

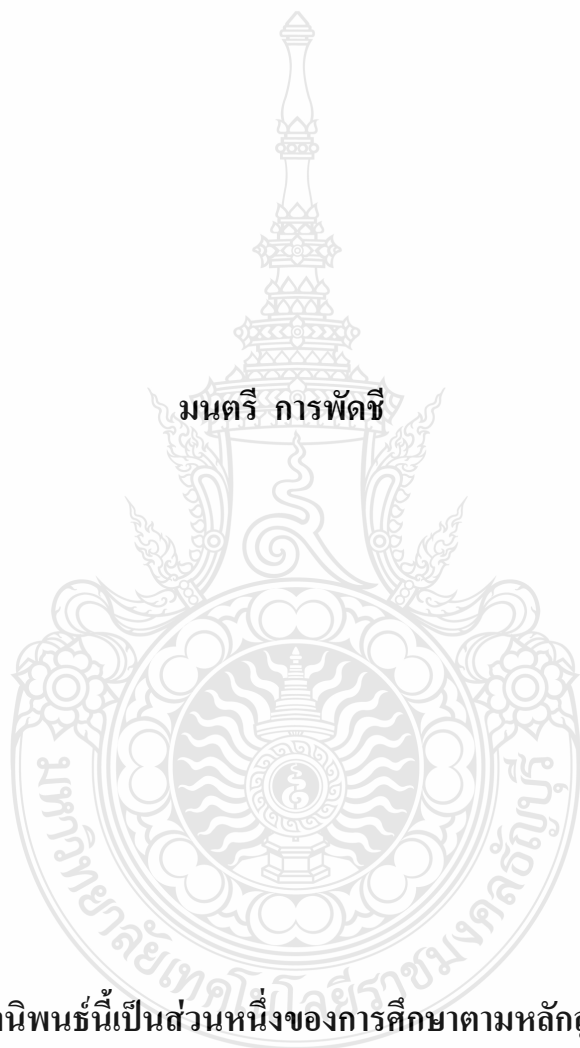
การศึกษาอิทธิพลของกาวในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแซนวิช

**INFLUENCE STUDY OF THE ADHESION FOR JOINING  
SANDWICH MATERIAL JOINT**

มนตรี การพัคซี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การศึกษาอิทธิพลของกาวในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุเซรามิก



มนตรี การพัคดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของกาวในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแกนวิช
ชื่อ - นามสกุล	นายมนตรี การพัชชี
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาความต้านทานความเค้นเฉือนและความต้านทานความเค้นดัดของโครงสร้างของวัสดุแกนวิชที่ยึดเข้าด้วยกัน โดยกาวหลายชนิด

วัสดุในการทดลองประกอบด้วยแผ่นเหล็กกล้ารีดร้อน SS400 โฟมพอลิยูรีเทน และกาวชนิดต่างๆ โครงสร้างของวัสดุแกนวิชประกอบด้วยชั้นผิวด้านนอกที่ทำจากแผ่นเหล็กกล้า SS400 และวัสดุแกนกลางที่ทำจากโฟมพอลิยูรีเทน ผิวสัมผัสของเหล็กและโฟมพอลิยูรีเทนติดเข้าด้วยกัน โดยใช้กาวที่มีความหนากำหนดเท่ากับ 200  $\mu\text{m}$  ชิ้นทดสอบที่ได้ถูกปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 8 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกล การทดสอบทางกลเป็นการทดสอบมาตรฐานการทดสอบ ASTM C273 สำหรับการทดสอบความต้านทานความเค้นแรงเฉือน และการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C393 สำหรับการทดสอบความต้านทานความเค้นดัด

ผลการวิจัยพบว่า ชนิดของกาวส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงโดยแสดงค่าการทดลอง 2,510, 2,360 และ 2,300  $\text{N/mm}^2$  สำหรับกาวอีพอกซี กาวพอลิยูรีเทนและกาวนีโอพรีน ตามลำดับ ค่าความต้านทานความเค้นดัดของชิ้นทดสอบที่ผลิตจากกาวหลายชนิดมีค่าเท่ากับ 694, 607 และ 466  $\text{N/mm}^2$  สำหรับ กาวอีพอกซี กาวพอลิยูรีเทน กาวนีโอพรีน ตามลำดับ กาวทุกชนิดที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้เป็นตัวประสานแผ่นเหล็กรีดร้อนและโฟมพอลิยูรีเทนสำหรับการผลิตโครงสร้างวัสดุแกนวิช

**คำสำคัญ :** โครงสร้างวัสดุแกนวิช กาว ความต้านทานแรงเฉือน ความต้านทานความเค้นดัด

<b>Thesis Title</b>	Influence Study of The Adhesion for Joining Sandwich Material Joint
<b>Name - Surname</b>	Mr. Montree Karnpadshee
<b>Program</b>	Manufacturing engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

This research work aims to study the shear stress resistance and a bending stress of the sandwich materials structure that were bonded by various type of glue.

The materials in this experiment were a hot rolled plate of SS400 steel, polyurethane foam and various glue types. The sandwich structure was composed of the outer layer that was SS400 steel plates and the core materials that was polyurethane foam. The interface of the steel plate and the polyurethane foam was bonded using different type of glue that had a specific thickness of 200  $\mu\text{m}$ . The sandwich specimens that were produced by various process parameters were dried at the room temperature for 8 hours before mechanical testing. The mechanical testing of the specimen was performed by following ASTM C273 standard test method for the shear stress resistance and ASTM C393 standard test method for the bending stress resistance, respectively.

The research results found that the glue type affected varying the shear stress resistance of the experimental specimen with test results of 2,510, 2,360 and 2,300  $\text{N/mm}^2$  for epoxy glue, polyurethane glue and neoprene glue, respectively. The bending stress resistance of the experimental specimens that were produced by various glue type was 694, 607 and 466  $\text{N/mm}^2$  for epoxy glue, polyurethane glue and neoprene glue, respectively. All types of the experimental glue were able to bond the hot rolled steel plate and polyurethane foam for producing the sandwich materials structure.

**Keywords:** sandwich structure, glue, shear stress resistance, bending stress resistance

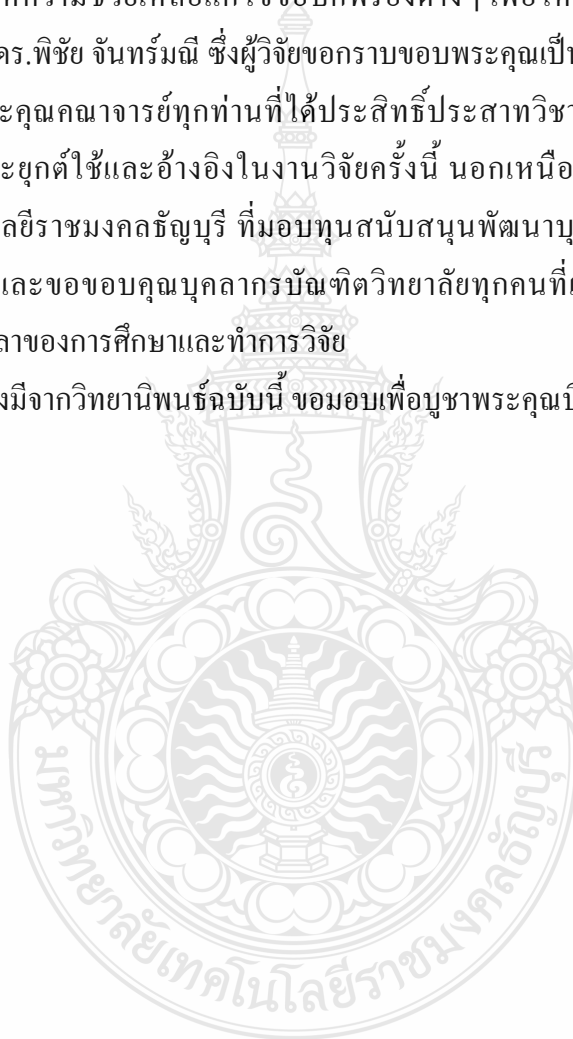
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคามเมตตากรุณาอย่างสูงจากที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล ประธานกรรมการ ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล กรรมการ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้ คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความ สมบูรณ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาใน การศึกษาของผู้วิจัย และขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และ ให้ความ ช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

มนตรี การพัคดี



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์วิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กาว (Adhesive).....	3
2.2 การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (Solid Samples).....	16
2.3 โครงสร้างแซนวิช (Sandwich Structure).....	21
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.2 โฟมที่นำมาทำเป็นแกนกลาง (Core).....	32
3.3 แผ่นประกบบนและล่าง (Face).....	32
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของกาว.....	32
3.5 การเชื่อมประกบด้วยกาว.....	34
3.6 การทดสอบความเค้นเฉือน (Shear Stress).....	37
3.7 การทดสอบความเค้นแรงดัด (Bending Stress).....	39
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	40
4.1 ผลการทดลอง.....	40

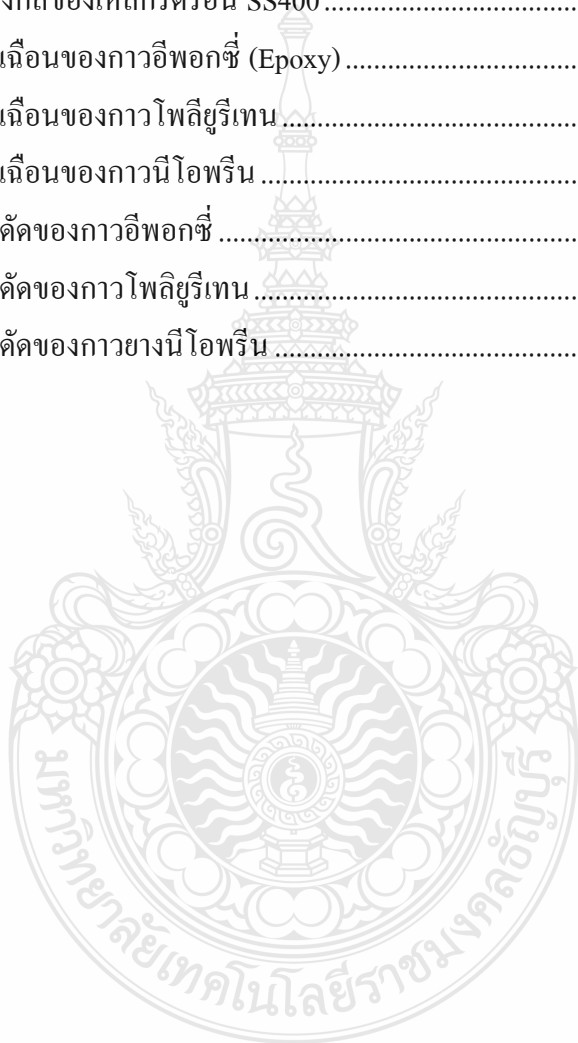
## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผลวิจัย .....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	52
รายการอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	56
ประวัติผู้เขียน.....	64



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของกาวนิโอพรีน .....	4
2.2	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอ .....	5
2.3	องค์ประกอบพื้นฐานของกาวอะไครเลท .....	10
3.1	คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกรีดร้อน SS400 .....	32
4.1	ค่าความเค้นเหนือนของกาวอีพอกซี (Epoxy) .....	40
4.2	ค่าความเค้นเหนือนของกาวโพลียูรีเทน .....	41
4.3	ค่าความเค้นเหนือนของกาวนิโอพรีน .....	41
4.4	ค่าความเค้นดัดของกาวอีพอกซี .....	42
4.5	ค่าความเค้นดัดของกาวโพลียูรีเทน .....	43
4.6	ค่าความเค้นดัดของกาวยางนิโอพรีน .....	43





## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	อีพอกซีเรซินทางการค้าที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น DGEBA.....	7
2.2	เตตระไกลซิดิล ไดอะมีโนไดฟีนิลมีเทน (Tetraglycidyl Diaminodiphenylmethane).....	7
2.3	ปฏิกิริยาของไพมารีเอมีนกับอีพอกซี 2 หมู่.....	8
2.4	สารเชื่อมขวางเอมีนชนิดอะลิฟาติก.....	8
2.5	สารเชื่อมขวางเอมีนชนิดอะโรมาติก.....	9
2.6	ปฏิกิริยาระหว่างฟินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นรีโซล.....	9
2.7	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอไม.....	12
2.8	ตัวอย่างการเกิดกระบวนการเชื่อมขวางของกาวอีพอกซีกับพอลิฟังก์ชันนัลเอมีน.....	14
2.9	กลไกการเกิด ปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยแสง.....	16
2.10	ชนิดของวัสดุแกนวิช.....	22
2.11	การเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุแกนวิช.....	22
2.12	พฤติกรรมการรับแรงของวัสดุแกนวิช.....	23
2.13	โครงสร้างรถไฟฟ้า MRT ที่ผลิตจากวัสดุแกนวิช.....	24
2.14	Sign Convention สำหรับวัสดุแกนวิช.....	25
2.15	ลักษณะความเค้นแรงดึง-แรงอัดและความเค้นเฉือน.....	26
2.16	การเปลี่ยนรูปของวัสดุแกนวิชภายใต้ความเค้นเฉือน.....	27
3.1	ชนิดของกาวอีพอกซี.....	30
3.2	ชนิดของกาวโพลียูรีเทน.....	31
3.3	ชนิดของกาวยางนีโอพรีน.....	31
3.4	โพลียูรีเทนโฟมที่นำมาทำเป็นแกนกลาง (Core).....	32
3.5	ขั้นตอนทดสอบความเค้นเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273.....	33
3.6	ขั้นตอนทดสอบความเค้นดัดตามมาตรฐาน ASTM C393.....	33
3.7	ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยสารละลายอะซิโตน.....	34
3.8	การผสมของกาวที่เป็นแบบ Two-Component Resins.....	34
3.9	อุปกรณ์ควบคุมความหนาในการตากาว 200 $\mu\text{m}$ .....	35
3.10	การตากาวให้ได้ความหนา 200 $\mu\text{m}$ .....	35
3.11	ชิ้นงานที่ตากาวแล้ว.....	35

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.12 ประกอบโครงสร้างวัสดุเซนวิช .....	36
3.13 การอัดประสานด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก .....	36
3.14 ชั้นทดสอบที่ประกอบเป็นโครงสร้างวัสดุเซนวิช ตามมาตรฐาน ASTM C273 .....	36
3.15 ชั้นทดสอบที่ประกอบเป็นโครงสร้างวัสดุเซนวิช ตามมาตรฐาน ASTM C393 .....	37
3.16 เครื่องทดสอบแรงเค้นและแรงคัด GOTECH .....	38
3.17 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความเค้นเค้น .....	39
3.18 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความเค้นคัด .....	39
4.1 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นเค้นที่เชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซี .....	44
4.2 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นเค้นที่เชื่อมประกบด้วยกาวโพลียูรีเทน .....	44
4.3 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นเค้นที่เชื่อมประกบด้วยกาวนิโอพรีน .....	45
4.4 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นคัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซี .....	45
4.5 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นคัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวโพลียูรีเทน .....	46
4.6 การเสียหายของชั้นทดสอบความเค้นคัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวยางนิโอพรีน .....	46
4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเค้นเค้นของกาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทนและกาวยาง นิโอพรีน .....	47
4.8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงคัดของกาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทน และกาวยางนิโอพรีน .....	48
4.9 ความเสียหายของชั้นทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นเค้น .....	49
4.10 ความเสียหายของชั้นทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นคัด .....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุแซนวิช มีการใช้งานวัสดุมาตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 แต่ได้รับความนิยมในการนำมาสร้างโครงสร้างของเรือ ซึ่งปัจจุบันนี้วัสดุแซนวิชถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานพาหนะ เพื่อการคมนาคมขนส่งตัวอย่างเช่น เครื่องบินแอร์บัส A380 ซึ่งเป็นเครื่องบินขนาดใหญ่ที่สุดของโลก ได้นำเอาเทคโนโลยีวัสดุวัสดุแซนวิชมาทำโครงสร้างของลำตัวเครื่องบินหรือ รถไฟฟ้าความเร็วสูง ICE (450 กิโลเมตร/ชั่วโมง) ของประเทศเยอรมันนี วัสดุแซนวิชก็ถูกนำมาสร้างลำตัวของรถไฟฟ้า สำหรับรถยนต์ เช่น Mercedes-Benz A-Class หรือ Audi A6 ก็ได้ นำวัสดุแซนวิชมาใช้ทำแผ่นรองฐานด้านล่าง เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยแล้วตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาวัสดุแซนวิช คือ รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRT) ซึ่งผลิตจากประเทศเยอรมันนี แต่ชิ้นส่วนถูกผลิตขึ้นจากประเทศออสเตรีย ซึ่งชิ้นส่วนนั้นคือ โครงสร้างลำตัวของรถไฟฟ้า

โครงสร้างแซนวิช (Sandwich Structure) เป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นประกบด้านบนและด้านล่าง (Faces) มีความบางแต่มีความแข็งแรงสูง ส่วนแกนกลาง (Core) เป็นวัสดุอ่อน [1] วัสดุแซนวิชถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยมีคุณสมบัติเด่นคือ มีโครงสร้างเบา (Lightweight Construction) แผ่นประกบรับความเค้นดึง และความเค้นอัด ส่วนแกนกลางรับความเค้นเฉือนเท่านั้น [2]

โดยทั่วไปโครงสร้างของวัสดุแซนวิชจะถูกเชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซีเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำกาวชนิดต่างๆที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด มาทำการวิจัยเพื่อให้ได้กาวที่ดีที่สุดในการเชื่อมประกบของวัสดุแซนวิช ว่ามีกาวชนิดไหนบ้างที่ใช้กับโครงสร้างวัสดุแซนวิช

### 1.2 วัตถุประสงค์วิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการต้านทานความเค้นเฉือนของกาวในโครงสร้างวัสดุแซนวิช
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการต้านทานความเค้นดัดของกาวในโครงสร้างวัสดุแซนวิช
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเชื่อมประกบของกาวในวัสดุต่างชนิดกัน

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

#### 1.3.1 กาวที่ใช้ในการศึกษามี 3 ประเภท

- 1) กาวอีพอกซี (Epoxy)
  1. กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า
  2. กาวอีพอกซีแบบทนเคมี
  3. กาวอีพอกซีแบบทนน้ำ
- 2) กาวโพลียูรีเทน (Polyurethan Glue)
  1. กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโทลูอีน
  2. กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอีน
  3. กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-Component Resins
- 3) กาวยางนีโอพรีน (Neoprene Rubber Glue)
  1. กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอีน
  2. กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอีน
  3. กาวยางนีโอพรีนแบบ Two-Component Resins.
- 4) แผ่นประกบบนและล่าง (Face) ทำจากเหล็กกรีดร้อน SS400 มี 2 ขนาด
  1. ขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 320 มม. และหนา 16 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C297
  2. ขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 400 มม. และหนา 1 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C393

#### 1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกลของกาว

- 1) การทดสอบความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C297
- 2) ทดสอบความต้านทานแรงคด (Bending Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C393

### 1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.4.1 สามารถทราบถึงการเชื่อมประกบแบบใช้กาวได้
- 1.4.2 สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองไปเลือกใช้กาวที่เหมาะสมได้
- 1.4.3 สามารถทราบถึงการเชื่อมประกบแบบใช้กาวของวัสดุต่างชนิดกันได้
- 1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับผู้สนใจในการศึกษาวิจัยพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุ  
แขนงวิชต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กาว (Adhesive) [3-4]

หมายถึง วัสดุที่ใช้เชื่อมแซม หรือติดวัตถุสองชิ้นเข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อทากลงบนพื้นผิวของวัตถุสองชิ้นแล้วทำให้วัตถุสองชิ้นติดกันและทนทานต่อการแยกวัตถุสองชิ้นออกจากกัน และบางกรณีอาจรวมถึงวัสดุบางประเภทที่ไม่จัดว่าเป็นกาว เช่น มอร์ต้าและเหล็กผสม ซึ่งไม่จัดอยู่ในสานประเภทเดียวกันกับกาวแต่มีลักษณะของการติดแน่นอยู่ด้วยกัน และกาวอาจรวมถึงสีและหมึกพิมพ์

