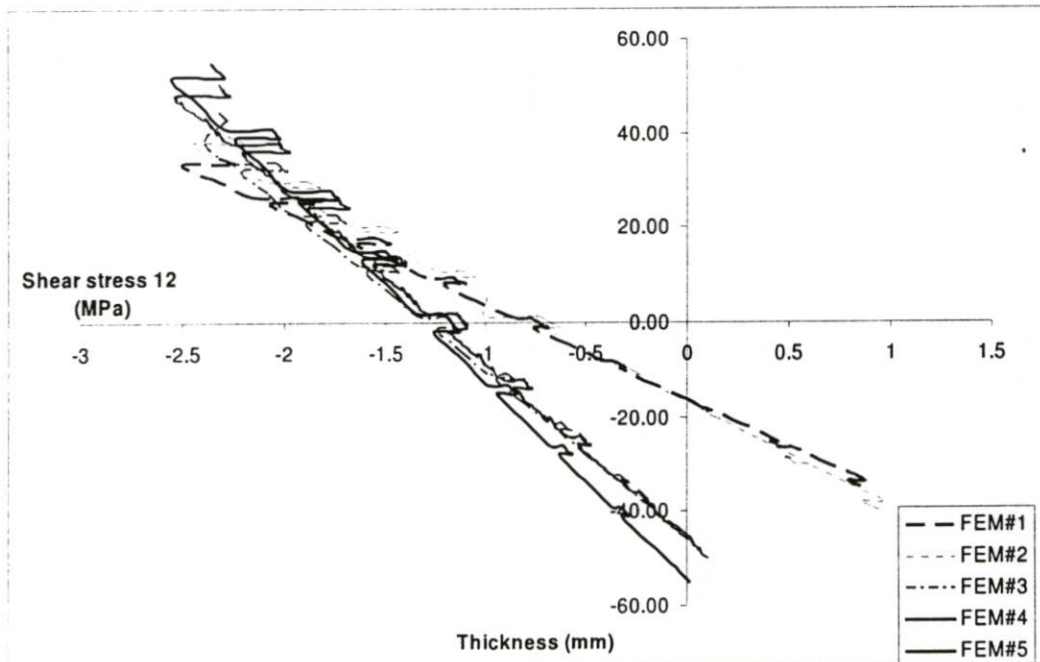
รูปที่ 4.11 ค่า Normal strain สูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 11, 22 และ 23



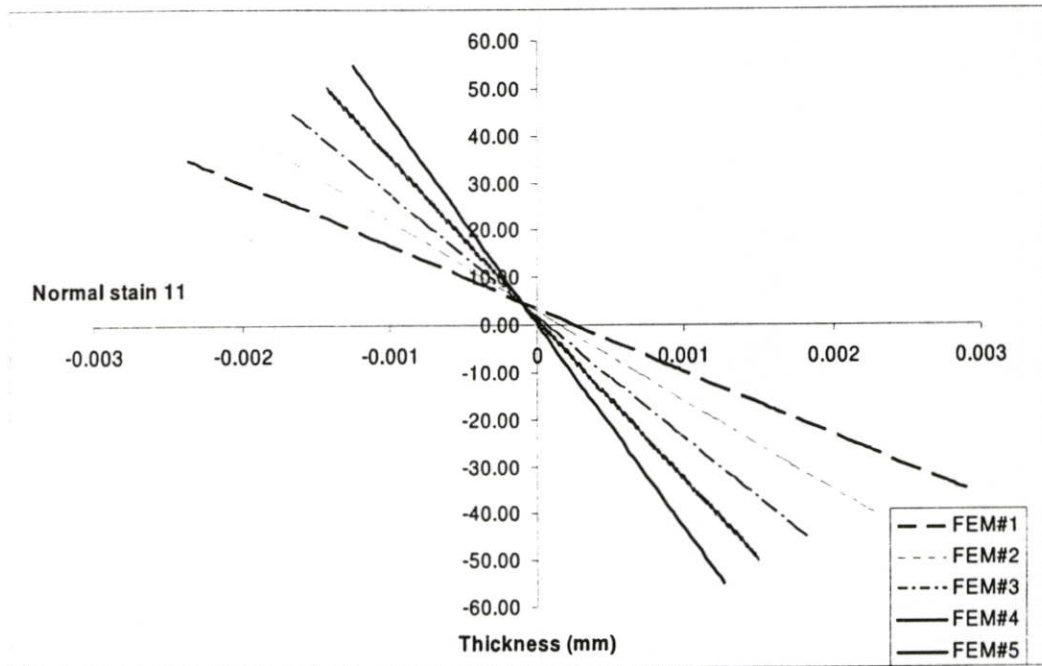
รูปที่ 4.12 ค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 11 ของแต่ละโมเดล



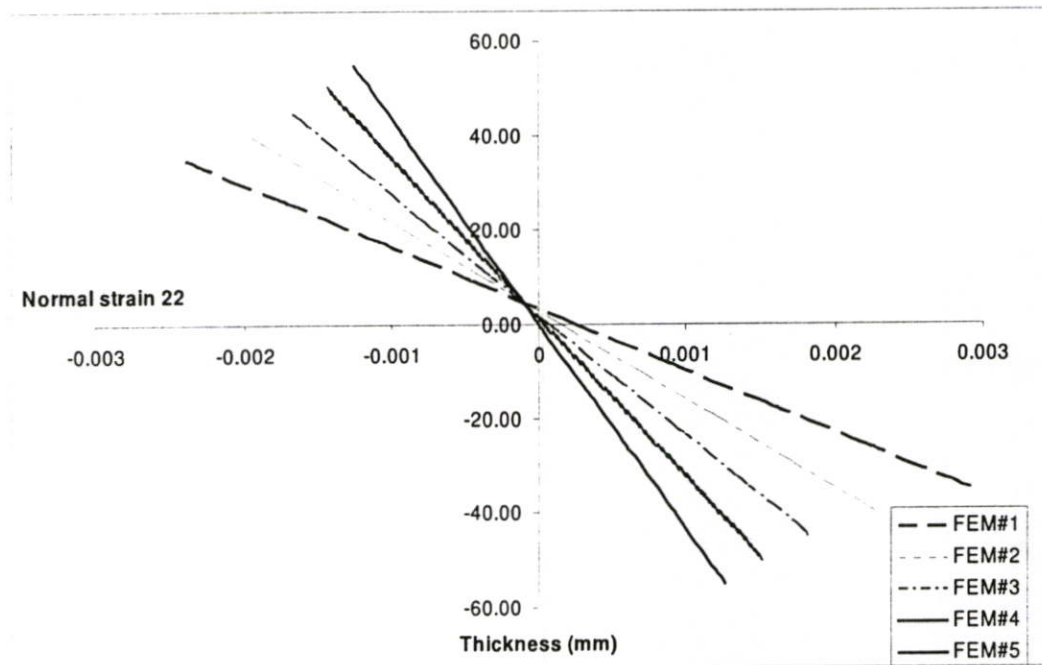
รูปที่ 4.13 ค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 22 ของแต่ละโมเดล



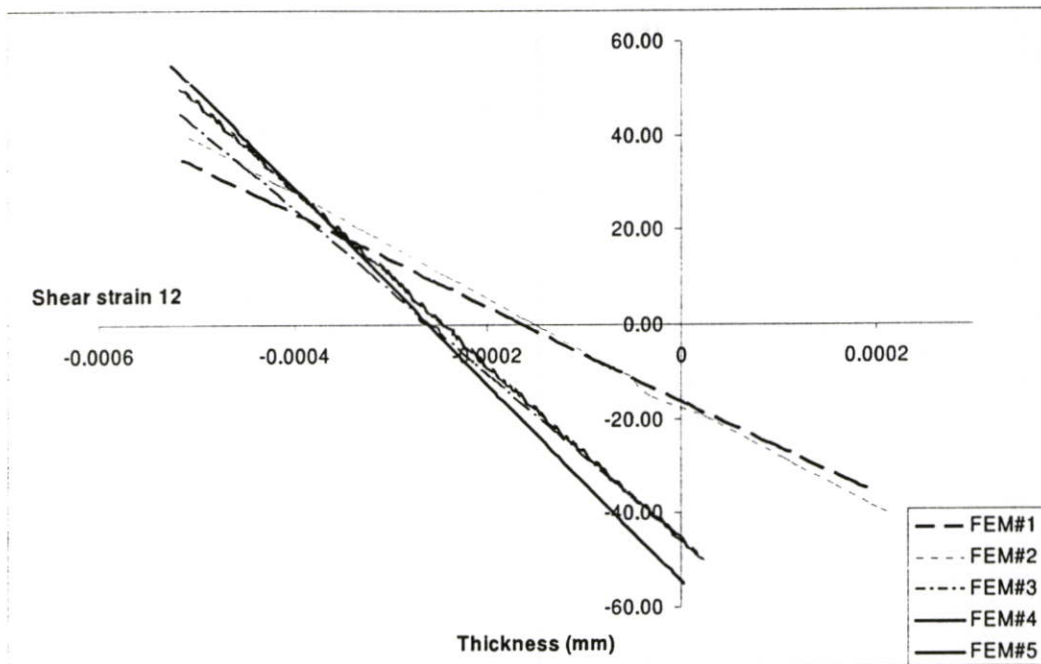
รูปที่ 4.14 ค่า Normal shear stress ที่เกิดขึ้นในแกน 12 ของแต่ละโมเดล



รูปที่ 4.15 ค่า Normal strain ที่เกิดขึ้นในแกน 11 ของแต่ละ โมเดล



รูปที่ 4.16 ค่า Normal strain ที่เกิดขึ้นในแกน 22 ของแต่ละ โมเดล



รูปที่ 4.17 ค่า Normal shear strain ที่เกิดขึ้นในแกน 12 ของแต่ละโมเดล

จากผลวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ความเค้นและความเครียดในแกน 11 และ 22 (แกน 11 คือแกนที่มีทิศทางไปในแนวแกน  $\pi$  และ 22 คือ แกนที่มีทิศทางไปในแนว  $zz$  ของระบบโคออร์ดิเนต) ของแบบจำลอง มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น เพราะความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงตึงมากขึ้น ทนต่อการคดโค้งได้ดีขึ้นและยังเป็นผลให้ชิ้นงานยุบตัวได้น้อยลง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 และ 4.13 ค่า Normal stress ที่เกิดขึ้นในแกน 11 และ 22 ณ ตำแหน่งความหนาเดียวกัน พบว่าค่าแรงเค้นของโมเดล FEM#1 ที่มีความหนาค่าสูงสุดจะมีค่า Normal stress สูงกว่าโมเดล FEM#5 ที่มีความหนาสูงสุด ค่าแรงเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกน 12 ของทุกโมเดลจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาโมเดลทั้ง 5 พบว่าไม่เกิดความเสียหาย เนื่องจากค่าแรงเค้นที่ได้จากผลวิเคราะห์น้อยกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ (ผลจากตารางที่ 4.4)

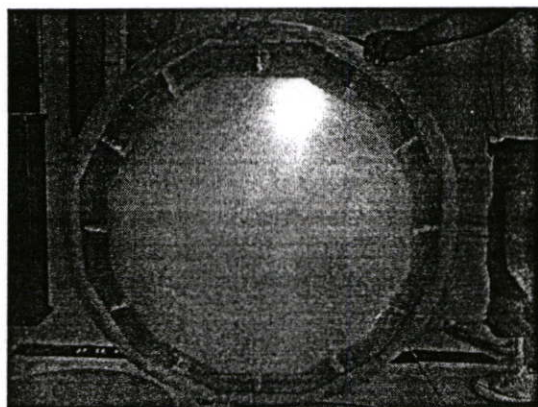
จากรูปที่ 4.9 พบว่าจุดตัดของสมการจะอยู่ในช่วงความหนาเท่ากับ 82 -83 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 112.7 กิโลกรัมโดยประมาณและระยะยุบตัวเท่ากับ 3.17 มิลลิเมตร แต่เมื่อพิจารณาผลของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในแกน 11 และ 22 จะพบว่าที่ความหนา 80 มิลลิเมตร จะมีความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นเท่ากับ 42.2 และ 42.3 MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุเบื้องต้นที่ใช้ก่อนในการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 100 MPa คิดเป็น 2.37 เท่าของความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการขึ้นรูปเพราะในขั้นตอนการขึ้นรูปอาจจะมีปัญหาทางด้านของการเตรียมชิ้นงานที่ไม่ได้ตามขั้นตอน ดังนั้นในการเลือกต้นแบบที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่ตั้งไว้จะเลือกค่า Safety factor ที่มีค่าประมาณ 3 เท่า เมื่อพิจารณาที่ความหนา  $h$  เท่ากับ 40 มิลลิเมตร หรือ ความหนารวมของชิ้นงานเท่ากับ 90 มิลลิเมตร พบว่าชิ้นงานมี

น้ำหนัก 130.1 กิโลกรัมเบากว่าฝาเหล็กประมาณ 50 กิโลกรัม คิดเป็น ร้อยละ 27 ของน้ำหนักฝาเหล็กและมีระยะขุดตัวที่ 2.46 มิลลิเมตรและเมื่อพิจารณาทางด้านของความเค้นในแกน 11 และ 22 จะให้ค่า Safety factor เท่ากับ 2.93 ดังนั้นจึงเลือก FEM# 3 เป็นต้นแบบที่จะใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อทดสอบหาความสามารถในการรับแรงกดสูงสุด ซึ่งมีการจัดเรียงเส้นใยแบบสมมาตรดังนี้

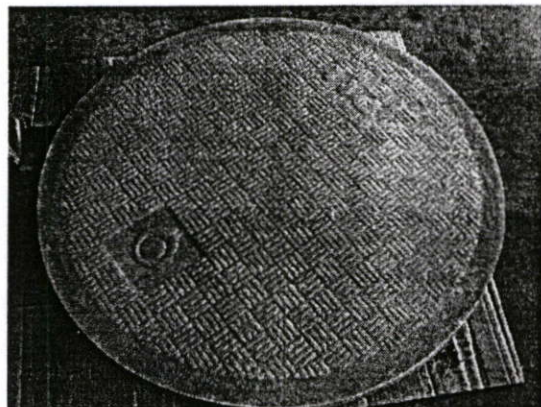
$$"[CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_4/WR_{18}/CSM_2]_5"$$

#### 4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน

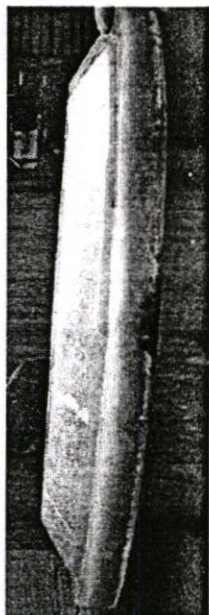
การขึ้นรูปชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay up) มีลักษณะขั้นตอนดังนี้เริ่มจากทาน้ำยาอีพอกซีเรซินที่ผสมกับอะคริลิกให้ทั่วแม่แบบไฟเบอร์กลาส หลังจากนั้นทำการปูเส้นใยแก้วลงในแม่แบบไฟเบอร์กลาส และใช้ลูกกลิ้งสารเคมีทาน้ำยาให้ชุ่มพร้อมทั้งใช้ลูกกลิ้งเหล็กและขนหมูรีดไล่ฟองอากาศในแต่ละชั้น ปูเส้นใยแก้วชั้นต่อไปทำซ้ำไปจนครบจำนวนเส้นใยแก้วที่กำหนดไว้ทั้งหมด 180 ชั้น ใช้เวลาในการทำขั้นตอนที่ 1 ประมาณ 120 นาที ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการกดอัดชิ้นงาน ขั้นตอนการทำจะนำแม่แบบชิ้นงานที่เลยเรียบร้อยแล้วมาวางบนแท่นอัดที่เตรียมไว้ ปิดแม่แบบด้วยแม่แบบฝาบนหลังจากนั้นวางแผ่นเหล็กทับ และขันน็อตแรงจนฝาแม่แบบทั้งสองประกบกันจนสนิท ค้างไว้จนชิ้นงานเซตตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ ตัด ตกแต่ง และนำไปตั้งทิ้งไว้เพื่อทำการ Post Cure ที่สภาวะแวดล้อม (อุณหภูมิห้อง) เป็นเวลา 7 วัน จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 4.18 และรายละเอียดตามตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.18 ก



รูปที่ 4.18 ข



รูปที่ 4.18 ค

## รูปที่ 4.18 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

- (ก) ภาพด้านหน้า
- (ข) ภาพด้านหลัง
- (ค) ภาพด้านข้าง

ตารางที่ 4.8 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้

รายละเอียดชิ้นงาน	ค่าจากการคำนวณ	ผลการตรวจสอบ
ความหนา h (มิลลิเมตร)	40	$45.29 \pm 0.97$
ความหนา L (มิลลิเมตร)	50	$49.14 \pm 0.85$
เส้นผ่านศูนย์กลางของฝา (มิลลิเมตร)	1000	$996.75 \pm 2.36$
ระยะฝาเปิด (มิลลิเมตร)	920	$918.50 \pm 1.29$
น้ำหนักชิ้นงาน (กิโลกรัม)	130.1	101