องค์ประกอบของกาวส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ หรือบางกรณีจะมีสารประกอบหนึ่งหรือมากกว่าที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกันแล้วได้เป็นพอลิเมอร์ กาวที่นำไปใช้งานมักเป็นของเหลวและจะยึดเกาะกันได้เมื่อโมเลกุลชิดกันมากขึ้นมีลักษณะเป็นสารชั้นหนืด และแข็งติดกันเป็นของแข็งที่สุด ยกเว้นกรณีของกาวชนิดที่ไวต่อความดันจะไม่แข็งยังเป็นของเป็นของเหลวเช่นเดิม

กาวสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะวิธีการแข็งตัวของกาว ซึ่งอาจเกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย การระเหยของน้ำ การเย็นลง หรือเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยในการแข็งตัวแต่ละครั้งพอลิเมอร์ที่อยู่ในกาวสามารถเป็นแบบโซ่ตรงหรือแบบโครงตาข่าย 3 มิติได้ และการที่เป็นโครงตาข่าย 3 มิติ จะทำให้พอลิเมอร์ทนต่อการละลาย การหลอมเหลว และลดการคืบ (Creep) ได้เป็นอย่างดี กระบวนการเชื่อมขวางเป็นโครงสร้าง 3 มิติของกาวเกิดขึ้นภายในระบบของกาว และจะเกิดการยึดเกาะที่จุดสัมผัสกับพื้นผิวโดยมีแรงแวนเดอร์ วาล์วเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการยึดเกาะกันเนื่องจากเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมและโมเลกุล ประเภทของกาวแบ่งตามกระบวนการเชื่อมขวางได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

##### 2.1.1 กาวที่เกิดกระบวนการเชื่อมขวางโดยการระเหยของตัวละลาย (Adhesives Which Harden by Loss of Solvent)

กาวทั่วไปที่รู้จักกันดีคือกาวชนิดที่ผสมสารละลายซึ่งเป็นสารละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายอินทรีย์ พื้นผิวสองชนิดเกิดพันธะต่อกันได้เนื่องจากการระเหยของตัวทำละลายและทำให้พื้นผิวทั้งสองกดอัดเข้าด้วยกันและยึดเกาะกัน เช่น กาวนีโอพรีน (Neoprene, Polychloroprene) ซึ่งมีความเหนียวที่ดี เกิดพันธะได้เร็วและแข็งแรง รวมถึงทนต่อน้ำมันและสารเคมี โดยองค์ประกอบของกาว นีโอพรีนแสดงดังตารางที่ 2.1

พอลิคลอโรพรีนเป็นองค์ประกอบหลักของกาวนีโอพรีนซึ่งไม่เสถียรและสามารถเสื่อมสภาพเป็นไฮโดรเจนคลอไรด์อิสระโดยออกไซด์ของโลหะ สารต้านอนุมูลอิสระจะช่วยลดการเสื่อมสภาพของคลอโรพรีนได้ เรซินมีความแข็งแรงในการยึดเกาะดีขึ้น โดยใช้ไดไอโซไซยานเนต

(Diisocyanate, e.g. Diphenylmethane Diisocyanate, DDM) ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางเพียง 1 – 25% สารเชื่อมขวางนี้จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา แต่ยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเกิดผ่านกลไกใด กาวนิโอพรีนมักใช้เป็นกาวทาพื้นรองเท้า กาวอุดเรือ และเป็นตัวเชื่อมระหว่างยางกับโลหะ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกาวนิโอพรีน [3]

องค์ประกอบ	ส่วนในร้อยละของเรซิน (phr)
พอลิคလိုโรพรีน (Polychloroprene)	100
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	4 – 8
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)	5
สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant: Buylate Hydroxytoluene, BTH)	2
เรซิน (P-Tert-Butyl Phenolics)	30 – 50
ตัวทำละลาย (สารละลายผสมของอะซิโตน เฮกเซน และ โทลูอิน)	600

### 2.1.2 กาวที่เกิดกระบวนการเชื่อมขวางโดยการระเหยของน้ำ (Adhesives which Harden by Loss of Water)

กาวชนิดนี้ผลิตมาเพื่อตอบสนองการควบคุมความปลอดภัยทั้งในด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ที่ต้องการลดหรือกำจัดการใช้ตัวทำละลายที่ใช้ในกาว ซึ่งในอุตสาหกรรมกาวได้พัฒนาระบบของกาวโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายแทนตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาในเรื่องของอัตราการระเหยช้าของน้ำเนื่องจากน้ำใช้ความร้อนสูง (High Enthalpy) ในการระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอระหว่างน้ำกับสารละลายอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.2 และอีกหนึ่งปัญหาที่พบคือหลังจากแห้งแล้วกาวสามารถดูดซับน้ำได้ดีและไวต่อการสัมผัสกับน้ำทำให้รอยต่อไม่แข็งแรง

ตารางที่ 2.2 ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอ [3]

ตัวทำละลาย	$\Delta H_v / Jg^{-1}$
น้ำ (Water)	2440
อะซิโตน (Acetone)	534
เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate)	404
เฮกเซน (N - Hexane)	508
โทลูอีน (Toluene)	413

1) สารละลายน้ำและแป้งเปียก (Water Solutions and Pastes)

แป้งมีราคาถูกและหาได้ง่าย ซึ่งแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งที่มาหลักสำหรับใช้ผลิตกาวโดยกาวที่ได้จากแป้งข้าวโพดส่วนใหญ่มักใช้กับกระดาษ กระดาน และเส้นใย รวมถึงติดกระดาษลูกฟูก ลูกกระดาษ กระดาษบุผนังและเพดาน (Wallpaper)

2) กาวลาเท็กซ์ (Latex Adhesives)

กาวลาเท็กซ์เป็นกาวที่ได้จากการทำปฏิกิริยาแบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerisation) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีขาว ประกอบด้วยอนุภาคของพอลิเมอร์ สารคงสภาพที่นิยมใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออน โดยมีอิมัลชันจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตร และมีปริมาณน้ำ 50 – 55% พอลิเมอร์ลาเท็กซ์มักมีส่วนผสมของพอลิไวนิลอะซิเตท (PVA) นิยมใช้เป็นทั้งสารเคลือบผิวและกาว โดยจะป้ายกาวลาเท็กซ์ลงบนพื้นผิวและเกิดเป็นฟิล์มบางเมื่อน้ำระเหยไปอุณหภูมิต่ำที่สุดที่กาวลาเท็กซ์สามารถเกิดฟิล์มได้เรียกว่าอุณหภูมิต่ำสุดในการเกิดฟิล์ม (Minimum Film-Forming Temperature, MFT) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้กับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วมาก

กาวลาเท็กซ์บางครั้งรู้จักกันในชื่อกาวสำหรับไม้เป็นกาวพีวีเอ (PVA latex) ในกรณีนี้กาวจะแข็งโดยการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปในช่องว่างของไม้ และเพื่อลดความแข็งเปราะของกาวทำได้โดยการใส่สารเพิ่มความเปราะพลาสติก (Plasticizer) ชนิดพลาทาเลท และเนื่องจากกาวชนิดนี้เป็นกาวที่ไวต่อการสัมผัสกับน้ำจึงเหมาะที่จะใช้สำหรับงานในร่มเท่านั้น ตัวอย่างอื่น เช่น ก๊อปปี้เด็กซ์ (Copolydex) ที่เป็นกาวจากยางธรรมชาติที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำให้คงตัว

2.1.3 กาวที่เกิดกระบวนการเชื่อมขวางโดยการทำให้เย็นลง (Adhesives which Harden by Cooling)

กาวหลอมเหลวด้วยความร้อนเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้งานในลักษณะของเหลวร้อน และสร้างพันธะได้อย่างรวดเร็วเมื่อเย็นตัวลง สามารถใช้งานได้กับกระดาษ กระดาน ไม้ และพลาสติกบางชนิด

แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้งานกับโลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีและรวดเร็วจะทำให้กาวแข็งตัวได้น้อยลง

#### 1) เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene Vinyl Acetate Hot Melts, EVA)

พอลิเมอร์ผสมแบบสุ่มชนิดเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) จะประกอบด้วยไวนิลอะซิเตทอยู่ 30% ซึ่งผลของการเติมไวนิลอะซิเตท (VA) ในพอลิเอทิลีนเพื่อที่จะลดความเป็นผลึกและเพิ่มความมีขั้วให้กับพอลิเอทิลีน โดยความหนืดเมื่อหลอมจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล การเติมสารเพิ่มความเหนียว (Tackifiers) จะทำให้ความหนืดลดลงและทำให้ยึดติดกับพื้นผิววัสดุได้ดีขึ้น นอกจากนี้สามารถเติมขี้ผึ้งเพื่อเป็นการลดต้นทุนและลดความหนืดของกาวได้ ในขณะที่สารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) สามารถลดต้นทุนได้แต่จะทำความหนืดของกาวเพิ่มขึ้น

กาวชนิดนี้จำเป็นต้องเติมสารต้านอนุมูลอิสระเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของกาวระหว่างการนำไปใช้งานและเพื่อยืดอายุการใช้งาน สารต้านอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ได้แก่ บิวทิลเลต ไฮดรอกซีโทลูอีน (Butylated Hydroxytoluene, BHT) แต่เนื่องจากเป็นสารระเหยกลายเป็นไอได้รวดเร็วจากความร้อนของกาวที่หลอมด้วยความร้อน กาวชนิดนี้มักใช้งานกับกล่องกระดาษแข็ง หนังสือเย็บเล่ม กาวยาขอบกระดาษ เป็นต้น

#### 2) พอลิเอไมด์ (Polyamide Hot Melts)

กาวพอลิเอไมด์ที่หลอมด้วยความร้อนมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าไนลอนทั้งนี้ผลมาจากการผสมมอนอเมอร์ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของหมู่  $N-H-O=C$  ลดลง กาวพอลิเอไมด์สามารถทนต่อความร้อน ได้ดีกว่ากาวเอทิลีนไวนิลอะซิเตทแต่มีราคาสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีความเหนียวดีกว่ากาวเอทิลีนไวนิลอะซิเตทโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารปรับแต่ง

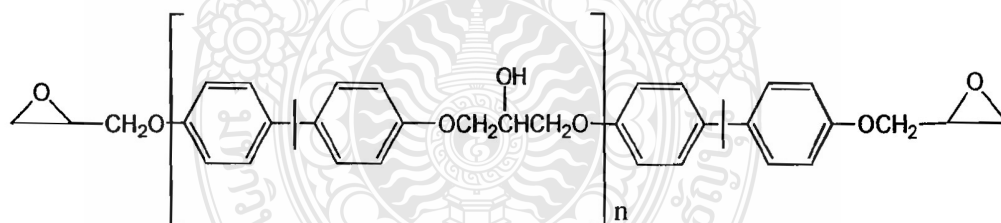
#### 2.1.4 กาวที่เกิดกระบวนการเชื่อมขวางโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Adhesives which Harden by Chemical Reaction)

##### 1) อีพอกซี (Epoxy)

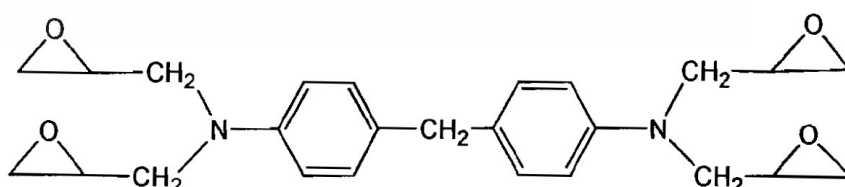
กาวอีพอกซีเป็นกาวที่รู้จักและใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับงานโครงสร้าง หรืองานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง โดยตัวอีพอกซีเรซินที่ใช้ในทางการค้ามีเพียงไม่กี่ชนิดแต่สามารถผสมกับสารทำให้แข็ง (Hardeners) ได้หลากหลายชนิด เช่น เอมีน (Amines) และ กรดแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydrides) จัดอยู่ในประเภทกาวสังเคราะห์พวกเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Type) กาวชนิดนี้มีข้อดี คือ ปราศจากสารระเหยเมื่อเกิดการเชื่อมขวางเป็นของแข็งและมีการหดตัวต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ระบายเคืองต่อผิวหนัง อีพอกซีเรซินส่วนมากที่ใช้ในทางการค้ามีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นไดโกล



ซิติลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (Diglycidylether of Bisphenol-A, DGEBA) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 เมื่อ  $n$  มีค่าประมาณ 0.2 โดยที่ผลิตภัณฑ์ทั่วไปมีลักษณะเป็นของเหลว โครงสร้างตัวอย่างอีพอกซีเรซินทางการค้าอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 กาวอีพอกซีเป็นกาวที่มีสมบัติในการติดประสานดีเยี่ยม มีความแข็งแรงในการยึดประสานสูงมากนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม อากาศยาน และอุตสาหกรรมทั่วไป เรซินอีพอกซี (Eposy-EP) ได้ชื่อมาจากกลุ่มอีพอกไซด์ (Cyclic คำว่า cyclic หมายถึง กลุ่มนี้เป็นโมเลกุลรูปห่วงสามเหลี่ยม) ที่มีต่ออยู่ที่ท้ายโมเลกุล ออกซิเจนที่อยู่ในโซ่คาร์บอนและกลุ่มอีพอกไซด์ที่อยู่ปลายโซ่คาร์บอนทำให้เรซินอีพอกซีมีสมบัติที่เป็นประโยชน์มากมาย อีพอกซีเหนียว ทนต่อการสึกกร่อนมาก และไม่หดตัวระหว่างที่แห้งตัวพันธะที่เชื่อมกันระหว่างโมเลกุลของอีพอกซีจะเกิดขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้แข็งได้สลายไปทำให้ได้เป็นโครงสร้างตาข่ายโมเลกุลสามมิติ เพราะความแข็งของพันธะ เรซินอีพอกซีจึงใช้เป็นเคลือบผิว และวัสดุประสาน อีพอกซีมีการใช้งานที่สำคัญในอุตสาหกรรมยานอวกาศ ส่วนประกอบอากาศยานทั้งหมด ทำจากอีพอกซี อีพอกซีใช้ทำผิวปีกเครื่องบินรบเอฟ-18 และเอฟ-22 รวมเป็น horizontal stabilizer ของเครื่องบินรบเอฟ-16 และเครื่องบินทิ้งระเบิดบี -1 นอกจากนั้นแล้ว เกือบยี่สิบเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเครื่องบินเจ็ทแฮร์ริเออร์มีการเสริมรอบตัวถังด้วยกาวอีพอกซี เนื่องจากความสามารถในการทนต่อสารเคมีของอีพอกซีและสมบัติในการเป็นฉนวนที่เยี่ยมยอด ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์เช่นเครื่องถ่ายทอดภาวะกระแสไฟ (Relay) คอยล์รวมทั้งหม้อแปลงก็มีฉนวนเป็นอีพอกซี

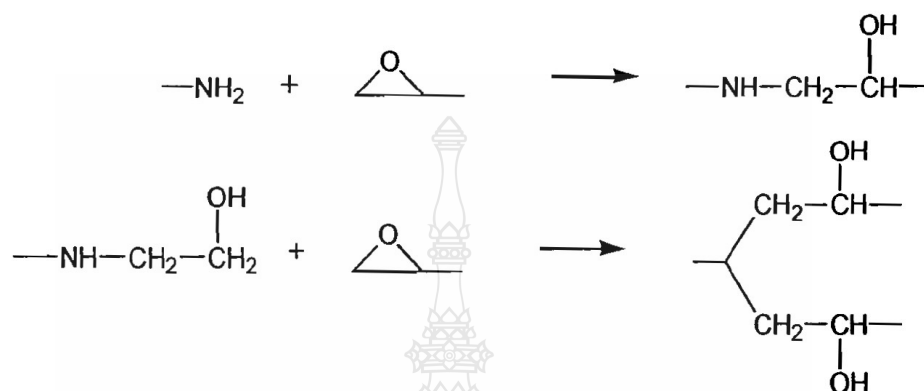


ภาพที่ 2.1 อีพอกซีเรซินทางการค้าที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น DGEBA



ภาพที่ 2.2 เตตระไกลซิติล ไดอะมีโนไดฟีนิลมีเทน (Tetraglycidyl Diaminodiphenylmethane)

เอมีนทั้งชนิดอะโรมาติก (Aromatic) และอะลิฟาติก (Aliphatic) ถูกใช้เป็นสารที่ทำให้แข็ง (Hardeners) ซึ่งสัดส่วนการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกไซด์กับไฮโดรเจนอะตอมของเอมีน คือ 1:1 โดยเกิดผ่านการปฏิกิริยาของหมู่ไพรมารีเอมีน (Primary Amine) กับวงอีพอกไซด์แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาของไพรมารีเอมีนกับอีพอกไซด์ 2 หมู่

ตัวอย่างสารเชื่อมขวาง (Curing agent) เอมีนชนิดอะลิฟาติก ได้แก่ ไตรเอทิลีนเตตระมีน (Triethylene Tetramine, TETA) ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 6 หมู่ และบิสอะมิโนพโรพิลเตตราออกซาสไปโรนเดเคน (Bis (Aminopropyl) Tetraoxaspiro undecane) ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 4 หมู่ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



triethylene tetramine

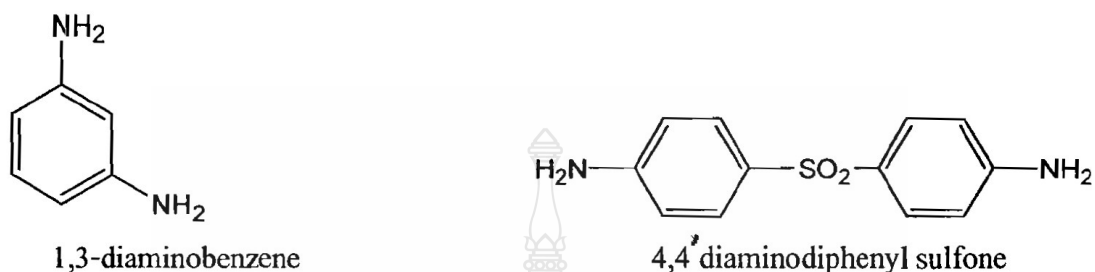


3,9-bis (aminopropyl) -2,4,8,10-tetraoxaspiro (5,5) undecane

ภาพที่ 2.4 สารเชื่อมขวางเอมีนชนิดอะลิฟาติก

กาวอีพอกซ์กับเอมีนชนิดอะลิฟาติกสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ที่อุณหภูมิห้องและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาสามารถถูกเร่งได้โดยความร้อน เช่น จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 14 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง หรือ 3 ชั่วโมงที่ 80°C ในกรณีของกาวอีพอกซ์กับเอมีนชนิดอะโรมาติก จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 2 ชั่วโมงที่ 150°C ซึ่งจะได้กาวอี-

พอกซีที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางแล้วที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) สูงกว่ากาว เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับเอมีนชนิดอะลิฟาติกนอกจากนี้รอยต่อของกาวที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับเอมีนชนิดอะลิฟาติก ตัวอย่างสารเชื่อมขวางเอมีนชนิดอะโรมาติกแสดงดังภาพที่ 2.5

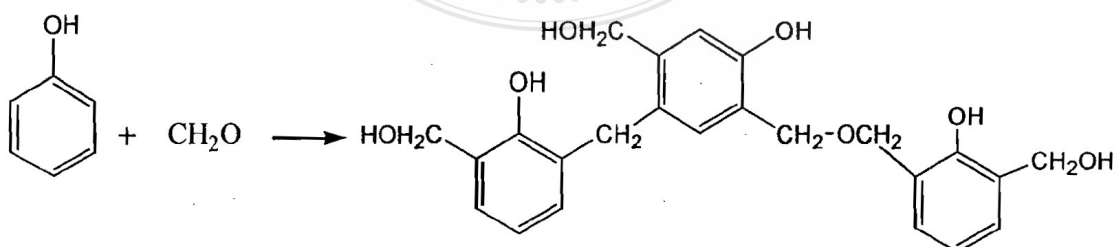


ภาพที่ 2.5 สารเชื่อมขวางเอมีนชนิดอะโรมาติก

กาวอีพอกซีกับสารที่ทำให้แข็งขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้ไดไซยาไนด์ (Dicyandiamide,  $H_2N-C(=NH)-NH-CN$ ) เป็นสารที่ทำให้แข็งขึ้นเมื่อเติมแล้วมีข้อดีคือ ไม่ละลายใน DGEBA ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถละลายได้เมื่อกาวได้รับความร้อนมาก มักใช้งานในลักษณะเป็นฟิล์มบางที่ถูกเก็บรักษาในตู้เย็น มักใช้ผสมกับเส้นใยเพื่อให้เส้นใยช่วยเป็นโครงในการขึ้นรูปด้วยมือและควบคุมความหนาของกาวอีพอกซีได้