ชิ้นงานที่ได้มีความคลาดเคลื่อนในด้านของความหนา h เนื่องจากขีดจำกัดของเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ทำให้ไอพอกซีเรซินเริ่มเข้าสู่ภาวะการเซตตัวจึงทำให้มีความหนืดสูงขึ้นเป็นผลให้เมื่อทำการบีบอัดแม่แบบตัวผู้ทำให้เรซินส่วนเกินไม่สามารถไหลออกมาได้ ประกอบกับการเรียงเส้นใยทำให้เมื่อทำการกดอัดชิ้นงานไม่สามารถกดให้ฝาแม่แบบประกบกันสนิท จึงทำให้ความหนา h มีค่าสูงกว่าต้นแบบ ส่งผลให้สัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปจากที่คำนวณไว้และเมื่อคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างต่อปริมาตร ( $V_v$ ) ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 จะมีค่าเท่ากับ 0.0062 แสดงว่าภายในชิ้นงานมีฟองอากาศหรือช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักของชิ้นงานที่ได้มีน้ำหนักเบากว่าค่าที่ออกแบบไว้ แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับฝาปิดที่ระบายน้ำชนิดที่เป็นเหล็กจะเบาว่าร้อยละ 44

ของชิ้นงานเดิม (ฝาประเภทเหล็กจากลูกค้ำจะมีน้ำหนักเท่ากับ 180 กิโลกรัม) ดังตารางที่ 4.9 แต่เมื่อพิจารณาทางด้านมิติอื่นๆ มีค่าน้อยกว่า เพราะชิ้นงานที่ถอดจากแม่แบบจะมีการหดตัวของเรซินหลังจากที่ทำการ Post Cure และอาจมีขนาดของแม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปมีขนาดที่คลาดเคลื่อนไป

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างฝาชนิดเหล็กและคอมโพสิต

รายละเอียด	ฝาเหล็ก	ฝาคอมโพสิต
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	1000	1000
ระยะเปิด (Clear opening) (มิลลิเมตร)	920	918
ความหนารวม (มิลลิเมตร)	100	95
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	180	101

#### 4.5 การทดสอบผลิตภัณฑ์

##### 4.5.1 การทดสอบความสามารถในการคงสภาพที่โหลดกระทำ 2/3 เท่าของโหลดทดสอบ

สมบัติการแอ่นตัวหรือการยุบตัวของฝาปิดท่อระบายน้ำที่มีโหลดกระทำ 2/3 เท่าของโหลดทดสอบ ในงานวิจัยชิ้นงานจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C-250 ดังนั้นแรงที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 166.67 กิโลนิวตัน และศึกษาระยะยุบตัวที่เกิดหลังจากการทดสอบซ้ำจนครบ 5 ครั้ง ผลทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.10 จากการทดสอบพบว่าระยะยุบตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด คือยุบตัวเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับมาตรฐานที่ระยะยุบตัวสูงสุดเท่ากับ 9.2 มิลลิเมตร ระยะยุบตัวจะน้อยกว่ามาตรฐานถึง 6.2 มิลลิเมตร

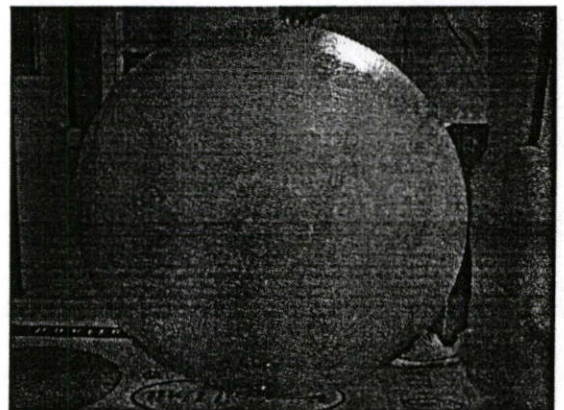
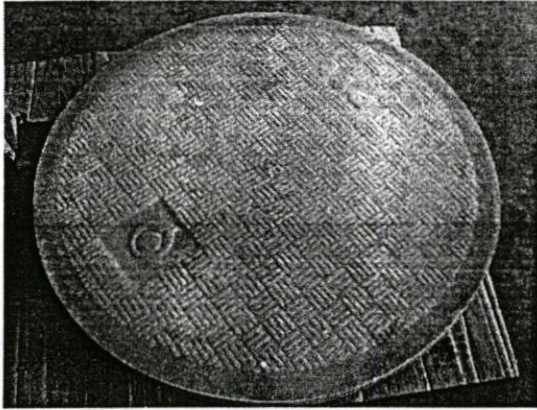
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหาค่าระยะยุบตัวที่โหลดกระทำ 166.67 กิโลนิวตัน

ชิ้นงาน	เกณฑ์ยอมรับตามมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	ระยะอ้างอิงก่อนทดสอบ (มิลลิเมตร)	ระยะอ้างอิงหลังทดสอบ (มิลลิเมตร)	ระยะยุบตัว (มิลลิเมตร)
1	< 9.2	258	261	3.0

##### 4.5.2 การทดสอบความสามารถในการรับแรงสูงสุด

การศึกษาความสามารถในการรับแรงกดสูงสุดของฝาปิดท่อระบายน้ำตามที่มาตรฐานกำหนดของชั้นคุณภาพ C – 250 คือไม่น้อยกว่า 250 กิโลนิวตัน หรือ 25 ตัน พบว่าชิ้นงานสามารถรับแรง

กดได้ถึง 25 คัน โดยมีระยะยุบตัวสูงสุดเท่ากับ 13.49 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาค่าระยะยุบตัวที่เกิดขึ้นจริงจะให้ค่าที่สูงกว่าการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นผลเนื่องมาจากชิ้นงานที่ได้มีค่าสัดส่วนเส้นใยโดยปริมาตรที่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ หลังทดสอบพบว่าชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย ไม่มีการแยกชั้นของเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ก ก่อนทดสอบ

รูปที่ 4.19 ข หลังทดสอบ

รูปที่ 4.19 ภาพเปรียบเทียบชิ้นงาน ก่อนและหลังทดสอบการรับแรงสูงสุด

จากภาพที่ 4.19 ข จะเห็นผิวบริเวณด้านบนเป็นวงสีขาว เนื่องจากเป็นรอยหักคของเครื่องทดสอบที่กดชิ้นงาน เพราะในการทดสอบใช้แผ่นกระดาษลังเป็นแผ่นรอง จึงเกิดรอยแตกที่ผิวชั้นเจลโคท แต่ชิ้นงานบริเวณนั้นไม่ได้รับความเสียหายหรือชำรุด ส่วนผิวหน้าด้านล่างของชิ้นงานจะมีลักษณะปกติเหมือนกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบและชิ้นงานไม่เกิดการเสียหายหรือชำรุด นอกจากนี้ชิ้นงานยังมีสมบัติในการคืนตัว นั่นคือเมื่อคลายโหลดทดสอบ พบว่าจากชิ้นงานที่ยุบตัวเท่ากับ 13.49 มิลลิเมตร ชิ้นงานจะค่อยๆ คืนตัวทำให้ระยะยุบมีค่าเท่ากับ 0 เป็นผลเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุคอมโพสิตที่สามารถคืนสภาพเดิมเมื่อไม่มีโหลดกระทำ

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการทดลอง

ความสามารถในการรับแรงกดสูงสุด ที่ได้ออกแบบและวิเคราะห์เบื้องต้นของฝาปิดท่อระบายน้ำจากวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การออกแบบและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ผลใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ได้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากปัญหาที่เกิดในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ที่มีขีดจำกัดเนื่องจากเวลาเขตตัวของระบบเรซินที่นำมาใช้ แต่ผลวิเคราะห์กับผลการทดสอบให้ค่าที่อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด

2. ฝาปิดท่อระบายน้ำชนิดเส้นใยกลาสหรือคอมโพสิตที่ได้ มีน้ำหนักเท่ากับ 101 กิโลกรัม เบากว่าฝาชนิดเหล็กถึงร้อยละ 44 มากกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ถึงร้อยละ 24