## 2) กาวฟีนอลิกสำหรับโลหะ (Phenolic Adhesives for Metals)

เมื่อฟีนอล (Phenol) ทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่มากเกินไปในสถานะสารละลายเบส ผลิตภัณฑ์ที่เรียกได้ว่ารีโซล (Resole) ซึ่งเป็น โอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบ โดยมีหมู่อีเทอร์ (Ether groups) และหมู่เมทิลีน (Methylene Groups) เป็นสะพานเชื่อม นอกจากนี้ยังมีหมู่เมทิลอล (Methylol Groups) เป็นหมู่แทนที่บนวงเบนซีน (Benzene Rings) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นรีโซล

ถ้าใช้งานกาวชนิดนี้จะต้องให้ความร้อนที่ 130-160° C กับรอยต่อเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวของหมู่เมทิลอลให้กลายเป็นพอลิเมอร์โครงร่าง 3 มิติ ดังสมการ



เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศ พื้นผิวรอยต่อที่เชื่อมด้วยกาวฟีนอลิกจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางภายใต้สภาวะที่มีความดัน ซึ่งโดยปกติจะมีการให้ความร้อนกับแผ่นโลหะที่นำมาอัดความดันก่อน และเนื่องจากกาวฟีนอลิกมีความแข็งแรงแต่เปราะจึงนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นเติมลงในกาวฟีนอลิกเพื่อเพิ่มความเหนียว เช่น พอลิไวนิลบิวทีรัล (Polyvinylbutyral) พอลิไวนิลบิวทีรัล (Polyvinylbutyral) อีพอกซี (Epoxy) และยางไนไตรด์ (Nitrile rubber)

### 3) กาวอะคริลิก (Structural acrylic adhesive)

โครงสร้างของกาวอะคริลิกประกอบด้วยอะคริลิกมอนอเมอร์ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโดยปฏิกิริยาแบบลูกโซ่เรดดิคัลหรือแบบเพิ่มเข้าได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยมอนอเมอร์หลักในกาวอะคริลิกคือ เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate, MMA) และสารอื่นๆ เช่น กรด เมทาคริลิก (Methacrylic Acid) เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะโลหะโดยเกิดเป็นเกลือของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylate Salts) และทนความร้อน ใช้เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เป็นสารเชื่อมขวางบ่อยครั้งที่สารเหล่านี้ถูกเติมลงในพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งเป็นผลให้กาวอะคริลิกมีความเหนียวสูงขึ้นและมีกลิ่นลดลง ตัวอย่างสูตรกาวอะคริลิกแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของกาวอะคริลิก [3]

องค์ประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก
เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate)	85
กรดเมทาคริลิก (Methacrylic Acid)	15
เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (Ethylene Glycol Dimethacrylate)	2
คลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene)	100
คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide)	6
เอ็น เอ็น- ไดเมทิลอะนิลีน (N, N-Dimethylaniline)	2

คลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene) เป็นสารที่ทำให้เหนียวคล้ายยาง คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide) และ เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลอะนิลีน (N, N-Dimethylaniline) เป็นองค์ประกอบของตัวริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Initiator) กาวอะไครลิกต้องใช้สองส่วนผสมกัน คือ เรซิน (Resin) และสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในสารเร่งปฏิกิริยาจะมีสารริเริ่มปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบ และส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลือจะผสมอยู่ในเรซินสามารถป้ายกาวลงบนพื้นผิวโลหะและป้ายสารเร่งปฏิกิริยาทับลงบนกาว โดยหลังจากประกบพื้นผิวโลหะเพียง 1 นาที กาวอะไครลิกก็สามารถยึดติดพื้นผิวโลหะได้เป็นอย่างดี และค่าความแข็งแรงจะสูงขึ้นในเวลาประมาณ 10 นาที

สารริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และผลิตภัณฑ์ที่ควบแน่นออกมาคือ อะนิลีน (Aniline) และบิวทาลดีไฮด์ (Butyraldehyde) ซึ่งสามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระโดยการทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลโฟนิลคลอไรด์ (Sulfonyl Chloride Groups) ในยาง ทำให้เกิดการกราฟต์ (Grafting) ของอะไครลิกพอลิเมอร์กับอนุภาคของยาง

#### 4) กาวยาง (Rubber Toughening of Structural Adhesive)

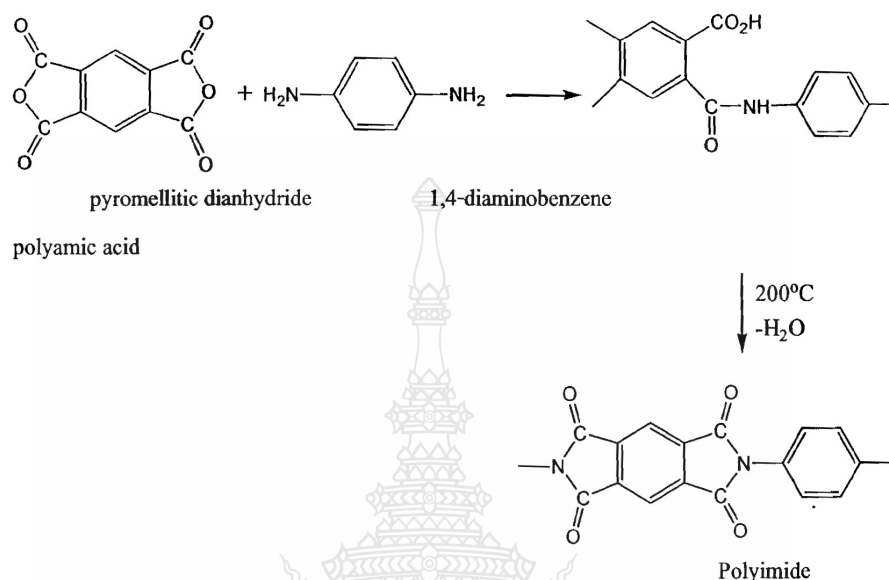
กาวหลายชนิดมักมีพอลิเมอร์ที่มีสมบัติคล้ายยางเป็นองค์ประกอบ เมื่อกาวเกิดการเชื่อมขวาง ยางจะเกิดการตกตะกอนเป็นเม็ดเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ทำให้เกิดการไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ เกิดการแตก (Break) ออกจากกันของรอยต่อกาวที่เกิดจากรอยแยกเล็กๆ (Crack) แต่อนุภาคยางสามารถหยุดรอยแยกเล็กๆ ได้โดยเป็นตัวป้องกันไม่ให้รอยแยกเล็กๆ นั้นรวมตัวกันจนเป็นรอยแยกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้กาวมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น โดยยางที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิไวนิลฟอร์มัล (Polyvinylformal) พอลิไวนิลบิวทาล (Polyvinylbutyral) คลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene) ATBN และ CTBN

หมายเหตุ ATBN และ CTBN คือ พอลิเมอร์ผสม (Copolymer) ระหว่างบิวตะไดอีน (Butadiene) และอะคริโลไนไตรท์ (Acrylonitrile) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นอีเธอร์เอมีน (Ether Amine) หรือ คาร์บอกซิลิก (Carboxylic)

#### 5) กาวอุณหภูมิสูง (High – Temperature Adhesive)

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางถูกกำหนดโดยอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว และการเสื่อมสลายทางเคมี (Chemical Degradation) เช่น กาวอะไครลิกอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมทิลเมทาไครเลท (Polyimethylmethacrylate) ที่ 105 °C ในกรณีของกาวอีพอกซีอุณหภูมิ ซึ่งได้จากการ

เกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Polymerisation) ระหว่างไดแอนไฮไดรด์ (Dianhydride) กับไดเอมีน (Diamine) ดังแสดงในภาพ 2.7



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอไมด์

#### 6) กาวฟอร์มัลดีไฮด์สำหรับไม้ (Formaldehyde Condensate Adhesive for Wood)

กาวสำหรับไม้จะเป็นกาวที่เกิด ปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) กับ ฟีนอล (Phenol) และเรซอร์ซินอล (Resorcinol) นอกจากนี้ยังเกิดจากยูเรีย (Urea) หรือ เมลามีน (Melamine) ทำ ปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ โดย ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้องหลังเติมสารเร่ง ปฏิกิริยา กาวชนิดนี้เป็นกาวน้ำ และน้ำจะเป็นตัวทำให้เกิด ปฏิกิริยา โดยน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังไม้และทำให้กาวมีสถานะเหมาะสมต่อการยึดติด

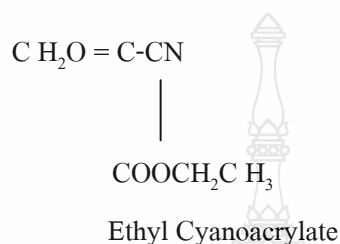
#### 7) กาวแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Adhesives)

กาวชนิดนี้เกิด ปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้เมื่อไม่มีออกซิเจน ส่วนใหญ่กาวประเภทนี้มักมี องค์ประกอบหลักเป็นไดเมทาคริเลทของพอลิเอทิลีนไกลคอล (Dimethacrylates of polyethylene glycol) ซึ่งมีหมู่ที่ปลายสายเป็นพอลิยูรีเทน กาวชนิดนี้มักใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง

#### 8) กาวไซยาโนอะคริเลท (Cyanoacrylates)

โมเลกุลของกาวชนิดนี้มีส่วนประกอบที่มีหมู่ดิงอิลิكتروน ได้ดีสองหมู่ เช่น เอทิลไซยาโนอะคริเลท (Ethyl Cyanoacrylate) จะประกอบด้วยหมู่ไซยาไนด์ (-CN) และหมู่คาร์บอนิล (-

COO-) ซึ่งเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นจึงสามารถแตกตัวได้โดยน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิวในบรรยากาศ และเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปกติน้ำจะแตกตัวให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) กาวชนิดนี้จะบรรจุในขวดพอลิเอทิลีนมากกว่าขวดแก้วเนื่องจากพื้นผิวของแก้วเป็นเบส (Alkaline) โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นตัวที่ทำให้เกิดความเสถียร (Stabilizer) ในขวดบรรจุด้วย



#### 9) กาวพอลิยูรีเทนหรือฟิยู (Polyurethanes)

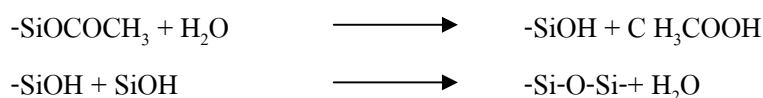
กาวชนิดนี้สามารถผลิตได้จากการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลอย่างน้อยสองหมู่ที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานเนต (Diisocyanate) ซึ่งพอลิเมอร์ที่กล่าวถึงอาจเป็นพอลิเอสเตอร์ โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



ในส่วนประกอบทั้งสองของกาวพอลิยูรีเทน พอลิเมอร์และไดไอโซไซยานเนตจะผสมกันแล้วเกิดการยึดติดขึ้น โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุอาจทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานเนตเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

#### 10) กาวซิลิโคน (Silicones)

กาวซิลิโคนสามารถเกิดการเชื่อมขวาง (Vulcanising) ได้ที่อุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ซึ่งมีมวลโมเลกุลระหว่าง 300-1600 กับอะซิเตต (Acetate) คีโตซิม (Ketoxime) หรือหมู่อีเทอร์ (Ether Group) ซึ่งหมู่เหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาด้วยความชื้น (Hydrolysis) ซึ่งจะมีการจำกัค่น้ำออกมา แสดงสมการดังนี้



กาวชนิดนี้มีความอ่อนนุ่ม ทนต่อสารเคมีและทนต่อสภาพแวดล้อมมักใช้เป็นกาวอุดรอยร้าวในห้องน้ำ สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างประมาณ  $-60\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$

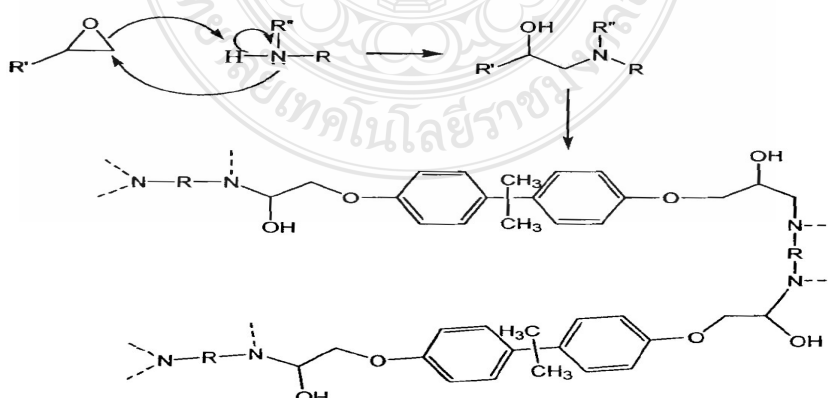
#### 11) กาวพอลิซัลไฟด์ (Polysulfides)

กาวพอลิซัลไฟด์มักใช้เป็นกาวในการอุดรอยร้าวหรือเชื่อมขอบกระจกสองชิ้นเข้าด้วยกันสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ ซึ่งกาวพอลิซัลไฟด์เกิดจากการกระทำปฏิกิริยาระหว่างบิส 2 คลอโรเอทิลฟอร์มาล (Bis (2-Chloroethyl Formal)) กับ โซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Sodium Polysulfide)



กาวพอลิซัลไฟด์มักผสมสารเพิ่มเนื้อหรือสารปรับแต่งเพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติความเหนียว เช่น พลาทาเลท สารคู่ควบซิลิโคน (Silane Coupling Agent) เป็นต้น

โดยทั่วไปการเชื่อมติดของกาวก็คือการที่กาวนั้นเหนียวหรือแข็งตัวจากการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่อันเนื่องมาจากสารเคมี แสงอัลตราไวโอเลต หรือ ความร้อน เช่น ในกรณีของอีพอกซีเรซิน กระบวนการเกิด ปฏิกิริยาเชื่อมติดจะเกิดจากการที่หมู่อีพอกไซด์ที่ปลายสายของโอลิโกเมอร์ทำ ปฏิกิริยากับหมู่พอลิฟังก์ชันนัลเอมีนดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างการเกิดกระบวนการเชื่อมขวางของกาวอีพอกซีกับพอลิฟังก์ชันนัลเอมีน



## 12) กาวที่เกิดกระบวนการเชื่อมขวางโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

ปัจจุบันนิยมการนำรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาใช้ในการฉายให้กาวเกิด ปฏิกิริยา ซึ่งวิธีนี้มีข้อดี คือ ความสะดวก รวดเร็ว ประหยัดพลังงาน ได้สมบัติเชิงกลที่ดี รวมถึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที กระบวนการเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง และไม่มีการระเหยของตัวทำละลายในกาวที่เป็นสารอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้กาวชนิดนี้ยังมีความทนทานในการยึดติด สามารถยึดเกาะได้ดีกับวัสดุหลายชนิด และมีความเสถียรสูงในขณะเก็บรักษา

การเชื่อมขวางด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Curable Adhesive) [4] หมายถึง กาวที่สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งได้โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในระยะเวลาที่สั้น สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิได้ที่อุณหภูมิห้อง องค์ประกอบหลักของกาวที่เชื่อมขวางด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต คือ โอลิโกเมอร์ มอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งสมบัติของกาวที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่เลือกใช้ การเชื่อมขวางด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Curing) ประกอบด้วยพื้นฐานของพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยแสง (Photoinitiated Polymerization) ของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ แล้วเกิดการเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างตาข่ายสามมิติ กลไกของการเชื่อมขวางด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตมี 2 แบบ คือ การเกิด ปฏิกิริยาแบบฟรีเรดิคัล ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) ขั้นตอนแผ่ขยาย (Propagation) และขั้นสิ้นสุด (Termination)

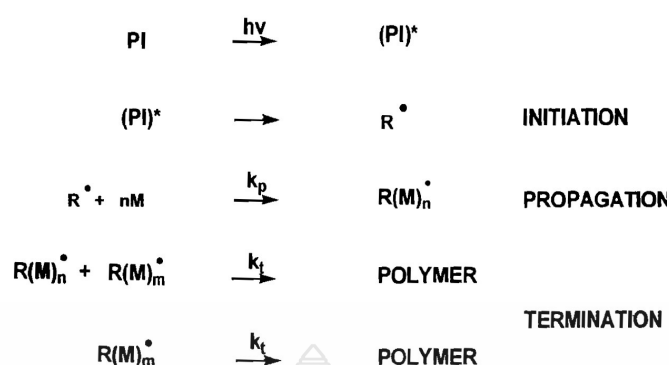
1. ขั้นริเริ่ม ตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (Photoinitiator, PI) จะดูดกลืนรังสีไวโอเล็ตขึ้นไปอยู่ในขั้นกระตุ้น (Excited state) แล้วเกิดการแตกออกเป็นฟรีเรดิคัล ( $R^{\bullet}$ ) เมื่อฟรีเรดิคัลเกิดขึ้นในที่ที่มีมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว ฟรีเรดิคัลจะเข้าไปที่พันธะคู่

2. ขั้นแผ่ขยาย เกิดขึ้นหลังจากที่มอนอเมอร์โมเลกุลแรกรวมตัวกับเรดิคัลแล้ว ขั้นแผ่ขยายก็จะเริ่มจากมอนอเมอร์ที่สองรวมตัวเข้าที่จุดวงโคจร เกิดเป็นมอนอเมอร์เรดิคัลตัวใหม่เกิดการเพิ่มเข้าของมอนอเมอร์ที่ปลายสายโซ่อย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลที่เรดิคัลติดอยู่ที่ปลาย (Active center)

3. ขั้นตอนสิ้นสุด จะเกิดขึ้นเมื่อสายโซ่เรดิคัลอิสระ 2 สายโซ่มาพบกันแล้วทำ ปฏิกิริยา ทำให้ได้เรดิคัลหายไปจากโมเลกุล มีกลไกการเกิดปฏิกิริยา 2 แบบ

ก. แบบรวมตัวหรือการจับคู่ (Combination or Coupling) ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสายโซ่โมเลกุลที่กำลังแผ่ขยายมาเชื่อมต่อกันเป็น 1 สายโซ่โมเลกุล ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น

ข. แบบแตกตัว (Disproportionation) เกิดการโยกย้ายของอะตอมไฮโดรเจนจากสายโซ่โมเลกุลหนึ่งไปอีกสายโซ่โมเลกุลหนึ่ง กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมติดด้วยแสงแสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กลไกการเกิด ปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยแสง

### 13) กาวแบบ Two-part Polymerization

กาวประเภทนี้ประกอบด้วยเรซิน และ Hardener การนำมาใช้งานต้องนำทั้งส่วนที่เป็นเรซิน และ Hardener มาทำการผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกันในสถานะที่เป็นลักษณะกึ่งของเหลว เพื่อให้ส่วนประกอบทั้งสองเกิดปฏิกิริยาเคมี จากนั้นจึงทำให้เกิดการแข็งตัว Hardener ที่ใช้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และเวลาในการทำให้เกิดการแข็งตัว

## 2.2 การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (Solid Samples)

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นของแข็งโดยไม่มีผลของตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ ผสมอยู่มาเกี่ยวข้อง จำเป็นต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมาก เป็นฟิล์มที่หนาประมาณ 0.01-0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านได้เทคนิคต่างๆ ที่เลือกใช้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารนั้นด้วย ซึ่งเทคนิคต่างๆมีดังต่อไปนี้

2.2.1 ใช้วิธีอัดและรีดให้เป็นแผ่นบางๆด้วยโลหะบนแผ่นโลหะเรียบ หรือแผ่นพลาสติก หรือแผ่นโลหะที่ฉาบด้วยพอลิเมอร์ทนความร้อน เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นพลาสติก ถ้าสารตัวอย่างไม่แข็งมากนัก อาจใช้กรอบกระจก 2 แผ่น รีดสารตัวอย่างก็ได้ แต่ต้องระวังกรอบกระจกแตกด้วย