3. ฝาปิดท่อระบายน้ำชนิดเส้นใยกลาสสามารถรับแรงกดสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 250 กิโลนิวตัน จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C-250 เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN -124 (1990) มีระยะขยุบตัวสูงสุดที่โหลดกระทำ 250 กิโลนิวตัน เท่ากับ 13.49 มิลลิเมตร

4. ที่โหลดกระทำ 166.67 กิโลนิวตัน หรือ 2/3 ของโหลดทดสอบ ทำให้ชิ้นงานเกิดการขยุบตัว 3.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเทียบกับมาตรฐานถือว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

### ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยนี้จะออกแบบชิ้นงานฝาปิดท่อระบายน้ำชนิดเส้นใยกลาส ที่มีสมบัติผ่านตามมาตรฐาน ได้ระดับหนึ่ง แต่ทางผู้วิจัยมีความเห็นว่าชิ้นงานยังสามารถปรับปรุงแก้ไขโมเดล เพื่อให้ชิ้นงานมีสมบัติที่ดีขึ้น น้ำหนักเบาขึ้น และมีเทคนิคการขึ้นรูปที่ลดเวลา เหมาะกับการผลิตระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอแนวทางในการศึกษาข้อมูลเพื่อปรับปรุงและพัฒนา ดังนี้

1. ศึกษาการออกแบบให้ชิ้นงานมีโครงสร้างแบบแซนวิช หรือ มีการเสริมวัสดุประเภท Core เพื่อช่วยในการรับแรงกด รวมทั้งช่วยในการลดน้ำหนักของชิ้นงาน
2. ศึกษาเทคนิคในการขึ้นรูปที่เหมาะสมกว่าการทำ Hand Lay กับ Compression molding เพราะเป็นการขึ้นรูปที่ใช้เวลานานและต้องใช้แรงงานมาก
3. ศึกษาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างโครงสร้างแบบแซนวิช และการเลือกฟังก์ชันในการวิเคราะห์ผล
4. ศึกษาสมบัติและชนิดของระบบอีพอกซีเรซินและ เส้นใย ประเภทต่างๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชัย นรเศรษฐ์ โสภณ,รศ.ดร. “กลศาสตร์วัสดุประกอบ.” [ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์].  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง. 2535
- [2] Daniel M. and Ishai Ori. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. New York :  
Oxford University Press. 2006
- [3] กิตติ อนุชาผัด และ คณะ. คอมโพสิต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์  
จำกัด. 2548
- [4] อธิธิพล แจ่มชัด,รศ.ดร. “พอลิเมอร์คอมโพสิต.” [สื่อการเรียนการสอน]. ภาควิชาเคมี คณะ  
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- [5] Murphy J.. **The Reinforced Plastics Handbook**. Second edition. Oxford : Great Britain.  
1998
- [6] Sidney H. G. **Handbook of Thermoset Plastics**. Second edition. New Jersey : United states.  
1998
- [7] Peters S.T. **Handbook of Composite**. Second edition. Great Britain : Cambridge University  
Press. 1998
- [8] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. เอฟอาร์พี. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : หจก. ป.สัมพันธ์พาณิชย์. 2540
- [9] Hearle JWS. **High-Performance Fiber**. A Bington Cambridge :Wood head publishing Ltd.  
2001
- [10] Hyer M.W. **Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials**. Singapore :  
McGraw-Hill Book Co. 1998
- [11] Daniel M. **Composite Materials Design and Applications**. New York : CRC Press LLC.  
2003
- [12] ทีมงานไฟไนต์เอลิเมนต์. “เพิ่มขีดความสามารถการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วย FEM.”  
[Online]. Available : <http://www.mtec.or.th> 2545
- [13] เดช พุทธเจริญทอง,รศ.ดร. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริม  
กรุงเทพ. 2548
- [14] Logan D. **A First Course in the Finite Element Method**. Third edition. :United State of  
America. 2000

- [15] BS EN 124. **Gully Tops and Manhole Top for Vehicular and Pedestrian Areas-Design Requirements,Type Ttesting,Marking,Quality Control.** London : British Standard Institution. 1994
- [16] Maheri M.R. and Adams R.D. "Finite-Element Prediction of Model Response of Damped Layered Composite Panels." **Composites Science and Technology.** Vol.55. 1995. : pp. 13 – 23
- [17] FACTA. **Specification for Fabricated Access Covers.** [Online]. Available :<http://www.facta.com> 2001
- [18] Duffy L. "Composite Manhole Cover for European Market." **Composite 2001 Convention and Trade Show.** October 2001
- [19] Tita V., De Carvalho J. and Lirani J. 2003. "Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Fiber Reinforced Composite Beam." **Braz.soc. of Mech. Sci&Eng.** Vol.25 :pp. 306-310
- [20] Saku. M., Uetsuji Y. And Kurashiki. T. "Finite Element analysis of damaged woven fabric composite materials." **Composites Science and Technology.** Vol.63 2003. : pp.506-516
- [21] Ashby M.F. and Brechet Y.J.M. 2003. "Designing hybrid materials." **Acta materialia.** 51 :pp.5801-5821
- [22] Galib H. and Latife H. "**Composite Fan Blade Design for Advance Engine Concepts.**" [Online]. Available: <http://www.gltrs.grc.nasa.gov>. 2004
- [23] Naveen R. "**Design of Composite Driveshafts for Automative Application.**" [Online]. Available : <http://www.sae.org>. 2004
- [24] Sancho J. and Miravete A.. 2006. "Design of Composite Structures including delamination studies." **Composite Structure.** Vol.76 :pp 283-290
- [25] Kalyanasundaram S., Lowe A. and Watters A.J. 2006. "Finite Element Analysis and Optimization of composite wheelchair wheels." **Composite Structure.** Vol 75 : pp 393-399

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก ก

### มาตรฐาน BS EN 124

Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas – Design requirements, type testing, marking, quality control.

#### 1. ขอบเขตของมาตรฐาน

มาตรฐานนี้ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภท ฝาระบายน้ำ (Gully tops) และฝาปิดท่อระบายน้ำ (Manhole tops) ที่มีขนาดถึง 1000 มิลลิเมตร และ ใช้ติดตั้งบริเวณทางเท้าหรือบริเวณพื้นที่มีการจราจร

วัตถุประสงค์ของมาตรฐานจัดตั้งขึ้นเพื่อ นิยามจำกัดความ, การแบ่งชนิด, ประเภทของวัสดุ, ความต้องการในการออกแบบและการทดสอบ, การทำสัญลักษณ์, และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

#### 2. การแบ่งชนิด

Gully top และ Manhole top สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ A 15, B 125, C 250, D 400, E 600 และ F 900

#### 3. สถานที่ที่ใช้ในการติดตั้ง

การประมาณชนิดของ Gully top และ Manhole top ขึ้นอยู่กับสถานที่ที่นำไปติดตั้ง จากสถานที่ที่แตกต่างกันสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่ม

- กลุ่มที่ 1 (min class A15)  
พื้นที่สำหรับทางเดินเท้า และ รถจักรยาน
- กลุ่มที่ 2 (min class B 125)  
พื้นที่สำหรับทางเดินเท้า พื้นที่จอดรถยนต์
- กลุ่มที่ 3 (min class C 250)  
สำหรับ Gully top ที่ติดตั้งในบริเวณช่องขอบถนน (ดังรูป 9a) ซึ่งสามารถวัดจากขอบยึดออกไป 0.5 เมตรถึงถนนหลวง และ 0.2เมตร ถึงทางเดินเท้า
- กลุ่มที่ 4 (min class D 400)  
พื้นที่บริเวณถนนทางหลวง , ไหล่ทาง (ดังรูป 9b) และ บริเวณที่จอดรถ ทุกชนิด

- กลุ่มที่ 5 (min class E 600)  
พื้นที่ที่รับแรงมาก เช่น Docks, aircraft pavement
- กลุ่มที่ 6 (min class F 900)  
พื้นที่ที่รับแรงเฉพาะมากๆ เช่น Aircraft pavement

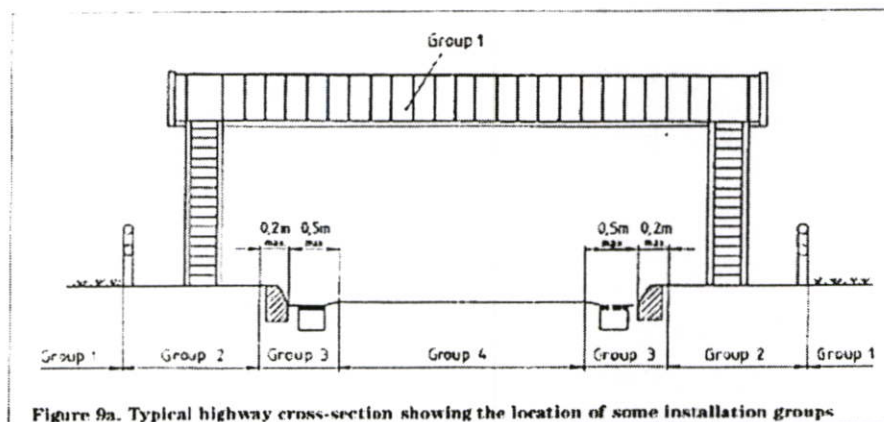


Figure 9a. Typical highway cross-section showing the location of some installation groups

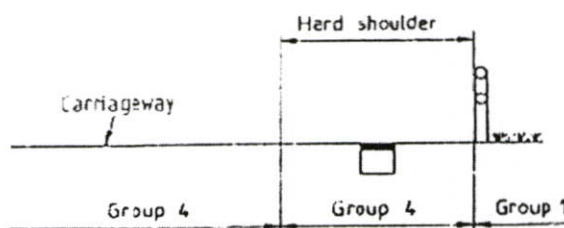


Figure 9b. Typical detail of a hard shoulder showing the location of some installation groups

## 4. วัสดุ

### 4.1 ทั่วไป

#### 4.1.1 Manhole tops และ Gully tops

Manhole tops และ Gully tops รวมถึง ตะแกรง ต้องทำจากวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

- flake graphite cast iron
- spheroidal graphite cast iron
- cast steel
- rolled steel
- วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งจาก a) – d) รวมกับคอนกรีต
- คอนกรีตเสริมเหล็กเส้น

การเลือกใช้ Rolled steel ขอมรับได้ถ้าการต้านทานต่อการกัดกร่อนเป็นที่น่าพอใจ แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการทำ Hot – dip galvanizing บนผิวที่ทำความสะอาดแล้ว ที่มีความหนาเท่ากับหรือมากกว่าค่าดังตารางที่ ก-1 ความหนาดำสุดของ Rolled steel ต้องเท่ากับ 2.75 มม.

ตารางที่ ก-1 Galvanizing coating of rolled steel

Steel thickness (mm)	Minimum coating thickness ( $\mu\text{m}$ )	Minimum coating mass ( $\text{g/m}^2$ )
$\geq 2.75$ ถึง $< 5$	50	350
$\geq 5$	65	450

#### 4.1.2 Grating

Grating ต้องทำจากวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

- flake graphite cast iron
- spheroidal graphite cast iron
- cast steel

#### 4.1.3 วัสดุอื่นๆ

สำหรับวัสดุประเภทอื่นๆ ที่ใช้ในส่วนใดส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน ต้องสอดคล้องกับความต้องการที่ระบุในมาตรฐานและวิธีการทดสอบ

#### 4.1.4 Cover filling

Cover filling ประกอบด้วยคอนกรีต หรือ วัสดุตัวเติมประเภทอื่นๆ

### 5. การทดสอบ

#### 5.1 โหลดทดสอบ

สำหรับฝาปิดท่อระบายน้ำที่มีระยะฝาเปิด (Clear Opening) เท่ากับหรือมากกว่า 250 มิลลิเมตร โหลดทดสอบของแต่ละชั้นคุณภาพจะแสดงดังตารางที่ ก-2 ส่วนสำหรับขนาดที่มีระยะฝาเปิดน้อยกว่า 250 มิลลิเมตรจะใช้ค่าตามตารางที่ ก-2 คูณด้วย C250

ตารางที่ ก-2 โหลดทดสอบ

ชั้นคุณภาพ	โหลดทดสอบ (kN)
A 15	15
B 125	125
C 250	250
D 400	400
E 600	600
F 900	900

### ภาคผนวก ข

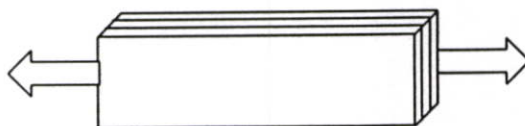
การทวนสอบการใช้ได้ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ I-DEAS 11 NX

โจทย์กำหนด

วัสดุคอมโพสิตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 60 x 120 มิลลิเมตร ประกอบด้วยลามิना 3 ชั้น ดังนี้ ลามิनाชั้นที่ 1 หนา 3 มิลลิเมตร เส้นใยวางทำมุม 0 องศา ลามิनाชั้นที่ 2 หนา 3 มิลลิเมตร เส้นใยวางทำมุม 90 องศา และลามิनाชั้นสุดท้ายหนา 3 มิลลิเมตร เส้นใยวางทำมุม 0 องศา (ดังรูปที่ ข-1) มีแรงกระทำ ขนาด 10,000 นิวตัน ดึงชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน คำนวณหาระยะยืดที่เกิดขึ้น และ  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} E_1 &= 25,000 \text{ MPa} & E_2 &= 25,000 \text{ MPa} \\ G_{12} &= 6,500 \text{ MPa} & \nu_{xy} &= 0.08 \\ \nu_{yx} &= 0.08 \end{aligned}$$



รูปที่ ข-1 ชิ้นงานคอมโพสิตที่มีแรงดึงกระทำ

#### วิธีคำนวณทางทฤษฎี

ขั้นตอนที่ 1 หาค่า  $N_x$  และ  $N_y$  จากสมการ

$$F_x = N_x * L_y \tag{1}$$

$$F_y = N_y * L_x \tag{2}$$

จากโจทย์  $F_x = 10,000 \text{ MPa}$  และ  $F_y = 0 \text{ MPa}$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ(1) และ (2) จะได้

$$10,000 \text{ N/mm}^2 = N_x * 60 \text{ mm} \text{ จะได้ } N_x = 166.67 \text{ N/mm}$$

$$0 \text{ N/mm}^2 = N_y * 120 \text{ mm} \text{ จะได้ } N_y = 0 \text{ N/mm}$$

จากสมการที่ 2.48 (บทที่2) เมื่อลามิเนตมีการจัดเรียงแบบ cross-ply สามารถลดรูปสมการเหลือ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} \\ A_{12} & A_{22} & B_{12} & B_{22} \\ B_{11} & B_{12} & D_{11} & D_{12} \\ B_{12} & B_{22} & D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

จากโจทย์ไม่มีแรงบิดเกิดขึ้น ดังนั้น  $M_x$  และ  $M_y$  เท่ากับ 0 และ  $K_x^0$  และ  $K_y^0$  เท่ากับ 0 เพราะฉะนั้น

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 หา Inverse จะได้สมการใหม่ (สมการที่ 2.49 บทที่ 2) ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \end{Bmatrix} \quad (5)$$

หาค่า  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  และ  $a_{12}$  จากสมการ (6)

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{A_{22}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \\ a_{22} &= \frac{A_{11}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \\ a_{12} &= \frac{-A_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (Z_k - Z_{k-1}) \quad (7)$$

และสามารถหาค่า  $\bar{Q}_{ij}$  ได้จากสมการที่ 2.16 และ 2.20 (บทที่ 2) จะได้ค่า

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= 25,161.03 \text{ N/mm}^2 \\ \bar{Q}_{12} &= 2,012.88 \text{ N/mm}^2 \\ \bar{Q}_{22} &= 25,161.03 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

แทนค่า มุมที่ 0 องศา จะได้ค่า

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11}(0) &= 25,161.03 \text{ N/mm}^2 \\ \bar{Q}_{12}(0) &= 2,012.88 \text{ N/mm}^2 \\ \bar{Q}_{22}(0) &= 25,161.03 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

แทนค่า มุมที่ 90 องศา จะได้ค่า

$$\bar{Q}_{11}(90) = 25,161.03 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{Q}_{12}(90) = 2,012.88 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{Q}_{22}(90) = 25,161.03 \text{ N/mm}^2$$