2.2.2 ใช้วิธีหลอม ถ้าสารตัวอย่างมีมวล โมเลกุลต่ำ อาจหลอมเหลวได้ง่าย แล้วนำสารตัวอย่างที่หลอมเหลวเทลงไปในบนแผ่นโลหะเรียบให้เป็นแผ่นบางๆ หรือเทลงไปในระหว่างแผ่นกรอบกระจก 2 แผ่น ประกบกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.2.3 ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นพวกชีวะสาร พลาสติก หรือจีพิ้งที่อยู่ในรูปเป็นก้อนหรือเป็นแท่งสามารถใช้ไมโครโทมตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ได้เลย

2.2.4 ใช้วิธีทำให้เป็นสารละลาย โดยให้สารตัวอย่างละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายแล้วนำมาเทลงบนแผ่นกระจก แผ่นโลหะขัดมัน หรือพลาสติก หลังจากตัวทำละลายระเหยออกไปใช้มีดตัดแผ่นฟิล์มออกมา ถ้าสารตัวอย่างไม่ละลายน้ำให้จุ่มฟิล์มลงไปใต้น้ำ หลังจากแห้งแล้วแผ่นฟิล์มตรงกลางจะบางกว่าที่ขอบ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งแก้ไขได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่วิธีนี้ก็คงเหลือตัวทำละลายหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย

2.2.5 ใช้ KBr-Pellet Technique ทำได้โดยนำสารตัวอย่างมาบดผสมกับ KBr ในอัตราส่วนประมาณ 1 ส่วนของสารตัวอย่างต่อ 100 ส่วนของ KBr จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นบรรจุสารตัวอย่างลงในแม่พิมพ์ (Die) แล้วจึงจะได้ออกมาในลักษณะที่เป็นแผ่นกลมใส

2.2.6 ใช้ Mull Technique วิธีนี้ต้องทำการบดสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัมในโกร่งอะเกตแล้วหยดวาสลีนแบบเหลว (Mineral Oil) หรือ Nujol ลงไป 1-2 หยด แล้วบดต่อจนเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปใส่ในกรอบกระจกโซเดียมคลอไรด์ (NaCl Window) เพียงเล็กน้อย แล้วเอากรอบกระจกอีกแผ่นประกบดูไปมาจนทั่วแผ่น นำไปใส่ในที่จับตัวอย่าง (Sample Holder) เพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ต่อไป

#### 2.2.7 ข้อควรปฏิบัติในการใช้กาบ

- 1) ผิวหน้าที่จะติดกาบต้องเรียบ สะอาด และแห้ง
- 2) การตากกาบควรทำให้เรียบ และทาบงๆ
- 3) การใช้กาบชนิดแห้งเร็ว ควรทดลองทาบบริเวณที่จะติดก่อนเพื่อความแน่ใจ
- 4) กาบชนิดนี้แห้งช้าควรต้องมีอุปกรณ์ยัดวัสดุให้ติดแน่นตลอดเวลาที่กาบยังไม่แห้ง
- 5) ต้องเลือกชนิดของกาบให้เหมาะสมกับวัสดุ
- 6) กาบบางชนิดเป็นอันตราย ไม่ควรใช้มือจับหรือสูดดมกลิ่น

#### 2.2.8 เงื่อนไขในการสร้างการยึดเกาะที่ดี

1) ความสะอาดผิวงาน ต้องปราศจากฝุ่น คราบน้ำมัน ความชื้น ฟิล์มออกไซด์โลหะ มิฉะนั้นกาบจะติดเกาะกับสนิทโลหะแทนที่จะเป็นเนื้อโลหะ และแรงดึงระหว่างสนิทโลหะกับเนื้อโลหะ มีค่าต่ำ บางกรณีอาจต้องใช้ วิธีทำความสะอาดตามีร่วมกับกายภาพ (Cleanliness)

2) การแพร่เกาะผิวงาน อย่างกว้าง ทั่วถึง (Wetting)

3) การแข็งตัวของเนื้อกาบ หลังจากการใช้เนื้อกาบในรูปของเหลวต้องเริ่มแข็งตัว และกลายเป็นของแข็งในที่สุด (Solidification) อาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมี จากความร้อน ความดัน หรือสารช่วยแข็งตัวจับ (Curing Agent) การระบายความร้อนเกิดการเปลี่ยนสถานะ หรือแข็งตัวจากการระเหยของสารละลายในเนื้อกาบ

4) การเลือกชนิดกาว (Adhesive Choice) มีมากมายให้เลือก คำนึงถึงพันธะที่ต้องการ สภาพแวดล้อม งานการเปลี่ยนแปลงผลิต และค่าใช้จ่าย

5) รูปแบบรอยต่อ (Joint Design) ให้เกิดแรงยึดเกาะ มากที่สุด รวมไปถึงการประกอบต่อ (Assembly) ที่จะเชื่อมให้กาวได้ผลดีที่สุด

#### 2.2.9 ปัจจัยสำคัญในการใช้กาวอย่างได้ผล

- 1) การเลือกชนิดของกาว
- 2) อุณหภูมิเวลาการกดอัดให้เกิดการแข็งตัวและจับตัว
- 3) การเตรียมพื้นผิวงาน (substrate-surface treatment)
- 4) การออกแบบรอยต่อ ที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทนทานต่อความเค้นอันจะทำให้เกิดการแตกร้าว แยก หลุด

5) เสถียรภาพทางกายภาพ เคมีของรอยต่อในการใช้งาน

#### 2.2.10 ข้อดีของการต่อยึดด้วยกาว

- 1) ให้พื้นที่รับความเค้นกว้างใหญ่และรับแรงเฉือนได้สูง (อาจถึง 7,000 ปอนด์/นิ้ว<sup>2</sup>)
- 2) ลดการสั่นสะเทือน และการกระทบกระแทก
- 3) ให้ความแข็งแรงที่ลดปัญหาด้านความล้า
- 4) สามารถต่อยึดพื้นผิวรูปร่างและความหนาต่างๆ ได้
- 5) ปรับระดับผิวงานตามความต้องการ
- 6) ให้รอยต่อที่กันรั่วซึม
- 7) ต่อวัสดุต่างชนิด หรือชนิดเดียวกันได้
- 8) เปรียบเทียบกับการต่อทางกลไกแล้ว ราคาถูก และรวดเร็วกว่า
- 9) ทนทานต่อความร้อนพอสมควร
- 10) ให้ความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ใช้สูงมาก

#### 2.2.11 ข้อด้อยของการต่อยึดด้วยกาว

- 1) พื้นผิวงานต้องสะอาด เรียบร้อยจริงๆ
- 2) ต้องใช้เวลาแข็งตัวเข้าสู่รูปใช้งานได้ จัดว่านาน
- 3) ใช้กับสภาพแวดล้อมอุณหภูมิไม่สูงนัก ประมาณไม่เกิน 350 F
- 4) ในการแข็งตัวบางครั้ง ต้องใช้ความร้อน และแรงอัดช่วย
- 5) บางกรณีต้องขึ้นแบบเข้าต่อวัสดุทางกลไกช่วยอย่างระมัดระวัง
- 6) ตรวจสอบรอยต่อโดยตรงยาก

- 7) สภาพแวดล้อมมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน เช่น ความชื้น-สารละลาย
- 8) ต้องควบคุมขั้นตอนการใช้อย่างพิถีพิถัน

#### 2.2.12 ขีดจำกัดในการออกแบบงานใช้กาว

- 1) หารูปแบบรอยต่อที่จะให้แรงยึดเหนี่ยวเหมาะสมกับการใช้งานที่สุด (Top Performance) ต้องคำนึงถึงความเค้น สภาพแวดล้อม ชนิดกาวต่าง ๆ ที่เลือก กระบวนการยึดเหนี่ยวบุคลากร
- 2) ราคาอาจจะถูก แต่เมื่อใช้งานต้องรวมค่าใช้จ่ายที่แอบแฝง (Hidden Cost) เช่น เครื่องมือ เตาอบ เครื่องอัด
- 3) อายุการเก็บ และวิธีการเก็บที่เหมาะสม (Storage Life) อาจเก็บในที่เย็น
- 4) ช่วงเวลาการแข็งตัวของกาวอาจเร็วกว่า ช่วงเวลาต่อปรับใช้ชิ้นงานเข้าที่
- 5) ค่าเตรียมพื้นผิว และการลงทาบหน้า
- 6) คำนึงการขนย้าย คุณภาพการใช้งานที่เชื่อถือได้ การสิ้นเปลืองสูญเปล่า
- 7) เมื่อต่อติดแล้ว อาจจะแกะออกเพื่อแก้ไข คงยาก

#### 2.2.12 วิธีการหาเนื้อกาว

ชั่งตัวอย่างที่กวนดีแล้วประมาณ 5 กรัมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม ใส่ในภาชนะแบนและปากกว้าง นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ ทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก

วิธีคำนวณ

$$\text{เนื้อกาว ร้อยละ} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} \times 100) / \text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ}$$

#### 2.2.13 ส่วนประกอบของกาว (Adhesive Composition)

ในสมัยใหม่ จัดว่าซับซ้อนมาก เนื่องจากมีส่วนประกอบหลายอย่าง ทำหน้าที่เฉพาะ พอดีแบ่งส่วนผสมพื้นฐานได้

- 1) สารยึดเหนี่ยว (Binder หรือ Base) เป็นส่วนประกอบหลักของกาว ที่ทำหน้าที่เหนี่ยวกับแผ่นพื้นงาน เช่น กาวอีพอกซี มีส่วนประกอบหลัก คือ เรซินอีพอกซี
- 2) ตัวทำให้เกิดการแข็งตัว (Hardener) ทำหน้าที่ให้เกิดปฏิกิริยา Curing (แข็งตัว เกี่ยวโยง) กาว 2 หลอดมักจะเป็นตัวเนื้อกาวยึด (Base หรือ Binder) กับตัวสร้างความแข็งตัว (Hardener) อาจมีการเพิ่ม Catalyst ช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างสารที่สอง
- 3) สารละลาย (Solvent) ช่วยให้เนื้อกาวแพร่กระจายกันพื้นที่มากขึ้น โดยทั่วไปใช้สารละลายอินทรีย์ในธรรมชาติ และมักใช้แบบลูกผสมตามต้องการ

4) ตัวลดปรับคุณสมบัติ (Diluents) ช่วยลดความเข้มข้นของ Binder ลดความหนืด และทำให้เข้ากระบวนการผลิตสะดวก ไม่ระเหยหนีไป เหมือนสารละลาย (Solvent)

5) วัสดุเสริมเติม (Filler) ช่วยปรับคุณสมบัติทางการทำงาน เช่น ความแข็งแรง การใช้งานและต้นทุนได้ปริมาณมากขึ้น มีผลต่อคุณสมบัติทางการขยายตัว ทางไฟฟ้า การหดตัว ฯลฯ

6) วัสดุลำเลียง (Carrier) หรือ วัสดุเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) ช่วยรองรับเนื้อกาวที่กำลัง Curing โดยทำหน้าที่คล้ายๆ ฟิล์มและทำให้เกิดแนวแบ่งชั้น

#### 2.2.14 ทฤษฎีการติดกาว (Theory of Adhesion)

##### 1) ทฤษฎีทางกล (Mechanical Theory)

เนื้อกาวแทรกช่องว่างเล็กใหญ่ ระหว่างผิวงาน (Substrate) ต่อให้ชัดอย่างไร ผิวงานจะไม่เรียบ เกิด Micro cavities (โพรงเล็กจิ๋ว) ที่ผิวมากมายเมื่อกาวแข็งตัว จะเกิดแรงเกี่ยวระหว่างโพรงเล็กๆ ผ่านเนื้อกาว (Mechanical interlocking)

##### 2) ทฤษฎีการดูดกลืนระหว่างของแข็งกับของเหลว (Adsorption Theory)

โดยที่เกิดการแพร่เกาะผิว (Wetting) ของเนื้อกาวเหลว (Adhesive) กับพื้นงาน (Adhesion) ที่เป็นของแข็งได้ เนื่องจากเนื้อกาว ความตึงผิวต่ำกว่าความตึงผิวของผิวชิ้นงาน ยิ่งแรงตึงผิว (Surface Tension) ของเนื้อกาวเหลวต่ำกว่าความตึงผิววิกฤติ (Critical Surface Tension = CST) ของผิวงาน จะยิ่งมีการแผ่กระจายเนื้อกาวเหลวให้กับพื้นที่บนผิวงานมาก แทรกผิวขรุขระใลอากาศตามโพรงจิ๋วๆ ออกไปได้ เกิดการแพร่เกาะผิว (Wetting) ที่สูงขึ้น หลักการคือ ควรใช้กาวที่แรงตึงผิวต่ำๆ แตกต่างจากแรงตึงผิววิกฤติของผิวงานที่มีค่าสูงกาวอินทรีย์ต่างๆ เกาะติดงานโลหะ แต่ไม่เกาะติดงานอินทรีย์ เช่น สารโพลีเมอร์ พลาสติก โพลีเอธิลีน โพลีโพรพิลีน เนื่องจากค่า CST ของสารโพลีเมอร์ ค่าความตึงผิวของพลาสติก เช่น ใช้อีพอกซีกับงานโลหะได้ แต่ใช้กับพลาสติกไม่ได้ผล หลังจากเกิดการแพร่เกาะดีแล้ว อธิบายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารผ่านพันธะทางเคมีแรง Van der Waal แรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน และต่างชนิดกัน

#### 2.2.15 แรงตึงผิว (Surface Tension)

คือแรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของไหลสัมผัสกับของไหลอื่นหรือกับผิวของแข็ง โดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติดและแรงเกาะติดทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายๆ กับแผ่นบางๆ ที่สามารถต้านแรงดึงได้เล็กน้อย การเกิดแรงตึงผิวนี้นี้สืบเนื่องมาจาก แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1) แรง Cohesive คือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดเดียวกับหรือ แรงที่ของเหลวดึงดูดโมเลกุลของตัวเองเข้าไว้ด้วยกัน ถ้าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวสูง ของเหลวนั้นๆ จะยังคงรักษารูปร่างเป็นหยดไว้ได้

2) แรง Adhesive คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน หรือ แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวกับพื้นผิวของสารอื่นๆ ถ้าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเหลวต่ำ จะทำให้หยดของเหลวนั้นแผ่ออกมาเป็นฟิล์มบางๆ กล่าวได้ว่าของเหลวนั้นเป็นเปียกภาชนะ

2.2.16 การใช้กาวแล้วไม่ได้ผล ไม่สามารถติดชิ้นงานได้ มี 2 รูปแบบ คือ Cohesive Failure มีกาวเกาะติดที่ผิวงานทั้งสอง และ Adhesive Failure มีกาวติดผิวงานเดียวเท่านั้นและอาจเพิ่มรูปแบบที่ 3 Cohesive และ Adhesive Failure บางส่วนมีกาวเกาะหน้าเดียว บางส่วนมีเกาะสองหน้า

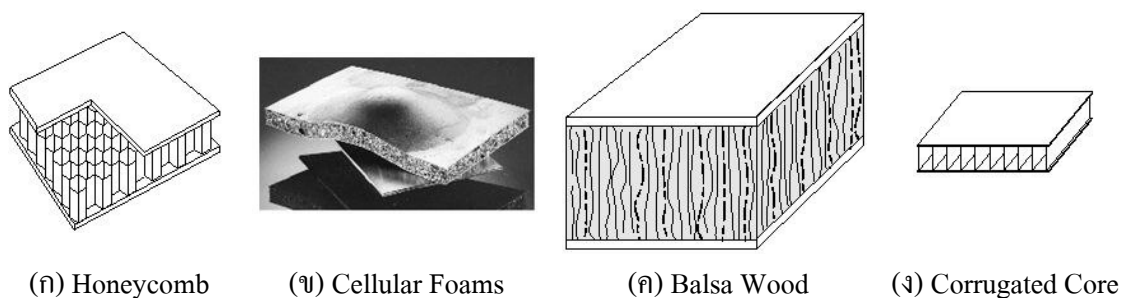
## 2.3 โครงสร้างแซนวิช (Sandwich Structure)

### 2.3.1 วัสดุแซนวิช

โครงสร้างแซนวิช (Sandwich Structure) เป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) ประกอบด้วยส่วนแกนกลาง (Core) ซึ่งเป็นวัสดุอ่อน ประกบเข้ากับแผ่นประกบบนและล่าง (Facesheet) ซึ่งถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยกาวอีพอกซี ประกอบด้วยแผ่นประกบด้านบนและด้านล่าง [1-2] วัสดุแซนวิชถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และลดน้ำหนักของโครงสร้างต่างๆ (Lightweight Construction) [1, 5]

### 2.3.2 ประเภทวัสดุแซนวิช

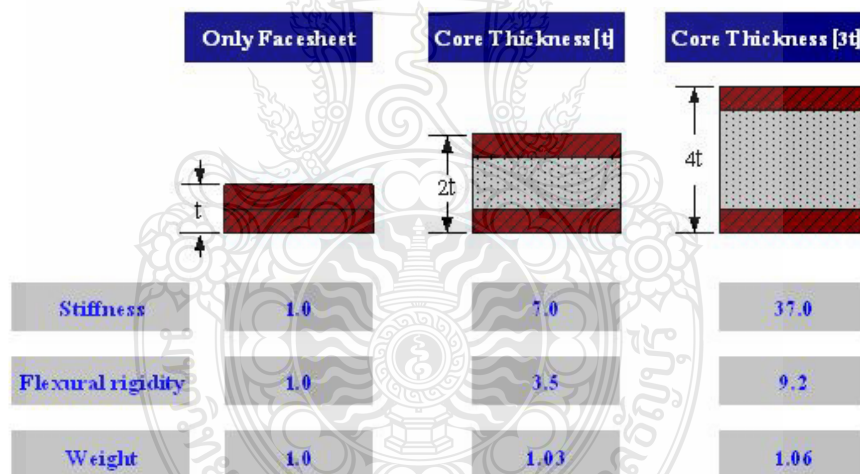
องค์ประกอบหลักของวัสดุแซนวิชคือ แกนกลางซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างวัสดุแซนวิช ซึ่งต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการคงที่ระยะระหว่างแผ่นประกบ กล่าวคือมีความคงรูปต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือนได้ดี วัสดุแซนวิชสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่ประเภทใหญ่ ตามชนิดของแกนกลาง คือ Honeycomb, Cellular Foams, Balsa Wood และ Corrugated Core ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่ง Balsa Wood ถือเป็นวัสดุแซนวิช ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้งาน จากนั้น Honeycomb ถูกนำมาใช้งานตามลำดับ การประยุกต์ใช้งานก็ขึ้นอยู่กับชนิดของงานเป็นหลัก



ภาพที่ 2.10 ชนิดของวัสดุแกนวิซ

2.3.3 คุณสมบัติของวัสดุแกนวิซ

คุณสมบัติของวัสดุแกนวิซคือมี อัตราส่วนของความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 4 พบว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อมีการเพิ่มความหนาของวัสดุแกนกลาง ขณะที่น้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุแกนวิซ

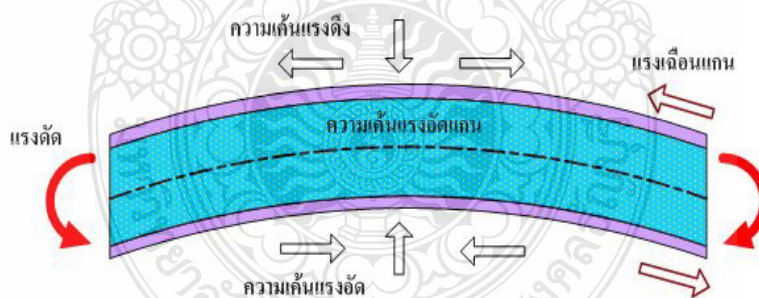
แผ่นประกบ (Face Sheets) ทำหน้าที่รับความเค้นแรงดึงและความเค้นแรงอัดในวัสดุแกนวิซ ดังภาพที่ 5 ซึ่งค่าความแข็งแรงการดัดโค้ง (Flexural Rigidity) มีน้อยมาก วัสดุส่วนใหญ่ที่นำมาทำแผ่นประกบ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า ไรซินิม อะลูมิเนียม และไฟเบอร์กลาส เป็นต้น คุณสมบัติของแผ่นประกบมีดังนี้ [5]