นำค่า  $\bar{Q}_{ij}$  ที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 7 หาค่า  $A_{ij}$  จะได้

$$A_{11} = 226,449.28 \text{ N/mm}$$

$$A_{12} = 18,115.94 \text{ N/mm}$$

$$A_{22} = 226,449.28 \text{ N/mm}$$

หลังจากนั้นนำค่า  $A_{ij}$  ที่ได้แทนลงในสมการที่ 6 เพื่อหาค่า  $a_{ij}$  ดังนี้

$$a_{11} = 4.44 \times 10^{-6} \text{ 1/N/mm}$$

$$a_{12} = -3.56 \times 10^{-7} \text{ 1/N/mm}$$

$$a_{22} = 4.44 \times 10^{-6} \text{ 1/N/mm}$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ 5 หรือ 2.49 (บทที่ 2) เพื่อทำการหาค่า  $\epsilon_x^0$  และ  $\epsilon_y^0$  จะได้

$$\epsilon_x^0 = 0.000741$$

$$\epsilon_y^0 = -5.93 \times 10^{-5}$$

นำค่า  $\epsilon_x^0$  และ  $\epsilon_y^0$  ที่ได้แทนลงในสมการ 2.39 (บทที่ 2) เมื่อค่า  $K_x^0$ ,  $K_y^0$ ,  $K_{xy}^0$  และ  $\tau_{xy}$  มีค่า

เท่ากับ 0 แบ่งพิจารณา

ชั้นลามิเนตที่ 1 (0 องศา)

$$\sigma_x = 18.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = -0.0 \text{ N/mm}^2$$

ชั้นลามิเนตที่ 2 (90 องศา)

$$\sigma_x = -0.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = 18.5 \text{ N/mm}^2$$

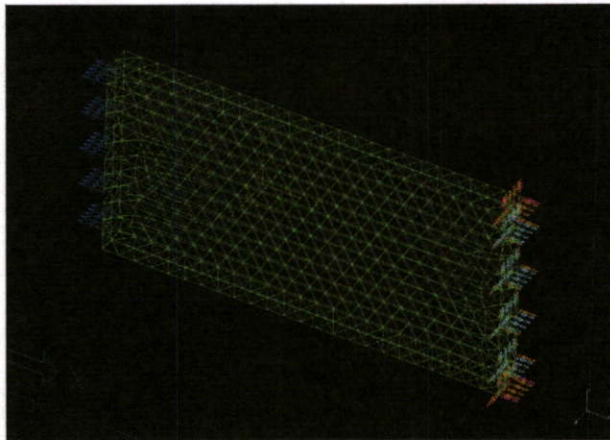
ชั้นลามิเนตที่ 3 (0 องศา)

$$\sigma_x = 18.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = -0.0 \text{ N/mm}^2$$

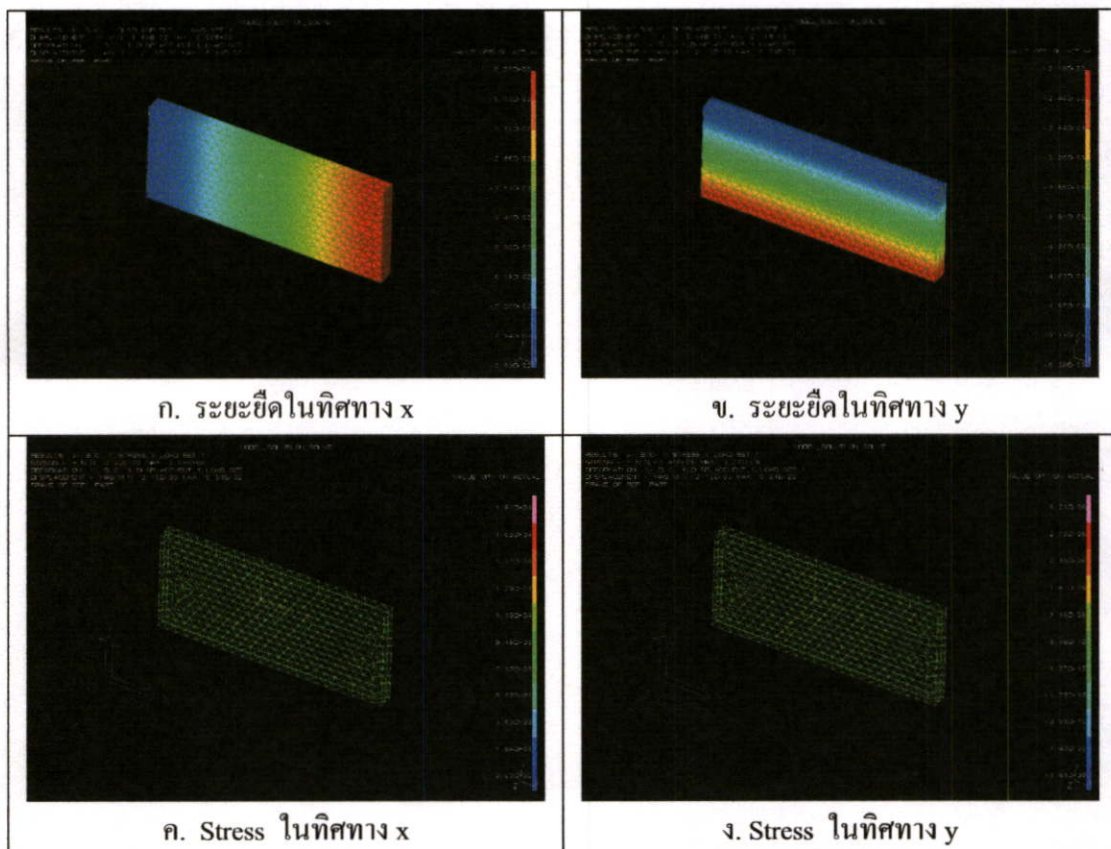
## การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1. วาดแบบและแบ่งเอลิเมนต์ กำหนด Boundary condition ดังรูป



รูปที่ ข-2 ภาพชิ้นงาน การแบ่งเอลิเมนต์ และ กำหนด Boundary condition

2. วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ได้ผลดังรูปที่ ข-3



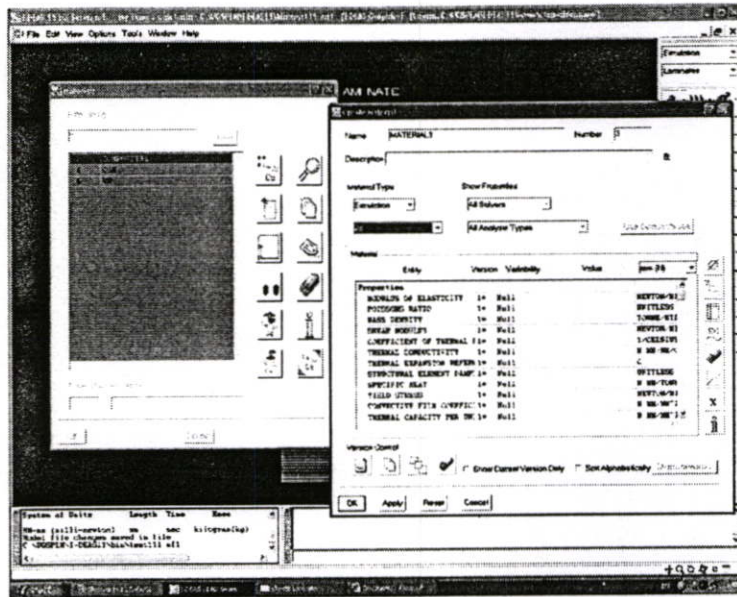
รูปที่ ข-3 ภาพผลวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ ข-1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการคำนวณ

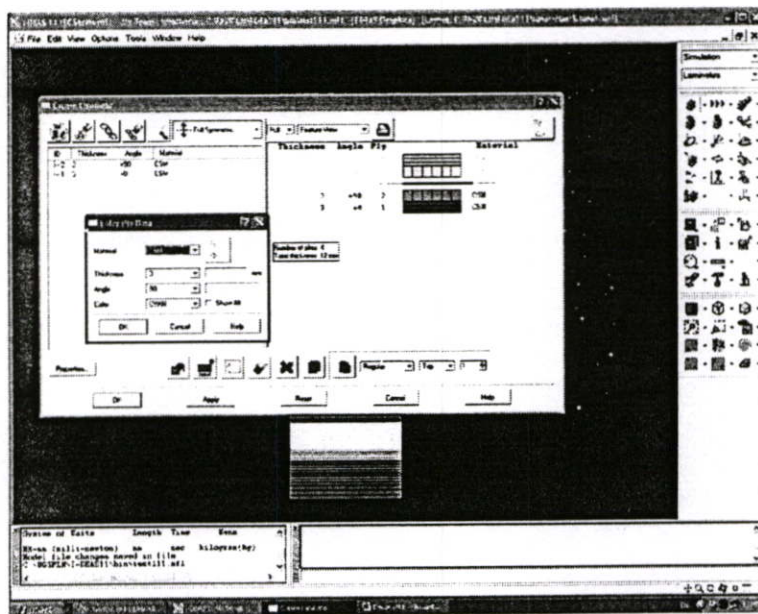
รายการ	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
ระยะยืดในแกน x (mm/mm)	0.000735	0.000741
ระยะยืดในแกน y (mm/mm)	$-5.925 \times 10^{-5}$	$-5.93 \times 10^{-5}$
Stress ในแกน x ( $N/mm^2$ )	18.4	18.5
Stress ในแกน y ( $N/mm^2$ )	$-1.91 \times 10^{-6}$	0.00