- 1) แข็งแรงสูง
- 2) ด้านทานแรงดึงและแรงอัด
- 3) ด้านทานแรงกระแทก
- 4) ผิวเรียบ
- 5) ด้านทานสิ่งแวดล้อม
- 6) ด้านทานการสึกหรอ

แกนกลาง (Core) ทำหน้าที่รับแรงเฉือนเป็นหลัก ดังภาพที่ 5 ดังนั้นควรมีคุณสมบัติแข็งแรงในทิศทางต่างๆ และมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งวัสดุใช้ส่วนใหญ่ใช้ทำแกนกลาง เช่น เหล็ก พลาสติกโฟม และไม้ เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุแกนวิห ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น แกนกลางมีคุณสมบัติดังนี้ [6]

- 1) ความหนาแน่นน้อย
- 2) โมดูลัสการเฉือนสูง
- 3) ความแข็งแรงการเฉือนสูง
- 4) เป็นฉนวนกันความร้อนดี
- 5) การดูดซับความชื้นดี
- 6) แข็งแรงในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นประกบ



ภาพที่ 2.12 พฤติกรรมการรับแรงของวัสดุแกนวิห [6]

#### 2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน

การใช้งานวัสดุแกนวิหมีมาตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 แต่ได้รับความนิยมในการนำมาสร้างโครงสร้างของเรือซึ่งปัจจุบันนี้วัสดุแกนวิหถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานพาหนะเพื่อการคมนาคมขนส่งตัวอย่างเช่นเครื่องบินแอร์บัส A 380 ซึ่งเป็นเครื่องบินขนาดใหญ่

ที่สุดของโลก ได้นำเอาเทคโนโลยีวัสดุวิศวกรรมมาทำโครงสร้างของลำตัวเครื่องบิน หรือ รถไฟฟ้าความเร็วสูง ICE (450 กิโลเมตร/ชั่วโมง) ของประเทศเยอรมนี วัสดุวิศวกรรมก็ถูกนำมาสร้างลำตัวของรถไฟฟ้า สำหรับรถยนต์ เช่น Mercedes-Benz A-Class หรือ Audi A6 ก็ได้นำวัสดุวิศวกรรมมาใช้ทำแผ่นรองฐานด้านล่าง เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยแล้วตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาวัสดุวิศวกรรม คือ รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRT) ซึ่งผลิตจากประเทศเยอรมันแต่ชิ้นส่วนถูกผลิตขึ้นจากประเทศออสเตรียซึ่งชิ้นส่วนนั้น คือ โครงสร้างลำตัวของรถไฟฟ้าดังภาพที่ 2.13



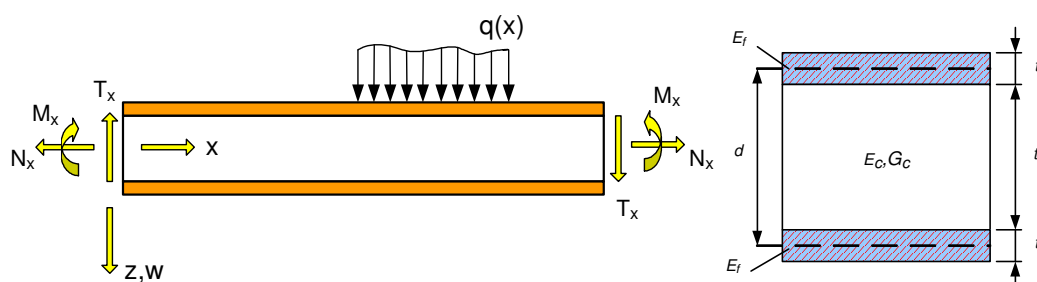
ภาพที่ 2.13 โครงสร้างรถไฟฟ้า MRT ที่ผลิตจากวัสดุวิศวกรรม [7]

### 2.3.5 พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุวิศวกรรม

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการพัฒนาและวิจัยวัสดุวิศวกรรม เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุวิศวกรรมเพิ่มขึ้น โดยเริ่มต้นจากการใช้ทฤษฎีของคาน หรือเรียกว่า Timoshenko Theory โดยทำการวิเคราะห์ความเค้นเฉือน (Shear Stress) และความเค้นแนวขวาง (Transverse Shear Stress)

### 2.3.6 ความแข็งแกร่งการดัดโค้ง (Flexural Rigidity)

ความแข็งแกร่งการดัดโค้ง เป็นการหาค่าความสามารถของวัสดุวิศวกรรมในการโค้งตัวภายใต้แรงดัด หรือ โมเมนต์ดัด ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดึงและแรงอัด ดังภาพที่ 2.14 และความแข็งแกร่งการดัดโค้งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1



ภาพที่ 2.14 Sign Convention สำหรับวัสดุแกนวิห [5]

$$D = \int E z^2 dz = \frac{E_f t_f^3}{6} + 2E_f t_f \left[ \frac{d}{2} \right]^2 + \frac{E_c t_c^3}{12} = \frac{E_f t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f d^2}{2} + \frac{E_c t_c^3}{12} = 2D_f + D_o + D_c \quad (2.1)$$

สำหรับแผ่นประกบบาง:

$$\frac{2D_f}{D_o} < 0.01 \text{ เมื่อ } 3 \left( \frac{d}{t_f} \right)^2 > 100 \text{ หรือ } \left( \frac{d}{t_f} \right) > 5.77 \quad (2.2)$$

สำหรับแกนกลางอ่อน :

$$\frac{D_c}{D_o} < 0.01 \text{ เมื่อ } \frac{6E_f t_f d^2}{E_c t_c^3} > 100 \quad (2.3)$$

สำหรับแผ่นประกบ  $t_f \ll t_c$  และ โมดูลัสของ  $E_c \ll E_f$  ได้สมการดังนี้

$$D = \frac{E_f b t_f d^2}{2} \quad (2.4)$$

### 2.3.7 ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain)

สามารถหาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับแผ่นประกบ และแกนกลาง ที่เกิดขึ้นจากการคดโค้งดังนี้

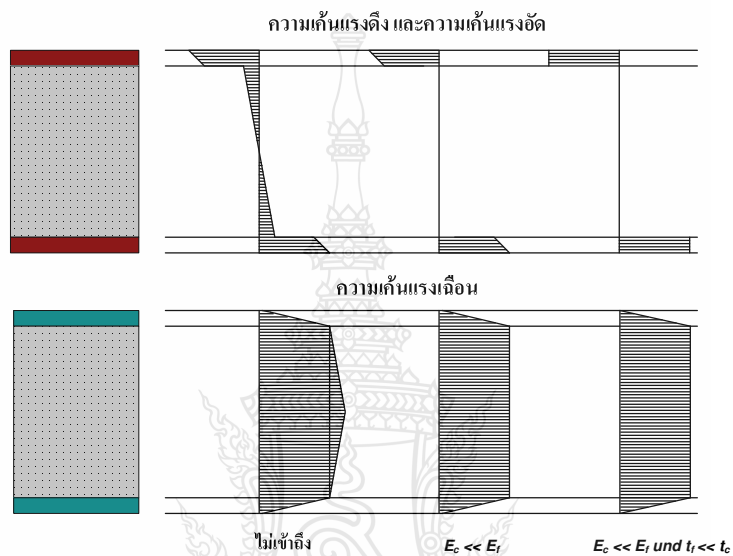
$$\varepsilon_x = \frac{M_x z}{D} \quad \text{และ} \quad \sigma_f = \frac{M_x z E_f}{D} \quad (2.5)$$

### 2.3.8 ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

สำหรับวัสดุแกนวิหที่สมมาตร สามารถหาความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแกนวิหได้ดังนี้

$$\tau_{c,\max}(z=0) = \frac{T_x}{D} \left( \frac{E_f t_f d}{2} + \frac{E_c t_c^2}{8} \right) \text{ และ } \tau_{c,\min} = \tau_{f,\max} = \frac{T_x}{D} \left( \frac{E_f t_f d}{2} \right) \quad (2.6)$$

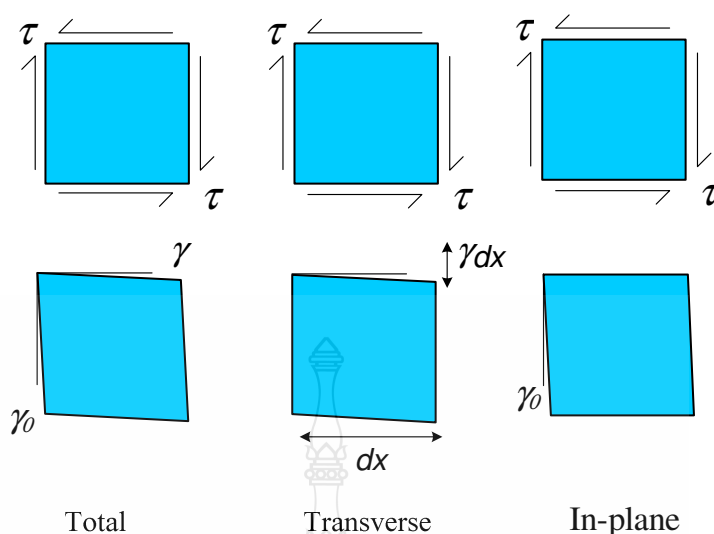
พฤติกรรมการเกิดความเค้นเฉือนภายในวัสดุแซนวิช สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งเกิดขึ้นจากความเค้นแรงดึง ความเค้นแรงอัด และความเค้นแรงเฉือน



ภาพที่ 2.15 ลักษณะความเค้นแรงดึง-แรงอัดและความเค้นเฉือน [5]

### 2.3.9 การเปลี่ยนรูปจากความเค้นเฉือน (Shear Stress Deformation)

เมื่อโครงสร้างวัสดุแซนวิชรับความเค้นเฉือน เกิดการเปลี่ยนรูปภายใน คือ การเฉือนตามแนวขวาง ถึงแม้ว่ารูปร่างของวัสดุแซนวิชไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม ดังภาพที่ 2.16 แสดงระนาบที่เกิดการเปลี่ยนรูปไป



ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนรูปของวัสดุเซนวิชภายใต้ความเค้นเฉือน [1]

### 2.3.10 ความแข็งแรงแรงความเค้น (Shear Stiffness)

ความแข็งแรงแรงความเค้นในแนวตัดขวางเกิดขึ้นจากแรงเฉือน และแรงตัดขวาง  $\gamma = T_x / S$  สำหรับกรณีที่มี  $t_f \ll t_c$  และ  $E_c \ll E_f$  สามารถคำนวณหาความแข็งแรงแรงความเค้นได้ดังนี้

$$S = \frac{G_c b d^2}{t_c} \quad (2.7)$$

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

I.G.Hargis, M.A. Richard และ W.A.John [10] ได้ทำการสังเคราะห์กาวเพื่อยึดติดระหว่างยางกับโลหะโดยใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสีดอิมัลชัน (Seeded emulsion polymerization) โดยใช้สไตรีนเป็นเม็ดลาเท็กซ์ และมีโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา สารที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขั้นที่สองมีบิวทาไดอีน (Butadiene) และไวนิลิดีนคลอไรด์ (Vinylidene Chloride) จากนั้นนำเม็ดลาเท็กซ์ไปเติมสารเติมแต่งต่างๆ เช่นสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) เขม่าดำ (Carbon black) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) เป็นต้น นำกาวที่ได้มาทาบบนพื้นผิวโลหะ ทำให้แห้ง โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปยึดติดกับยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 3000 ปอนด์ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำไปทดสอบหาความแข็งแรงดึงในการยึดติดของกาวตาม ASTM D 429 โดยทำการเปรียบเทียบ

ระหว่างกาวที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง และกาวที่ใช้ตัวทำละลายเป็นตัวกลางพบว่าเกิดการฉีกขาดบริเวณข้าง ทั้งคู่ แต่ค่าความแข็งแรงดึงของกาวที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายมีค่าสูงกว่ากาวที่มีตัวทำละลายเป็นตัวกลาง

Toshiyuki Sawa และคณะ [11] ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโมลคู่สความยืดหยุ่นของ ซิงงาน อัตราส่วนความหนาของซิงงานอัตราส่วนคามยาวของซิงงานและความหนาของกาวที่มีต่อการกระจายตัวของความเค้นในรอยต่อแบบใช้กาวของซิงงานที่ทำจากวัสดุต่างกันและมีขนาดไม่เท่ากันรับแรงดึงจากภายนอกโดยคิด เสมือนว่าซิงงานและกาวเป็นวัสดุสามชนิดมาสัมผัสกัน อยู่และใช้ทฤษฎีระนาบความเค้น (plane stress) ของทฤษฎีความยืดหยุ่นในสองมิติ ในการวิเคราะห์ ควบคุมไปกับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากนั้นนำผลที่ได้ไปตรวจสอบกับค่าที่วัดได้จริงๆจากการ ทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าที่วัดได้จากการ ทดลองมีความสอดคล้องกัน

D. Charoenyut และคณะ [12] ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบางที่มีต่อพฤติกรรมทางกลใน รอยต่อแบบหมุดยึดและกาว (Combined Adhesive-Reveted Lab Joint) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย แบบจำลองจะแทนเอลิเมนต์ของชั้นกาวบางในแบบจำลองด้วยสปริงเอลิเมนต์สำหรับรับแรงดึงและ แรงกดและสปริงเอลิเมนต์สำหรับรับแรงเฉือน (Thin Adhesive Layer Analysis Method, TALA) ซึ่ง ในการศึกษาพบว่า การเพิ่มชั้นกาวบางในรอยต่อสามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของความเค้น (Stress Concentration Factor) และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานในการรับความล้าของรอยต่อได้

ธงชัย ฟองสมุทร [13] ทำการวิเคราะห์ความเค้นในรอยต่อแบบหมุดยึดและกาว โดยที่ทำการ ประมวลผลโดยเปลี่ยนค่าคุณสมบัติเชิงกลของกาวหลายๆค่า เพื่อแสดงค่าความแข็งแรงของชั้น กาวที่เหมาะสมในการนำมาใช้ร่วมกับการต่อด้วยหมุดยึด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับ วิธี TALA ซึ่งเป็นวิธีในการจำลองชั้นกาวบางลงในแบบจำลองในการทำการวิเคราะห์ข้อมูล ผลลัพธ์ที่ ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มค่าความแข็งแรงของชั้นกาวบาง ค่าความหนาแน่นของความเค้นจะ ลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าความแข็งแรงของซิงงาน

Fernandez-Garcia และคณะ [14] ได้ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายาง SBR ด้วยวิธีอัลตราโซนิค การขัดผิวหน้ายาง และวิธีการใช้ตัวทำละลายเพื่อให้เกิด ปฏิกิริยา คลอริเนชั่น บนผิวหน้ายาง โดยใช้ เทคนิค FTIR, SEM, % Contact Angle และ ความแข็งแรงของการยึด ของการยึดติดกาวพอลิยูรีเทน ด้วยยาง ระหว่างยาง SBR ตรวจสอบพบว่า การขัดผิวหน้ายางเพียงอย่างเดียวค่าความแข็งแรงของ การยึดติด เท่ากับ 3.3-4.3 กิโลนิวตัน/เมตร และการทำความสะอาดผิวหน้ายางด้วยวิธีอัลตราโซนิค ความแข็งแรงของการยึดติด เท่ากับ 1.7-2.7 กิโลนิวตัน/เมตร ซึ่งทั้ง 2 วิธีข้างต้นค่าจะต่ำไม่เป็นที่

ยอมรับ แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณและความหนืดของกาวให้มากขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงของการยึดติดก็ไม่ได้เพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเตรียมผิวหน้ายางยึดติดด้วยตัวทำละลาย TCI/MEK, TCI/Acetone และ TCI/EA ที่ความเข้มข้น 1-3% โดยน้ำหนัก เมื่อการเตรียมผิวหน้ายางเพียง 1 ชั้น (อีก 1 ชั้น ไม่มีการเตรียมผิวหน้า) พบว่าความแข็งแรงของการยึดติดเท่ากับ 2-4 กิโลนิวตัน/เมตร แนวโน้มเหมือนกันทุกชนิดของตัวทำละลาย และความเข้มข้นแต่เมื่อเตรียมผิวหน้ายางทั้ง 2 ชั้น พบว่าความแข็งแรงของการยึดติดมีค่าเท่ากับ 12 กิโลนิวตัน/เมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นมากกว่า 4% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดกลับลดลงทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่น้ำมันจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้ายางมีมากและทำให้ผิวหน้าแตก

Lawson และคณะ [15] ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายางโดยใช้ตัวทำละลาย TCI/EA ที่ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก หลังเตรียมเสร็จใหม่ๆ โดยจุ่มยางในตัวทำละลาย 1 นาที ใช้ยางหลายชนิด และมีสูตรยางที่ต่างกัน โดยยาง NP, BR และ SBR ใช้ HAF 50-65 phr น้ำมัน 12 phr และยาง EPDM, CIIR และ CR ไม่ใช้น้ำมัน โดยใช้เทคนิค XRS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) เพื่อศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง TCI/EA และผิวหน้ายาง พบว่าที่ผิวหน้ายางมีปฏิกิริยาแทนที่และปฏิกิริยาการเติมเกิดขึ้นทั้งในยาง NR, BR, SBR และยาง CR ซึ่งพบ %CI ในโครงสร้างเท่ากับ 8.5, 14.2, 14.2 และ 16.7% ตามลำดับ โดย %CI ที่เกิดปฏิกิริยาแทนที่เท่ากับ 9.6, 11.1, 8.3, 12.0% ตามลำดับ และปริมาณคลอรีนต่อหนึ่งพันธะคู่เท่ากับ 0.89, 1.28, 1.78 และ 1.39 ตามลำดับ ส่วนยาง CIIR และยาง EPDM ไม่เกิดปฏิกิริยาแทนที่หรือปฏิกิริยาการเติมเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของยางเป็นพันธะที่อิ่มตัว และพบว่าตัวทำละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่ความลึก 4-5 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำละลาย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนรวมถึงเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ศึกษาความต้านทานความเค้นเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273 และศึกษาความต้านทานความเค้นดัด ตามมาตรฐาน ASTM C393 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเชื่อมประคบของโครงสร้างแซนวิช โดยใช้กาวเป็นตัวเชื่อมประคบ ในการศึกษาจะใช้กาวทั้งหมด สามประเภท ได้แก่ กาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทน และกาวยางนีโอพรีนมาทำการทดสอบ แล้วนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C273 และ ASTM C393 ทดสอบแบบ 4 จุด แล้วจึงนำข้อมูลมาเปรียบเทียบตามแผนการดำเนินงาน แสดงตามภาพที่ 3.1

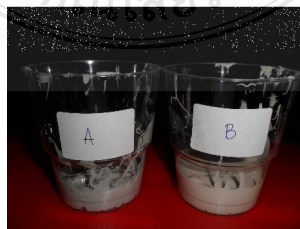
##### 3.1.1 การศึกษาเพื่อเลือกประเภทของกาวที่จะนำมาใช้ในการศึกษา

ในการทำการศึกษานี้จะเน้นกาวที่มีอยู่ในท้องตลาด จากการสำรวจพบว่ากาวในท้องตลาดมีอยู่หลายชนิด แต่งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบกาวที่มีราคาต่ำกว่ากาวอีพอกซี ดังนั้นจึงเลือกกาวที่เป็นกลุ่มของตัวทำละลายอินทรีย์เป็นตัวกลาง (Solvent-Based Adhesive)

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กาวที่หาซื้อได้ทั่วไปในท้องตลาดมา 3 ประเภท ได้แก่ กาวอีพอกซี (Epoxy) กาวยางชนิดนีโอพรีน (Neoprene) และกาวโพลียูรีเทน (Polyurethane) โดยในแต่ละประเภทแบ่งกาวออกเป็น 3 ชนิด คือ กาวอีพอกซี เลือกมาทำการการศึกษา คือ กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า กาวอีพอกซีแบบทนสารเคมี (Chemicals Resistance) และกาวอีพอกซีแบบแห้งช้าชนิดทนน้ำ (Water and Weather Resistance) มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้ว (Solid Content) ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงตามภาพที่ 3.1



(ก) กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า



(ข) กาวอีพอกซีแบบทนเคมี



(ค) กาวอีพอกซีแบบทนน้ำ

ภาพที่ 3.1 ชนิดของกาวอีพอกซี



กาวโพลียูรีเทนหรือพียู เลือกมาทำการศึกษา คือ กาวพียูชนิดผสมโทลูอีน กาวพียูชนิดไม่ผสมโทลูอีน และ กาวพียูชนิด Two-Component Resins มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้ว (Solid Content) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.2



(ก) กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโทลูอีน



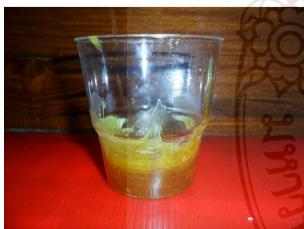
(ข) กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอีน



(ค) กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-Component Resins

ภาพที่ 3.2 ชนิดของกาวโพลียูรีเทน

กาวยางนีโอพรีน เลือกมาทำการศึกษา คือ กาวยางนีโอพรีนชนิดผสมโทลูอีน กาวยางนีโอพรีนชนิดไม่ผสมโทลูอีนและกาวยางนีโอพรีนชนิด Two-Component Resins มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้ว (Solid Content) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.3



(ก) กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอีน



(ข) กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอีน



(ค) กาวยางนีโอพรีนแบบ Two-Component Resins

ภาพที่ 3.3 ชนิดของกาวยางนีโอพรีน

### 3.2 โฟมที่นำมาทำเป็นแกนกลาง (Core)

โฟมที่นำมาทดสอบทำเป็นแกนกลาง (Core) คือ โพลียูรีเทนโฟม จะมีความหนาแน่น 35 Kg/M<sup>3</sup> แสดงตามภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.4 โพลียูรีเทนโฟมที่นำมาทำเป็นแกนกลาง (Core)

### 3.3 แผ่นประกบบนและล่าง (Face)

แผ่นประกบบนและล่าง (Face) ทำจาก เหล็กกรีดร้อน (SS400) มี สองขนาด คือ มีขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 320 มม. และหนา 16 มม. และ ขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 400 มม. หนา 1 มม. มี คุณสมบัติเชิงกล ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกรีดร้อน SS400

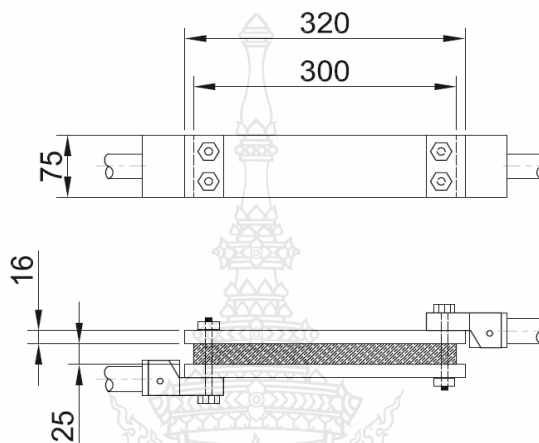
Standard	Grade	Strength	
		Shear (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile (N/mm <sup>2</sup> )
TIS 1227-2539	SS400	330-420	400 - 510

### 3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของกาว

หลังจากได้ทำการเลือกชนิดของกาวแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของกาวทั้งสามชนิด ได้แก่ สมบัติการต้านทานความเค้นเฉือน และ สมบัติการต้านทานความเค้นดัด โดยค่าที่ต้องการคือความสัมพันธ์ระหว่าง แรง และการเสียรูปของกาวชนิดนั้น

### 3.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบหาค่าแรงเฉือน (Shear Stress)

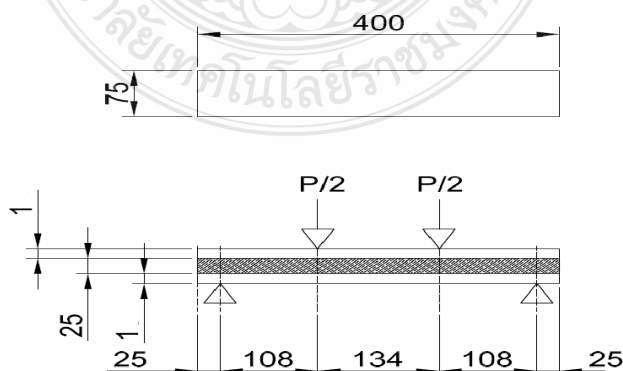
การเตรียมชิ้นทดสอบค่าความต้านทานแรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273 เชื่อมประกบรอยต่อแบบกาวระหว่างเป็นแผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ใช้วัสดุเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) มีขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 320 มม. และหนา 16 มม. แกนกลาง (Core) ทำจากโพลียูรีเทนโฟม มีขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 300 มม. และหนา 25 มม.



ภาพที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความเค้นเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273

### 3.4.2 การทดสอบความเค้นดัด (Bending Stress)

การทดสอบหาค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ตามมาตรฐาน ASTM C393 เชื่อมประกบรอยต่อแบบกาวระหว่างเป็นแผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ใช้วัสดุเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) มีขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 400 มม. และหนา 1 มม. เช็ดทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตน แกนกลาง (Core) ทำจากโพลียูรีเทนโฟม มีขนาด กว้าง 75 มม. ยาว 400 มม. และหนา 25 มม.



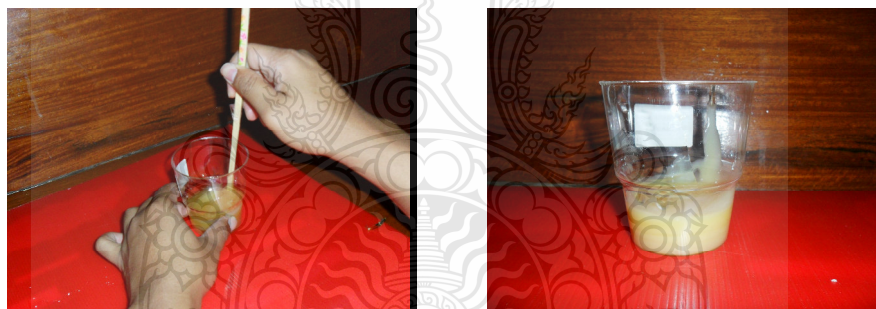
ภาพที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความเค้นดัดตามมาตรฐาน ASTM C393

### 3.5 การเชื่อมประกบด้วยกาว

ในการเชื่อมประกบด้วยกาวต้องมีการเตรียมพื้นผิวที่จะทากาวก่อน โดยเช็ดทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายอะซิโตนเพื่อขจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกให้หมดไป

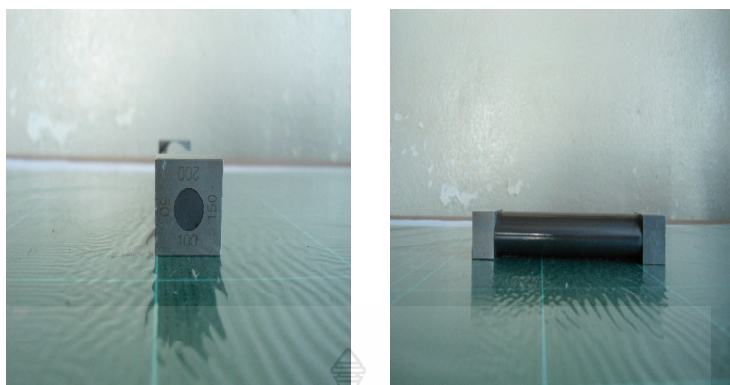


ภาพที่ 3.7 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยสารละลายอะซิโตน

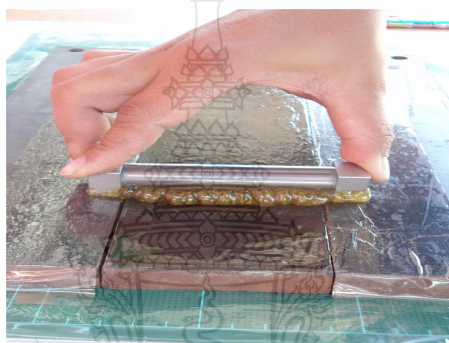


ภาพที่ 3.8 การผสมของกาวที่เป็นแบบ Two-Component Resins

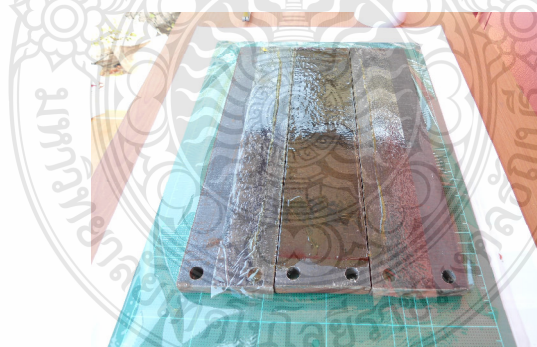
กวนผสมกาวให้เข้ากัน ตามภาพที่ 3.7 ทากาวด้วยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทากาว โดยให้ความหนาของกาว 200  $\mu\text{m}$  ด้วยอุปกรณ์ทากาว ตามภาพที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์ควบคุมความหนาในการทากาว 200  $\mu\text{m}$

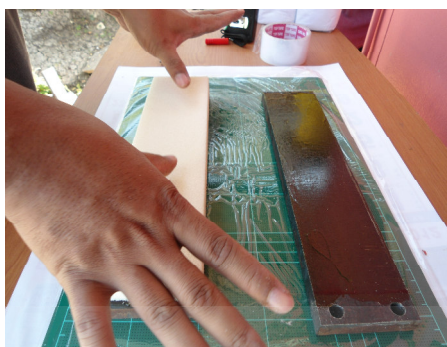


ภาพที่ 3.10 การทากาวให้ได้ความหนา 200  $\mu\text{m}$

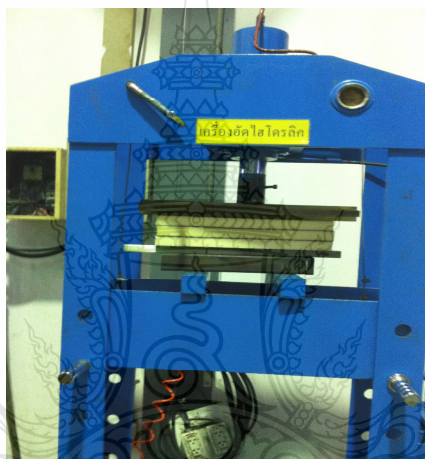


ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานที่ทากาวแล้ว

เมื่อทากาวเสร็จแล้วให้นำฟองน้ำ และ แกนเหล็กมาประกอบติดกันตามภาพที่ 3.12 อัดประสานด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก ตามภาพที่ 3.13 และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.12 ประกอบโครงสร้างวัสดุแกนวิช



ภาพที่ 3.13 การอัดประสานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.14 ชิ้นทดสอบที่ประกอบเป็นโครงสร้างวัสดุแกนวิช ตามมาตรฐาน ASTM C273



ภาพที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่ประกอบเป็น โครงสร้างวัสดุแกนวิช ตามมาตรฐาน ASTM C393

เมื่อได้ชิ้นงานตามภาพที่ 3.14 และ 3.15 แล้ว ชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำมาทดสอบ โดยที่จุดประสงค์ในการทดสอบเพื่อที่จะวัดค่าความแข็งแรงของกาวในแต่ละแบบ ในการทดสอบจะทำการทดสอบจนเกิดความเสียหาย

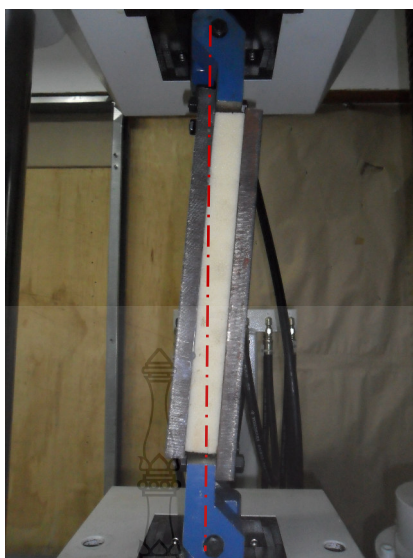
### 3.6 การทดสอบความเค้นเฉือน (Shear Stress)

นำชิ้นทดสอบมาทดสอบความเค้นเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ด้วยอัตราความเร็วคงที่ 2 MM/MIN โดยในแต่ละการทดสอบจะทำการบันทึกขนาดของแรงและค่าการเสียรูป



ภาพที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงเฉือนและแรงดัด GOTECH





ภาพที่ 3.17 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความเค้นเฉือน

### 3.7 การทดสอบความเค้นแรงดัด (Bending Stress)

การทดสอบหาค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ตามมาตรฐาน ASTM C393 เชื่อมประกบรอยต่อแบบกาวระหว่างเป็นแผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ใช้วัสดุเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) มีขนาดกว้าง 75 มม. ยาว 400 มม. และหนา 1 มม. เช็ดทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตน



ภาพที่ 3.18 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความเค้นดัด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกลของกาวทั้งหมดสามประเภท โดย แบ่งประเภทย่อยของกาวแต่ละประเภทออกมามีอีกสามชนิดคือ กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า กาวอีพอกซีแบบทนสารเคมี (Chemicals Resistance) และกาวอีพอกซีแบบแห้งช้าชนิดทนน้ำ (Water and Weather Resistance) กาวโพลียูรีเทน (PU) คือ กาวฟิยูชนิดผสมโทลูอิน กาวฟิยูชนิดไม่ผสมโทลูอิน และกาวฟิยูชนิด Two-Component Resins กาวยางนีโอพรีน เลือกลงมาทำการศึกษา คือ กาวยางนีโอพรีนชนิดผสมโทลูอิน กาวยางนีโอพรีนชนิดไม่ผสมโทลูอินและกาวยางนีโอพรีนชนิด Two-Component-Resins มาทำการทดสอบหาคูณสมบัติความต้านทานแรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM C273 และค่าความต้านทานแรงดัดแบบสี่จุดตามมาตรฐาน ASTM C393

##### 4.1.1 การทดสอบหาคูณสมบัติความต้านทานแรงเฉือน

การทดสอบหาค่าแรงเฉือนของกาวทั้ง สามประเภท มาทำการทดสอบจนเกิดการเสียหายของชิ้นทดสอบ แล้วจึงบันทึกข้อมูลของกาวทั้ง สามประเภท ตามตารางที่ 4.1- 4.3

#### ตารางที่ 4.1 ค่าความเค้นเฉือนของกาวอีพอกซี (Epoxy)

ชิ้นทดสอบ	กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า (N/mm <sup>2</sup> )	กาวอีพอกซีแบบทนเคมี (N/mm <sup>2</sup> )	กาวอีพอกซีแบบทนน้ำ (N/mm <sup>2</sup> )
1	2,550	2,380	2,560
2	2,480	2,350	2,530
3	2,450	2,350	2,510
4	2,390	2,340	2,480
5	2,380	2,330	2,470
ค่าเฉลี่ย	2,450	2,350	2,510

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวอีพอกซีแบบ หนึ่งหน้าจะมีค่าความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด 2,510 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือกาวอีพอกซีแบบแห้งช้า 2,450 N/mm<sup>2</sup> และกาวอีพอกซีแบบทนเค็มจะมีค่าน้อยที่สุด คือ 2,350 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.1.2 การศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวโพลียูรีเทน (PU)

**ตารางที่ 4.2** ค่าความเค้นเฉือนของกาวโพลียูรีเทน

ชั้นทดสอบ	กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโทลูอีน	กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอีน	กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-Component Resins
	ความเค้นเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )	ความเค้นเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )	ความเค้นเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )
1	2,410	2,330	2,430
2	2,390	2,300	2,410
3	2,360	2,240	2,390
4	2,330	2,220	2,380
5	2,310	2,150	2,360
ค่าเฉลี่ย	2,360	2,240	2,390

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากาวโพลียูรีเทนแบบ Two-Component Resin จะมีค่าความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด 2,390 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือกาวโพลียูรีเทนแบบผสมโทลูอีนมีค่า 2,360 N/mm<sup>2</sup> และมีค่าน้อยสุดคือกาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอีน คือ 2,240 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.1.3 การศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวยางนีโอพรีน

**ตารางที่ 4.3** ค่าความเค้นเฉือนของกาวนีโอพรีน

ชั้นทดสอบ	กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอีน	กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอีน	กาวยางนีโอพรีนแบบ Two-Component Resins
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
1	2,260	2,180	2,360
2	2,210	2,180	2,360
3	2,210	2,140	2,290
4	2,130	2,120	2,280

**ตารางที่ 4.3** ค่าความเค้นเฉือนของกาวนีโอพรีน (ต่อ)

ชั้นทดสอบ	กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอีน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอีน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวยางนีโอพรีนแบบ Two-Component Resins (N/mm <sup>2</sup> )
5	2,000	2,000	2,250
ค่าเฉลี่ย	2,160	2,130	2,300

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากาวยางนีโอพรีน แบบ Two-Component Resin จะมีค่าความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด 2,300 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือกาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอีนมีค่า 2,160 N/mm<sup>2</sup> และมีค่าน้อยสุดคือกาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอีน คือ 2,130 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.1.2 การทดสอบหาสมบัติการต้านทานความเค้นดัด

การทดสอบความต้านทานความเค้นดัดของกาวทั้งสามประเภท ทดสอบจนชั้นทดสอบเกิดการเสียหายสูงสุด แล้วจึงทำการบันทึกข้อมูลของกาวทั้งสามประเภท ตามตารางที่ 4.4-4.6 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.4** ค่าความเค้นดัดของกาวอีพอกซี

ชั้นทดสอบ	กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า (N/mm <sup>2</sup> )	กาวอีพอกซีแบบทนเคมี (N/mm <sup>2</sup> )	กาวอีพอกซีแบบทนน้ำ (N/mm <sup>2</sup> )
1	700	640	660
2	698	636	658
3	694	634	653
4	692	630	650
5	690	628	647
ค่าเฉลี่ย	694	633	653

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ากาวอีพอกซีแบบแห้งช้าจะมีค่าความเค้นดัดมากที่สุด คือ 694 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือ กาวอีพอกซีแบบทนน้ำ มีค่าความเค้นดัด 653 N/mm<sup>2</sup> และกาวที่มีค่าน้อยที่สุดคือ กาวอีพอกซีแบบทนเคมี มีค่าความเค้นดัด 633 N/mm<sup>2</sup>

**ตารางที่ 4.5** ค่าความเค้นดัดของกาวโพลียูรีเทน

ชั้นทดสอบ	กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโทลูอิน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอิน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-Component Resins (N/mm <sup>2</sup> )
1	600	545	615
2	595	544	610
3	595	540	607
4	593	538	606
5	590	535	600
ค่าเฉลี่ย	594	540	607

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากาวโพลียูรีเทนแบบ Two – Component Resin. จะมีค่าความเค้นดัดมากที่สุด คือ 607 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือ กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอิน มีค่าความเค้นดัด 594 N/mm<sup>2</sup> และกาวที่มีค่าน้อยที่สุด คือ กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโทลูอิน มีความเค้นดัด 540 N/mm<sup>2</sup>

**ตารางที่ 4.6** ค่าความเค้นดัดของกาวยางนีโอพรีน

ชั้นทดสอบ	กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโทลูอิน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอิน (N/mm <sup>2</sup> )	กาวยางนีโอพรีนแบบ Two-Component Resins (N/mm <sup>2</sup> )
1	460	458	480
2	458	455	470
3	456	448	466
4	450	443	460
5	447	440	455
ค่าเฉลี่ย	454	448	466

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ากาวยางนีโอพรีน แบบ Two – Component Resin จะมีค่าความเค้นดัดมากที่สุด คือ 466 N/mm<sup>2</sup> รองลงมาคือ กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอิน มีค่าความเค้นดัด

454 N/mm<sup>2</sup> และกาวที่มีค่าน้อยที่สุด คือ กาวยางนิโอพรีนแบบไม่ผสมโทลูอีน มีความเค้นดัด 448 N/mm<sup>2</sup>

#### 4.1.3 ผลการทดลองทางกายภาพจากการทดสอบแรงเฉือน

##### 1) ผลการทดลองทางกายภาพความเค้นเฉือนของกาวอีพอกซี



ภาพที่ 4.1 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นเฉือนที่เชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซี

จากภาพที่ 4.1 แนวการเสียหายที่เกิดบนชิ้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนวด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็นมุมเฉียง แล้วจึงศึกษาตามแนวทากาวที่เชื่อมประกบ (Interface) จะเห็นได้ว่ามี โฟมพอลิยูรีเทน ติดอยู่กับเหล็กของชิ้นทดสอบ

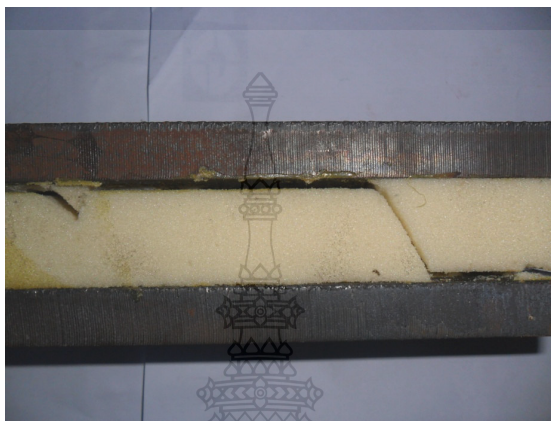
##### 2) ผลการทดลองทางกายภาพความเค้นเฉือนของกาวโพลียูรีเทน



ภาพที่ 4.2 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นเฉือนที่เชื่อมประกบด้วยกาวโพลียูรีเทน

จากภาพที่ 4.2 แนวการเสียหายที่เกิดบนชิ้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนวด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็นเหมือนภูเขา แล้วจึงนึกขาดตามแนวทาบที่เชื่อมประกบ (Interface) และจะเห็นได้ว่ามีโฟมพอลิยูรีเทนติดอยู่กับเหล็กของชิ้นทดสอบ

### 3) ผลการทดลองทางกายภาพของกาวยางนีโอพรีน



ภาพที่ 4.3 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นเฉือนที่เชื่อมประกบด้วยกาวนีโอพรีน

จากภาพที่ 4.3 แนวการเสียหายที่เกิดบนชิ้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนวด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นมุมเฉียงประมาณ  $45^\circ$  แล้วจึงนึกขาดตามแนวทาบที่เชื่อมประกบ (Interface) จะเห็นได้ว่ามีโฟมพอลิยูรีเทนติดอยู่กับเหล็กของชิ้นทดสอบ

### 4.1.4 ผลการทดลองทางกายภาพจากการทดลองความเค้นดัด

#### 1) ผลการทดลองทางกายภาพความเค้นดัดของกาวอีพอกซี



ภาพที่ 4.4 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นดัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซี

จากภาพที่ 4.4 แนวการเสียหายที่เกิดบนชิ้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนว ด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็นมุมเฉียงประมาณ  $45^\circ$  เกิดขึ้นที่บริเวณจุดกดของชิ้นทดสอบ แล้วจึงแยกขาดตามแนวทาบที่เชื่อมประกบ (Interface) จะเห็นได้ว่ามีโพลีเอทิลีนติดอยู่กับเหล็กของชิ้นทดสอบ

2) ผลการทดลองทางกายภาพความเค้นดัดของกาวโพลีเอทิลีน



ภาพที่ 4.5 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นดัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวโพลีเอทิลีน

จากภาพที่ 4.5 แนวการเสียหายที่เกิดบนชิ้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนว ด้านหนึ่งการเสียหายเกิดขึ้นที่จุดกดของเครื่องทดสอบมีมุมเฉียง เกิดขึ้นที่จุดรองรับชิ้นงาน แล้วจึงเกิดการฉีกขาดตามแนวทาบที่เชื่อมประกบ (Interface) จะเห็นได้ว่ามีโพลีเอทิลีนติดอยู่กับเหล็กของ ชิ้นทดสอบ

3) ผลการทดลองทางกายภาพความเค้นดัดของกาวยางนีโอพรีน



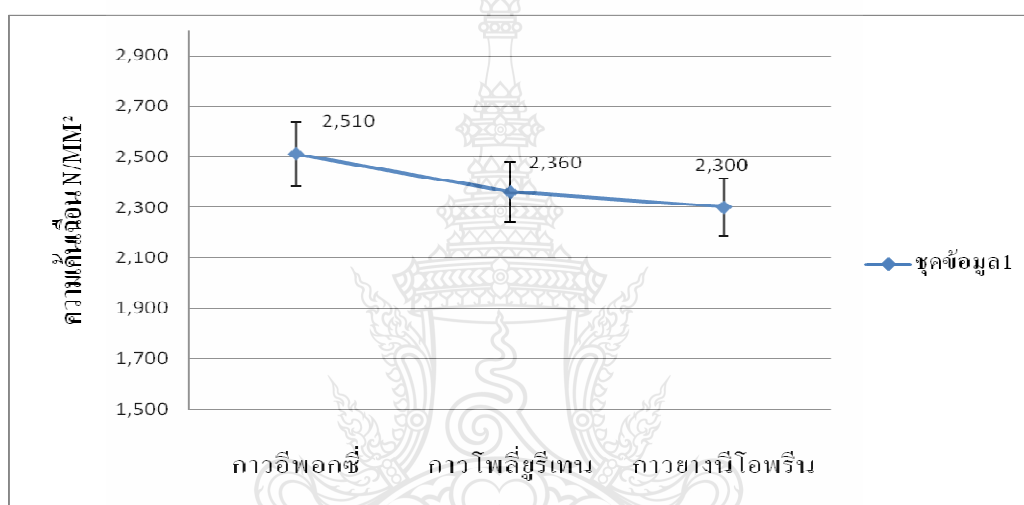
ภาพที่ 4.6 การเสียหายของชิ้นทดสอบความเค้นดัดที่เชื่อมประกบด้วยกาวยางนีโอพรีน



จากภาพที่ 4.6 แนวการเสียหายที่เกิดบนชั้นทดสอบจะเกิดจากแนวด้านหนึ่ง ไปยังอีกแนวด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็นมุมเฉียงเกิดขึ้นที่ปลายของชั้นทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เพราะกาวยางมีคุณสมบัติยึดหยุ่นได้ดี แล้วจึงแยกขาดตามแนวกาวที่เชื่อมประกบ (Interface) จะเห็นได้ว่ามีโฟมพอลิยูรีเทนติดอยู่กับเหล็กของชั้นทดสอบ

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.2.1 วิเคราะห์ความต้านทานเค้นเฉือน (Shear Strength)

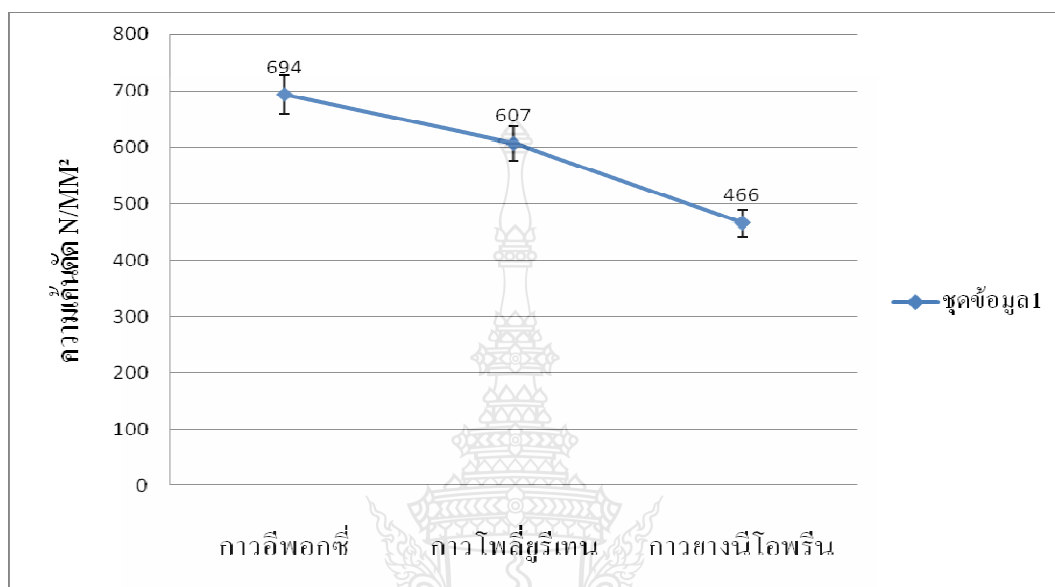


ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเค้นเฉือนของกาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทนและกาวยางนีโอพรีน

จากภาพที่ 4.7 กาวอีพอกซีจะมีค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงเฉือนได้ดีที่สุดคือ 2,470 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากกาวอีพอกซีมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วมากที่สุดประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ และมีพันธะแข็งแรงมากเป็นพวกเทอร์โมเซตติง รองลงมาคือ กาวโพลียูรีเทน มีความต้านทานแรงเฉือน คือ 2,360 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากกาวโพลียูรีเทนที่นำมาทดสอบ มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าที่มีความต้านทานแรงเฉือนที่น้อยที่สุดคือ กาวยางนีโอพรีน 2,250 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ กาวโพลียูรีเทนและกาวยางที่นำมาทดสอบจัดอยู่ในพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกจึงมีความยึดหยุ่นสูงทำให้แข็งแรงน้อยกว่าอีพอกซีที่เป็นพลาสติกชนิด

เทอร์โมเซตติง และมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้ว ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ต่างกับกาว อีพอกซีที่มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้ว ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์

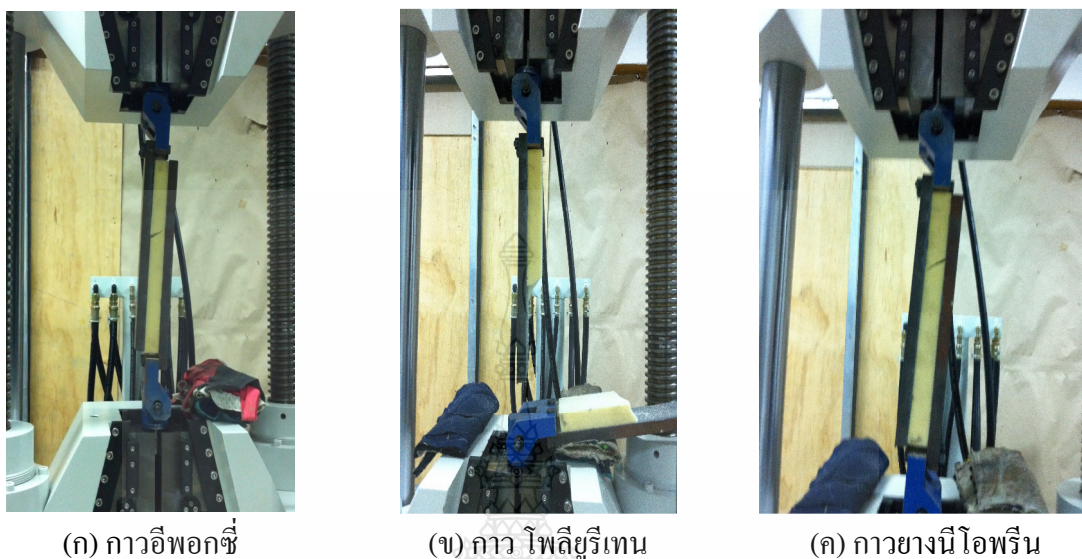
#### 4.2.2 วิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงคด (Bending Strength)



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงคดของกาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทน และกาวยางนีโอฟริน

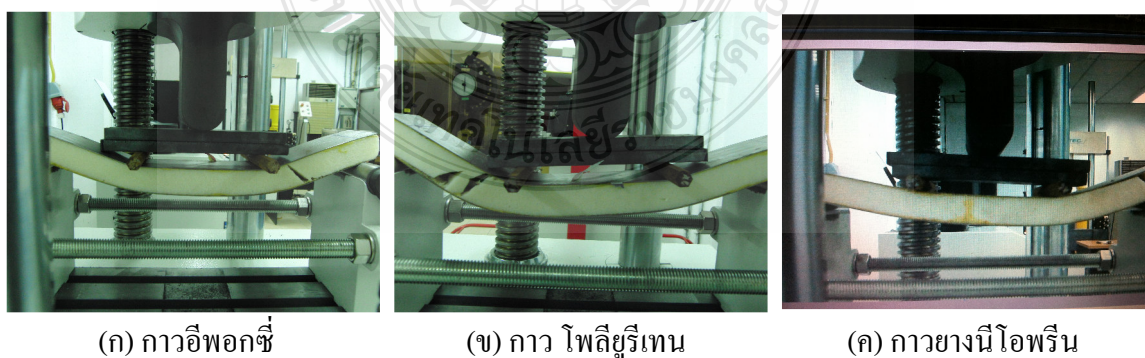
จากภาพที่ 4.8 กาวอีพอกซีจะมีค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงคด ได้ดีที่สุดคือ 694 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากกาวอีพอกซีมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วมากที่สุด คือ 98 เปอร์เซ็นต์ และมีพันธะแข็งแรงมากเป็นพวกเทอร์โมเซตติง รองลงมาคือ กาวโพลียูรีเทน มีค่าความต้านทานแรงคด คือ 607 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากกาวโพลียูรีเทนที่นำมาทดสอบ มีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าที่มีความต้านทานแรงคดน้อยที่สุดคือ กาวยางนีโอฟริน 466 N/mm<sup>2</sup> เนื่องจากมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ กาวโพลียูรีเทน และกาวยางจัดอยู่ในพลาสติกแบบเทอร์โมพลาสติกจึงมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้แข็งแรงน้อยกว่ากาวอีพอกซีเพราะเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติง และมีเนื้อกาวที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวหลังจากที่แห้งแล้วประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุแกนวิชภายใต้สภาวะแรงเฉือน



ภาพที่ 4.9 ความเสียหายของชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นเฉือน

จากภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่ากาวทั้งสามชนิดจะเกิดการเสียหายที่เกิดขึ้นจากแกนกลาง (Core) แล้วจึงฉีกขาดจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เพราะว่าแกนกลาง (Core) มีความแข็งแรงน้อยกว่า กาวที่นำมาใช้ทดสอบ หลังจากนั้นจึงฉีกขาดออกจากกันแล้วจึงเกิดการฉีกขาดตามแนวที่เชื่อมด้วยกาว (Interface) ความเสียหายนี้เกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนของวัสดุแกนมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงเฉือนของวัสดุแกน



ภาพที่ 4.10 ความเสียหายของชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นดัด

จากภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าความเสียหายของชิ้นงานที่เชื่อมประกบด้วยกาวอีพอกซี กาว โพลียูรีเทนและกาวยางนีโอพรีน จะเกิดความเสียหายจากแกนกลาง (Core) และมีลักษณะเป็นแนวเฉียงจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง แล้วจึงฉีกขาดตามแนวทากาว (Interface) ความเสียหายนี้เกิดขึ้นเมื่อความเค้นดัดของวัสดุแกนมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดัดของวัสดุแกน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึง ผลสรุปของการวิจัย ในสมบัติเชิงกล คือ ความต้านทาน ความเค้นเฉือน ความต้านทานความเค้นดัด ของกาวอีพอกซี กาวโพลียูรีเทน และกาวยางนีโอพรีน ที่นำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C273 และ ASTM C393 รวมถึงข้อเสนอนี้

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

5.1.1 กาวอีพอกซี (Epoxy) จะมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ในการทดสอบของกาวทั้งสามชนิดจะเห็นว่า ค่าความเค้นเฉือนมากที่สุดมีค่าเฉลี่ย  $2,510 \text{ N/mm}^2$  คือกาวอีพอกซีแบบทนนํ้า รองลงมาคือกาวอีพอกซีแบบแห้งช้า มีค่าความต้านทานแรงเฉือน  $2,450 \text{ N/mm}^2$  กาวที่มีค่าน้อยที่สุดคือกาวอีพอกซีแบบทนเคมี คือ  $2,350 \text{ N/mm}^2$  และมีค่าความเค้นดัดที่ดีที่สุดคือ กาวอีพอกซีแบบแห้งช้า  $694 \text{ N/mm}^2$  รองลงมาคือกาวอีพอกซีแบบทนนํ้า  $653 \text{ N/mm}^2$  และมีความเค้นดัดน้อยที่สุดคือ กาวอีพอกซีแบบทนเคมี  $633 \text{ N/mm}^2$

5.1.2 กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane) จะมีสมบัติเชิงกลรองจากกาวอีพอกซี แต่จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่ากาวยางนีโอพรีน ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยความเค้นเฉือนมากที่สุด  $2,390 \text{ N/mm}^2$  คือกาวโพลียูรีเทนแบบ Two – Component Resin เนื่องจากมีการผสม Hardener ทำให้กาวมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และรองลงมาคือกาวโพลียูรีเทนแบบผสม โทลูอิน  $2,360 \text{ N/mm}^2$  และกาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสม โทลูอิน  $2,240 \text{ N/mm}^2$  และมีความเค้นดัดเฉลี่ยมากที่สุด ก็ยังเป็นกาวโพลียูรีเทนแบบ Two – component resin.  $607 \text{ N/mm}^2$  รองลงมาคือกาวโพลียูรีเทนแบบผสม โทลูอิน  $594 \text{ N/mm}^2$  และมีค่าน้อยที่สุดก็คือ กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสม โทลูอิน เนื่องจากกาวชนิดนี้มีค่าการแห้งตัวเร็วมากทำให้กาวเริ่มแห้งตัวก่อนการประกอบชิ้นงานเสร็จ

5.2.3 กาวยางนีโอพรีน (Neoprene) จะมีสมบัติเชิงกลน้อยที่สุด กาวที่มีค่าเฉลี่ยความเค้นเฉือนที่ดีที่สุดคือ กาวยางนีโอพรีนแบบ Two – Component Resin  $2,300 \text{ N/mm}^2$  รองลงมาคือ กาวยางนีโอพรีนแบบผสม โทลูอิน  $2,160 \text{ N/mm}^2$  และมีค่าน้อยที่สุด คือ กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสม โทลูอิน  $2,130 \text{ N/mm}^2$  และมีความเค้นดัดเฉลี่ยมากที่สุด ก็ยังเป็นกาวยางนีโอพรีนแบบ Two – Component Resin  $466 \text{ N/mm}^2$  รองลงมาคือกาวยางนีโอพรีนแบบผสม โทลูอิน  $454 \text{ N/mm}^2$  และมีค่าน้อยที่สุดก็คือ กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสม โทลูอิน  $448 \text{ N/mm}^2$  เนื่องจากกาวชนิดนี้มีค่าการแห้งตัวเร็วมากทำให้กาวเริ่มแห้งตัวก่อนการประกอบชิ้นงานเสร็จ

5.1.4 กาวทั้ง 3 ชนิด สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประภระหว่างวัสดุต่างชนิดกันได้เนื่องจากจะเห็นได้ว่าชั้นทดสอบมีการเสียหายเกิดขึ้นจากแกนกลางเพราะว่าค่าความเค้นของวัสดุแกนมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของวัสดุแกน การเสียหายจะเกิดที่แกนก่อนที่จะไปเสียหายที่แนวเชื่อมประภของกาว

5.1.5 สมบัติเชิงกลของเหล็กกรีดร้อน (SS400) มีค่าความเค้นที่น้อยกว่าค่าความเค้นเฉือนของโครงสร้างแซนวิช โดยที่เหล็ก SS400 มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุด  $420 \text{ N/mm}^2$  แต่โครงสร้าง แซนวิชมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุด คือ  $2,510 \text{ N/mm}^2$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

กาวที่มีค่าการแห้งตัว (Drying Time) ที่เร็วทำให้การเชื่อมประภชิ้นงานทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร ควรจะเลือกกาวที่มีค่าการแห้งตัวที่ใกล้เคียงกัน