จากตารางที่ ข-1 พบว่าการคำนวณระยะยืด และความแข็งแรงในแนวแกนต่างๆ ทางทฤษฎี ให้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม I-DEAS 11 NX ดังนั้นสามารถนำโปรแกรมดังกล่าว ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัยได้





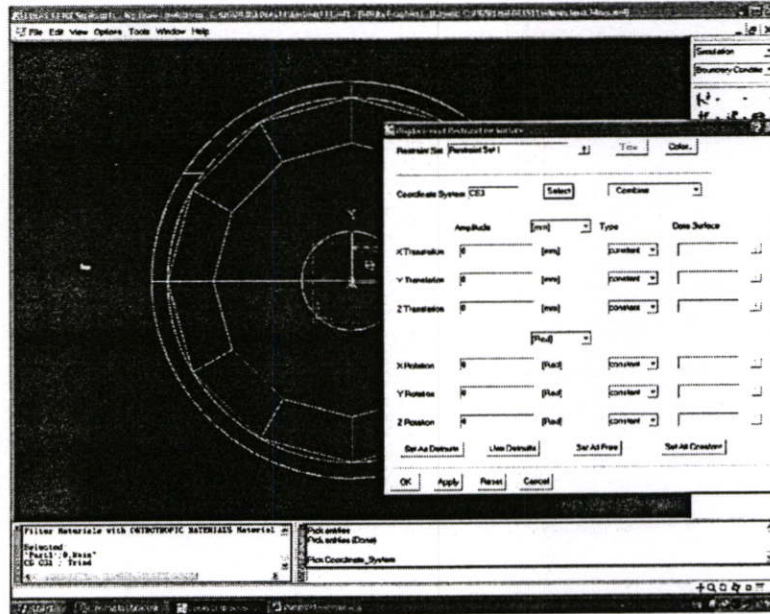
รูปที่ ค-1 (ข) การกำหนดสมบัติของแผ่นลามิना



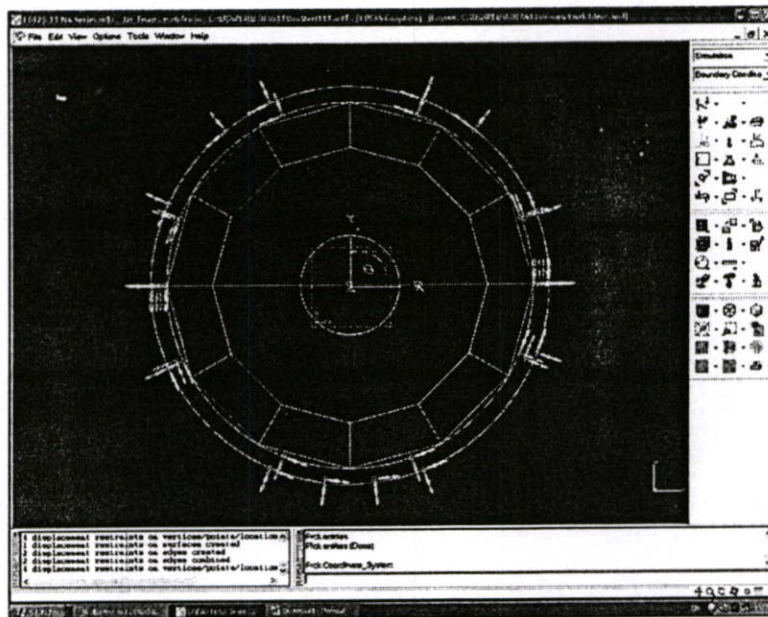
รูปที่ ค-1 (ค) การกำหนดชั้นของแผ่นลามิเนต



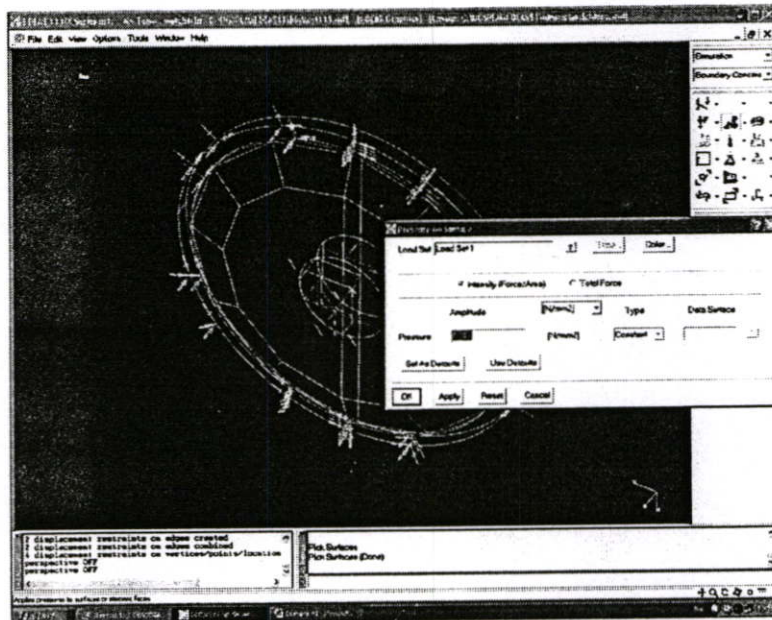
ต่อจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำหนดสภาวะการทดสอบ (Boundary Conditions) กำหนดให้ไม่มีการหมุนและการเคลื่อนที่ในทุกแกน (x-y-z) ดังรูปที่ ก-2 (ข) และ ก-2 (ค) และกำหนดค่าโหลดกระทำที่ 250 กิโลนิวตัน หรือ 5.10 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ ก-2 (ง) และ ก-2 (จ)



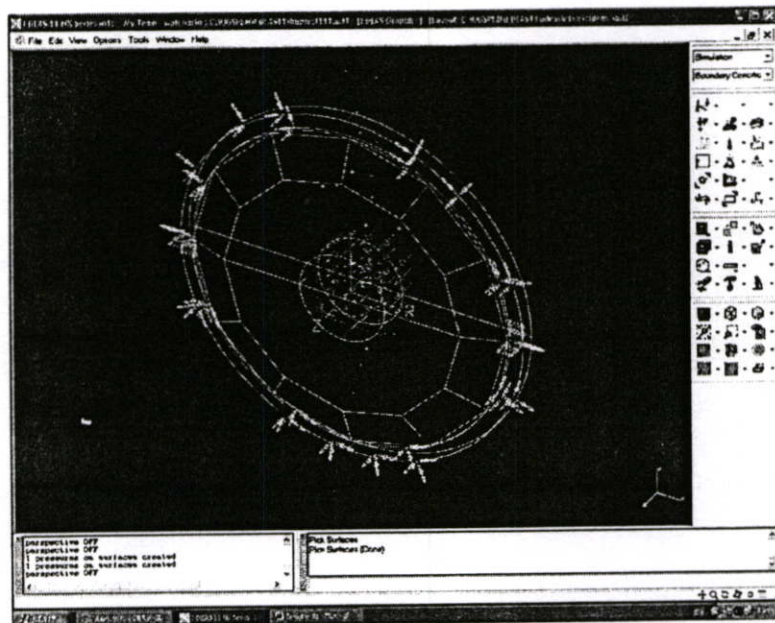
รูปที่ ก-2 (ข) การกำหนด Boundary Conditions



รูปที่ ก-2 (ค) แสดงสัญลักษณ์ Boundary Conditions



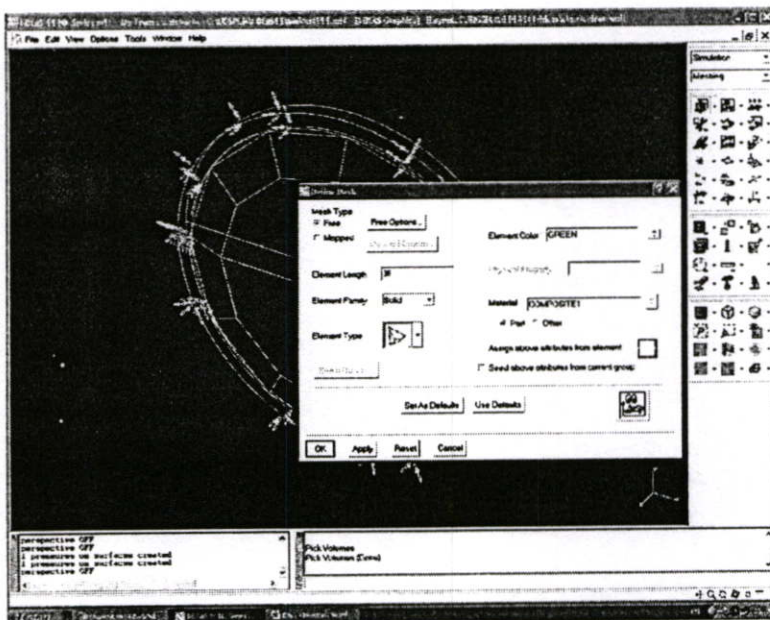
รูปที่ ค-2 (ง) การกำหนดโหลดกระทำที่ 5.10 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



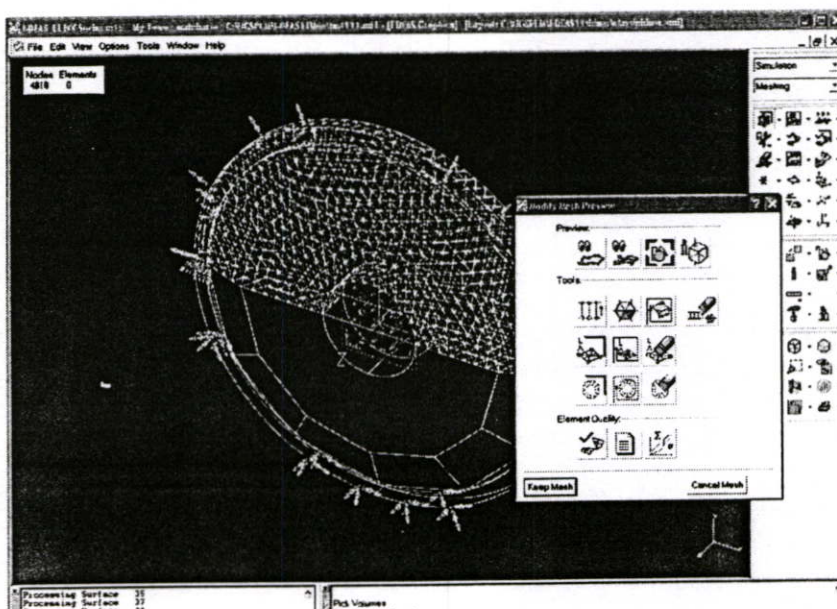
รูปที่ ค-2 (จ) การกำหนดโหลดกระทำที่ 5.10 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร  
รูปที่ ค-2 ขั้นตอนการกำหนด Boundary Conditions และ โหลดกระทำใช้งาน

**ขั้นตอนที่ 3 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อย**

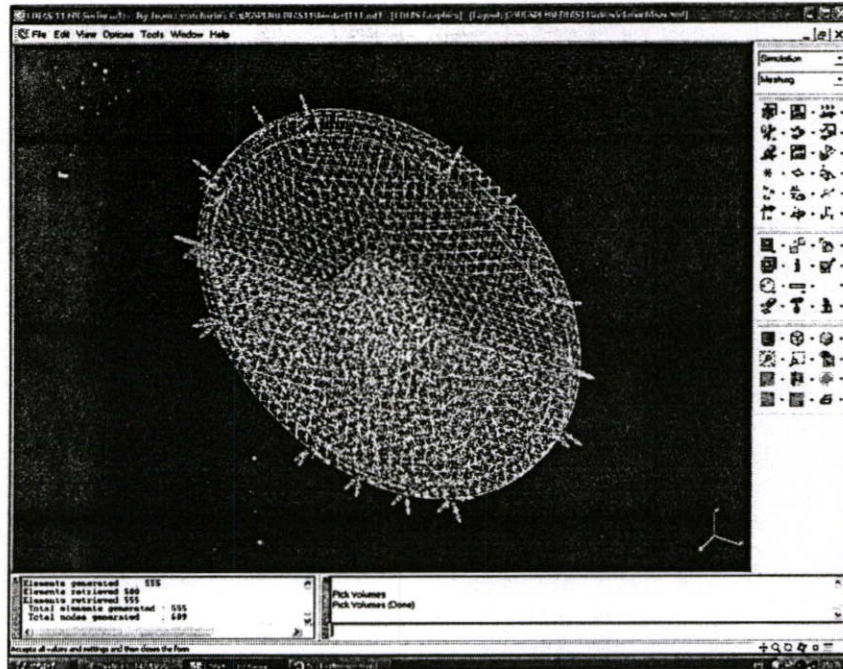
ขั้นตอนนี้จะเป็นการแบ่งเป็นโมเดลชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยชนิดของเอลิเมนต์จะเลือกเป็นแบบ Solid Mash และกำหนดให้เอลิเมนต์เรียงตัวแบบสุ่ม ซึ่งจะมีค่า Element length เท่ากับ 30 จะมีขั้นตอนดังรูปที่ ค-3 (ก) ค-3 (ข) และ ค-3 (ค)



รูปที่ ค-3 (ก) การกำหนดชนิดและขนาดของเอลิเมนต์ย่อย



รูปที่ ค-3 (ข) การกำหนดชนิดและขนาดของเอลิเมนต์ย่อย

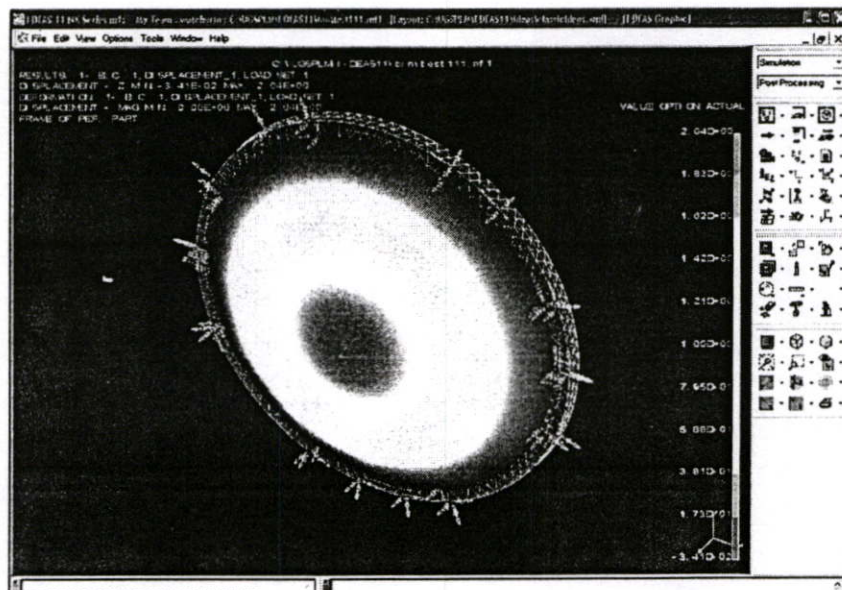


รูปที่ ค-3 (ค) เอลิเมนต์ย่อย

รูปที่ ค-3 การกำหนดชนิดและขนาดของเอลิเมนต์ย่อย

#### ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผล

เป็นขั้นตอนการเลือกผลวิเคราะห์ที่ต้องการ คือ ค่า Displacement, Stress, Strain ที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนตัวอย่างผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ ค-4





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายวัชรินทร์ มีเครือรอด  
เกิดเมื่อ วันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2521  
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร  
การศึกษา ระดับปริญญาตรี (วท.บ. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)  
จากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่  
พ.ศ. 2540 – 2544

### ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2544 - ตำแหน่งนักเคมี บริษัทไทย โดโน เคน เคน จำกัด  
พ.ศ. 2544 - 2545 ตำแหน่งหัวหน้าแผนกประกันคุณภาพ บริษัท ไทย คอม โพลีท จำกัด จังหวัดชลบุรี  
พ.ศ. 2545 – 2548 ตำแหน่งผู้จัดการแผนกวิจัยและพัฒนา บริษัทไทย คอม โพลีท จำกัด จังหวัดชลบุรี  
พ.ศ. 2550 - ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้จัดการห้องปฏิบัติการ บริษัทวิชัย คอม โพลีท จำกัด จังหวัด ชลบุรี