## เอกสารอ้างอิง

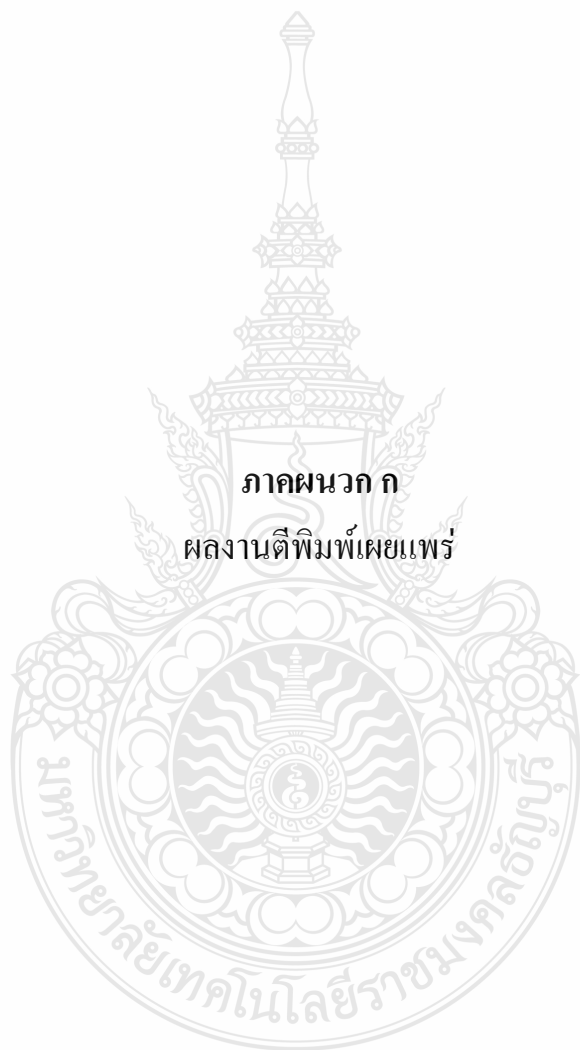
- [1] Allen, H.G. 1969. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon: Press. London. UK.
- [2] Burman, M. 1998. Fatigue Crack Initiation and Propagation in Sandwich Structures. Division of Lightweight Structures. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.
- [3] Adam, R.D. (2007). Adhesive bonding science, technology and application. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [4] ปิ่นสุดา ปิติรัถย์สกุล. (2547). โพลีเมอร์ (พิมพ์ครั้งที่ 12). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [5] ณัฐวดี สุมโนจิตราภรณ์ และสุปราณี แก้วภิรมณ์ . การศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อนองกาวอีพอกซี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา, 2555
- [6] อรรถพล ตระเร. (2551). คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [7] Hohe, J. and Librescu, L. 2004. Core and Face-Sheet Anisotropy in Deformation and Buckling of Sandwich Panels. AIAA Journal, 42: 149-158.
- [8] ASTM C273, "Standard Test for Shear Properties of Sandwich Constructions". American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [9] ASTM standard C393, "Standard Test for Flexural properties of Sandwich Constructions". American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [10] Ashcroft, I.A., Comyn, J., & Tellwright, S. (2009). Adhesives for automotive windscreen replacement: Kinetics of cure and bond strength. International Journal of Adhesion & Adhesive, 29, 155 -156
- [11] Sawa, T., Liu, J., Nakano, K. and Tanaka, J., A two – dimensional stress analysis of single – lab adhesive joint of dissimilar adherends subjected to tensile load, Journal of Adhesion Science and Technology, 14, 43-66, 2000
- [12] Dechwayukul, C., Rubin, C. A., and Hahn, G.T., Analysis of the effect thin sealant layers in Aircraft Structure Joint AIAA Journal, 41, 2216 – 2218, 2003.

- [13] Dechwayukul, C., Thongruang, W., Suwannao J. and Fongsamoot, T., Spring Element for modeling of 2-D adhesively bonded lap joints, Conference Mechanical Engineering network of Thailand, 47-51, 2003
- [14] Fernandez-Garcia, J. C., Huerta, F. and Orgiles-Barcelo, A.C. 1990. Effect of different surface modifications on the adhesion of vulcanized styrene-butadiene rubber. Rubber chemistry and technology. 64: 510-521.
- [15] Lawson, D.f., Kim, K.J. and Fritz, T.L. 1997. Chemical modification of rubber surfaces: XPS survey of the reaction of trichloroisocyanuric acid at the surfaces of vulcanized elastomers. Rubber chemistry and technology. 69:245-252.









ภาคผนวก ก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Department of Alternative  
Energy Development and Efficiency  
**MINISTRY OF ENERGY**

กำหนดการและบทความ



การประชุมสัมมนาวิชาการ  
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5  
The 5th Thailand Renewable Energy For Community Conference

**TREC-5**

18 - 20 ธันวาคม 2555



จัดโดย สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน(แห่งประเทศไทย)  
ณ สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

**adiCET**



## การประชุมสัมมนาวิชาการ

ครั้งที่ 5

## พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

The 5<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)

18-20 December 2555

หน้าแรก	การส่งบทความ	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน	ติดต่อเรา
---------	--------------	---------------	---------------	-----------

เมนู
Call For Papers
ความเป็นมา
สารจากประธาน
คณะกรรมการ
กำหนดการสำคัญ
โปรแกรมการประชุม
การส่งบทความ
การลงทะเบียน
Social Program
สถานที่จัดงาน
สถานที่พักและการเดินทาง
ผู้สนับสนุน
ติดต่อเรา

## คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

1. รศ.ดร.วัฒนพงศ์ รัชชวีเชียร
2. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน
3. ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
4. ศ.ดร.จงจิตร ธีรฤพล
5. Prof. Dr. Joseph KHEDARI
6. รศ.ดร.นายทศ สงค์ธนาพิทักษ์
7. ผศ.ดร.สมชัย ธีรฤพล
8. ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด
9. คุณอำนวย ทองสกลิต
10. ผศ.ดร.เรืองเดช วงศ์หล้า

## คณะกรรมการดำเนินงาน

ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	ประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	รองประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์	กรรมการ
ผศ.ดร. ตอพงษ์ ภิระชาติ	กรรมการ
ดร. สมณมาลัย เนียมกลาง	กรรมการ
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	กรรมการและเลขานุการ

## คณะกรรมการฝ่ายบทความ

ดร. ณัฐยา ตันดรานนท์	ประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์	รองประธาน
ดร. วิษระ วงศ์บุญโญ	กรรมการ
ดร. อนสรณ์ ธนารักษ์	กรรมการ
ดร. ประไพธาร์ ธนารักษ์	กรรมการ
ดร. รวีภา ยงประยูร	กรรมการ
นางสาวสิริสรณ์ สิทธิรินทร์	กรรมการและเลขานุการ

## คณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้และการลงทะเบียน

รศ.ดร. วัฒนพงศ์ รัชชวีเชียร	ประธาน
ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	รองประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	กรรมการ
ดร. สมณมาลัย เนียมกลาง	กรรมการและเลขานุการ

## คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ

ดร. วิษี หาญเมืองใจ	ประธาน
นายสุชัยจัน ศรีแก้ว	รองประธาน
นายกฤษณะ ศิริปก	กรรมการ
นางปณิตา สิมสกุล	กรรมการ
นายอานนท์ ผัดแปง	กรรมการและเลขานุการ

## คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์

ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	ประธาน
ดร. บุญยงค์ ปลั่งกลาง	รองประธาน
ดร. สมณมาลัย เนียมกลาง	กรรมการ
อ. เจนจิรา เขียมดี	กรรมการ
นายภาณุพงษ์ อินต๊ะวงศ์	กรรมการและเลขานุการ

## คณะกรรมการฝ่ายพิธีการและการต้อนรับ

ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	ประธาน
อ. เจนจิรา เขียมดี	รองประธาน
ดร. บุญยงค์ ปลั่งกลาง	กรรมการ
ดร. ณัฐยา ตันดรานนท์	กรรมการ
ดร. วิษี หาญเมืองใจ	กรรมการ
นางปณิตา สิมสกุล	กรรมการและเลขานุการ

## สารบัญ

บทความ	หน้า
<b>กลุ่มที่ 4 การประหยัดพลังงาน (EC) (ต่อ)</b>	
EC011 การทดสอบสมรรถนะของพัดลมเซนติฟูกอลเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไทย สมพจน์ คำแก้ว คมกฤษ กิติพร บุญฤทธิ์ ปันตาลี บารมี ช่างตรี	346
<b>กลุ่ม 5 วัสดุศาสตร์เพื่อการพัฒนาพลังงานและการอนุรักษ์ (ME)</b>	
ME001 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 อรรถพล ไชยรา ศิวกร อ่างทอง	353
ME002 การแยก 4-อะมิโนฟีนอลด้วยกระบวนการ Micellar-Enhanced Ultrafiltration (MEUF) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวผสม SDS/CTAB กนกพร ผ่องสวนอ้อย อำไพ ชนะไชย	357
ME003 การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จิรพงษ์ พงษ์สีทอง มนุศักดิ์ จานทอง มานพ แยมแพง วารุณี อริยวิริยะนันท์ พงศ์พิชญ์ ส่วนภูษา จักรวาล บุญหวาน นกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ์ พงษ์พิศณุ เมืองเจริญ ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนะ	364
ME004 แผงรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทำจากวัสดุเทอร์โมพลาสติก : ผลของค่าการนำความร้อนและขนาดพื้นที่ดูดซับแสง ธวัชชัย มีแก้ว วารุณี อริยวิริยะนันท์ มานพ แยมแพง พงศ์พิชญ์ ส่วนภูษา จักรวาล บุญหวาน นกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ์ พงษ์พิศณุ เมืองเจริญ ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนะ	376
ME005 การศึกษาอิทธิพลของภาวะในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแกนวิช มนตรี การพัคซี ศิริชัย ต่อสกุล	384
ME006 การทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยอิเล็กโตรไลต์กึ่งของแข็ง สุรศักดิ์ แสนทวีสุข กิตติชัย โล่ห์พนา เทพกร ลีลาแต้ม	388

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5  
18 – 20 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

## การศึกษาอิทธิพลของกาวในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแซนวิช Influence Study of the Adhesion for Joining Sandwich Material Joint.

ME005

มนตรี การพิทักษ์ ศิริชัย ต่อสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 08 6344 5244 E-mail: gear\_gold@hotmail.com

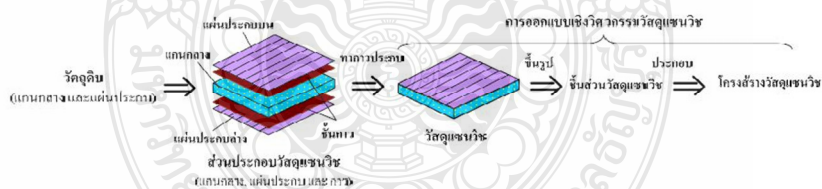
### 1. บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกาวในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแซนวิช (Sandwich Material) เพื่อศึกษาหาสมบัติเชิงกลของกาวและเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตของวัสดุแซนวิช โดยโครงสร้างของวัสดุแซนวิชที่นำมาทดสอบประกอบด้วยแผ่นประกบด้านบนและด้านล่างทำจากเหล็กกล้าอ่อน (SS400) แกนกลางทำจากโพลียูรีเทนโฟม ชนิดของกาวที่นำมาทดสอบมี 3 ประเภท คือ กาวอีพ็อกซี กาวโพลียูรีเทน และกาวยางซีโอปรีน ทากาวที่มีความหนา 200  $\mu\text{m}$ . ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลหาความต้านทานแรงเฉือน ตามมาตรฐาน ASTM C-273 พบว่ากาวทั้ง 3 ประเภท มีค่าความต้านทานแรงเฉือนใกล้เคียงกันเนื่องจากชั้นทดสอบมีการฉีกขาดที่แกนโฟม จึงสรุปได้ว่ากาวทั้ง 3 ประเภท มีคุณสมบัติในการเชื่อมประกบโครงสร้างวัสดุแซนวิชที่แผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ใช้วัสดุเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) แกนกลาง (Core) ทำจากโฟม

คำสำคัญ : โครงสร้างวัสดุแซนวิช, กาว, ความต้านทานแรงเฉือน, มาตรฐาน ASTM C273

### 2. บทนำ

โครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) เป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (composite material) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นประกบบนและล่าง (Faces) มีความบางแต่มีคามแข็งแรงสูง ส่วนแกนกลาง (Core) เป็นวัสดุอ่อน [1] วัสดุแซนวิชถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยมีคุณสมบัติเด่นคือ มีโครงสร้างเบา [2] แผ่นประกบรับความเค้นดึง และความเค้นอัด ส่วนแกนกลางรับความเค้นเฉือนเท่านั้น [3]



รูปที่ 1 โครงสร้างของวัสดุแซนวิช

แผ่นประกบและแกนของวัสดุแซนวิชจะถูกเชื่อมประกบเข้าด้วยกัน ด้วยกาวดังรูปที่ 1 โดยจะใช้กาวอีพ็อกซีเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันกาวที่ใช้งานมีอยู่หลายชนิด ในงานวิจัยนี้จึงทำการวิจัยกาวชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีราคาต่ำกว่ากาวอีพ็อกซีและสามารถขึ้นรูปแล้วไม่เกิดการเสียหายของชิ้นงาน ทำให้ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุแซนวิช

### 3. วิธีการทดลอง

ทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear stress) ตามมาตรฐาน ASTM C-273 เชื่อมประกบรอยต่อแบบ กวาระหว่างแผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ทำจากวัสดุเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) มีขนาดกว้าง 75 MM. ยาว 320 MM. และหนา 16 MM. เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ส่วนแกนกลาง (Core) ทำจากโฟมมีขนาดกว้าง 75 MM. ยาว 300 MM. และหนา 25 MM. ชนิดของกาวที่นำมาทดสอบมี 3 ประเภท แต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ กาวอีพ็อกซีแบบแห้งช้า กาวอีพ็อกซีแบบทนเคมี กาวอีพ็อกซีแบบทนน้ำ กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโพลูอีโน กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโพลูอีโน กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-component resins กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโพลูอีโน กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโพลูอีโน และกาวยางนีโอพรีนแบบ Two-component resins ทากาวทั้งแผ่นประกบบนล่าง และแกนกลางให้มีมีความหนาที่ ความหนา 200  $\mu\text{m}$ . อัดประสานเข้าด้วยกันทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบมาทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ด้วยอัตราความเร็วคงที่ 2 mm/min. ทดสอบทั้งหมดอย่างละ 5 ชิ้น



รูปที่ 2 การติดตั้งชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-273

### 4. ผลการทดลอง

จากการเตรียมการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C-273 ตามรูปที่ 2 ทำให้สามารถทราบถึงค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวในชนิดต่างๆ ตามตารางที่ 1 – 3 และทราบถึงลักษณะในการเสียหายของโครงสร้างวัสดุแกนวิช จะเกิดขึ้นที่แกนโฟม ตามรูปที่ 3 เหมือนกันทุกชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงการทดสอบแรงเฉือนของกาวอีพ็อกซี

ชิ้นทดสอบ	กาวอีพ็อกซี แบบแห้งช้า	กาวอีพ็อกซี แบบทนเคมี	กาวอีพ็อกซี แบบทนน้ำ
	ค่าความต้านเฉือน (KN.)	ค่าความต้านเฉือน (KN.)	ค่าความต้านเฉือน (KN.)
1	2.55	2.33	2.51
2	2.48	2.35	2.48
3	2.39	2.38	2.56
4	2.38	2.35	2.53
5	2.45	2.34	2.47
ค่าเฉลี่ย	2.45	2.35	2.51

ตารางที่ 2 แสดงการทดสอบค่าความเค้นเฉือนของกาวกาวโพลียูรีเทน

ชั้นทดสอบ	กาวโพลียูรีเทนแบบผสมโพลูอิน	กาวโพลียูรีเทนแบบไม่ผสมโพลูอิน	กาวโพลียูรีเทนแบบ Two-component resins
	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)
1	2.41	2.33	2.39
2	2.36	2.30	2.43
3	2.31	2.22	2.41
4	2.39	2.24	2.38
5	2.33	2.15	2.36
ค่าเฉลี่ย	2.36	2.25	2.34

ตารางที่ 3 แสดงการทดสอบค่าความเค้นเฉือนของกาวยางนีโอพรีน

ชั้นทดสอบ	กาวยางนีโอพรีนแบบผสมโพลูอิน	กาวยางนีโอพรีนแบบไม่ผสมโพลูอิน	กาวยางนีโอพรีน Two-component resins
	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)	ค่าความเค้นเฉือน (kN.)
1	2.21	2.12	2.36
2	2.13	2.14	2.28
3	2.26	2.18	2.25
4	2.21	2.00	2.36
5	2.00	2.18	2.29
ค่าเฉลี่ย	2.16	2.13	2.30



รูปที่ 3 แสดงการฉีกขาดของชั้นทดสอบ

### 5. สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์แนวของการเสียหายของวัสดุแซนวิช เกิดการฉีกขาดที่แกนโฟมเป็นอันดับแรกจากรูปที่ 3 และ จากตารางที่ 1-3 กาวทั้ง 3 ประเภทมีค่าความต้านทานแรงเฉือนใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าของกาวที่ไม่ผสมโพลูอินจะมีค่าที่น้อยกว่า กาวชนิดอื่นในกาวกลุ่มเดียวกันเพราะว่าการแห้งตัว (Drying Time) ที่มากกว่ากาวตัวอื่นทำให้การยึดติดของกาวไม่ดี แต่กาวทั้ง 3 ชนิดก็สามารถใช้ในการเชื่อมประกอบได้กับโครงสร้างวัสดุแซนวิชที่แผ่นประกบบนและล่าง (Faces) ใช้วัสดุเหล็ก แผ่นรีดร้อน (SS400) ส่วนแกนกลาง (Core) ทำจากโฟม



## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Allen, H.G. 1969. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon: Press. London. UK.
- Bull, P. 2004. Damage Tolerance and Residual Strength of Composite Sandwich Structures. KTH Aeronautical and Vehicle Engineering. Stockholm. Sweden.
- [2] Pflung, J., Vagrimde, B. and Verpoest, I. 2002. Material efficiency and cost effectiveness of Sandwich Materials, Katholieke University. Leuven. Belgium.
- [3] Burman, M. 1998. Fatigue Crack Initiation and Propagation in Sandwich Structures. Division of Lightweight Structures. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.
- [4] Hohe, J. and Librescu, L. 2004. Core and Face-Sheet Anisotropy in Deformation and Buckling of Sandwich Panels. AIAA Journal, 42: 149-158.
- [5] Starlinger, A. 1991. Development of Efficient Finite Shell Elements for Analysis of Sandwich Structures under Large Instabilities. VDI-Verlag GmbH. Duesseldorf. Germany.
- [6] Zenkert, D. 1997. The Handbook of Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Service. West Midlands. UK.
- DIN 53293. 1982. Pruefung von Kernverbunden: Biegeversuch. Deutsche Institut fuer Normung.V.
- [7] David, E. and Lazer, A. (2003). Adhesive bonding between aluminium and polytetrafluoroethylene. Journal of Material Processing Technology 143-144, 191-194
- [8] Charoenyut, D. Carol A. Rubin and George T. Hahn (2003). Analysis of the Effects of thin Sealant Layers in Aircraft Structural Joint. J. AIAA. 2216-2227
- [9] Takiguchi, M. and Yoshida, F. (2001). Plastic bending of adhesive-bonded sheet metals. Journal of Material Processing Technology. 113, 743-748.
- [10] Charoenyut, D. Carol A. Rubin and George T. Hahn (2003). Analysis of the Effects of Thin Sealant Layers in Aircraft Structural Joint. J. AIAA. 2216-2227
- [11] David, E and Lazar, A. (2003) Adhesive bonding between aluminium and polytetrafluoroethylene. Journal of Material Processing Technology. 143-144, 191-194
- [12] Sawa, T., Liu, J., Nakano, K. and Tanaka, J. (1999). A two-dimensional stress analysis of single – lap adhesive joint of dissimilar adherends subjected to tensile load. J. Adhesion Sci. Technol. 14, 44-66
- [13] Takiguchi, M. and Yoshida, F. (2001). Plastic bending of adhesive-bonded sheet metals. Journal of Material Processing Technology. 113, 743-748

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายมนตรี การพัคชี
วัน เดือน ปีเกิด	6 เมษายน 2521
ที่อยู่	75/5 หมู่ 5 ตำบลमारวิชัย อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปี พ.ศ. 2546
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2546 – พ.ศ. 2547	บริษัท ไทยเซ็นทรัลเคมี จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2547 – พ.ศ. 2552	บริษัท ไทยนันทาเรชั่น เคมีคอล จำกัด
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	บริษัท ยูนิเวนเบลท์อินเตอร์เนชันแนล จำกัด

