

รายงานวิจัยแบบสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาพรีเพ็กแนวใหม่คุณภาพสูงที่ใส่เส้นใยคาร์บอนสำหรับวัสดุแกนแบบรังผึ้ง
และเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างแบบรังผึ้ง

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน

ประจำปีงบประมาณ 2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายพัฒนาวัสดุพรีเฟลกต์คุณภาพสูงจากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำโครงสร้างรังผึ้งโดยมีระบบเรซินสามส่วน คือ เบนซอกซาซินเรซิน อีพอกซีเรซิน และฟีนอลิกโนโวแลคเรซินเป็นเมตริกซ์ อีพอกซีทำหน้าที่เป็นสารลดความหนืดและยังช่วยเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ในขณะที่ฟีนอลิก โนโวแลคนอกจากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการบ่มของเบนซอกซาซินเรซินซึ่งทำให้อุณหภูมิการขึ้นรูปต่ำลงแล้วยังเป็นตัวทำแข็งของอีพอกซีอีกด้วย ในการทดลองนี้จะศึกษาผลกระทบของสัดส่วนของเรซินทั้งสามที่มีผลต่อสมบัติการขึ้นรูป สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ได้ โดยมุ่งเน้นให้เหมาะสมกับการใช้เป็นเมตริกซ์ของพรีเฟลกต์เป็นสำคัญ โดยที่ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของเรซินผสมต่างๆ เช่น เบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก (BEP) ในอัตราส่วน 3:6:1 3:6:2 3:6:3 และ 3:6:4 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณอีพอกซีเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของเรซินผสมต่ำลง ในขณะที่เมื่อปริมาณฟีนอลิกเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของเบนซอกซาซินเรซินลดลง โดยสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดสูงสุดของปฏิกิริยาการบ่มใน DSC thermograms ความสามารถในการขึ้นรูปและระยะเวลาในการเจลาตด้วยหลักการ Fourier Transform Mechanical Spectroscopy (FTMS) จากการทดลองพบว่าเรซินสามระบบในสัดส่วนที่ศึกษามีช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่กว้างสามารถขึ้นรูปได้ตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 200 องศาเซลเซียส และยังสามารถคงความหนืดที่ต่ำได้เป็นเวลานาน โดยที่สัดส่วน BEP362 ให้ความสามารถในการขึ้นรูปเป็นพรีเฟลกต์ที่ดีที่สุด เช่น มีความหนืดต่ำ (1.4 Pa.s) และมีระยะเวลาเจลาตน้อยกว่า 5 นาที ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของระบบเรซินที่ศึกษามีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ระหว่าง 150 ถึง 165 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม BEP362 ให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงที่สุด คือ 165 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ BEP362 ยังมีอายุการใช้งานที่นานโดยมีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการขึ้นรูปเพียงเล็กน้อย เช่น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 25% เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 33 องศาเซลเซียสเป็นเวลามากกว่า 270 วัน ทั้งนี้สมบัติต่างๆเหล่านี้จะแสดงลักษณะเด่นที่ดีในระบบ BEP362 ดังนั้นอัตราส่วนผสมของเมตริกซ์ที่เหมาะสมสำหรับทำคาร์บอนไฟเบอร์พรีเฟลกต์คือ BEP362 สำหรับค่ามอดูลัสความดัดโค้งและความแข็งแรงในการดัดโค้งในระบบ BEP362 เมื่อปริมาณเส้นใยเป็น 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและทำการจัดเรียงเส้นใยแบบ cross-ply มีค่าประมาณ 68 จิกะปาสกาล และ 1,156 เมกกะปาสกาลซึ่งวัสดุประกอบแต่งที่ได้จากระบบ BEP362 นี้ให้ค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม นอกจากนี้พรีเฟลกต์ที่มี BEP362 เป็นเมตริกซ์เรซินยังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นโครงสร้างรังผึ้งได้ดี

เลขานุการ

เลขทะเบียน 013602

วัน, เดือน, ปี 20พ.ค. 51

Abstract

This research is aimed to develop a highly processable carbon fiber prepregs based on ternary mixture matrices of benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. The epoxy acts as a reactive diluent and crosslink enhancer of the ternary system while the phenolic resin can function as a polymerization initiator for the polybenzoxazine and/or a hardener for the epoxy resin. The effects of the resin mixture composition on processability, thermal, mechanical, and some physical properties for the composites such as cure temperature, flexural strength, and thermal stability are characterized. The resin composition was varied using different resin mass ratios i.e. benzoxazine/epoxy/phenolic (BEP) equals 361, 362, 363 and 364. It is observed that the viscosity of the matrices decreases with increasing epoxy mass fractions. In addition, the increase in phenolic novolac mass fraction effectively resulted in the decrease in curing temperature of the ternary systems. These results can be seen from the shift of an exothermic peak in the DSC thermograms to lower temperature. Processability and gel point of the matrices were investigated by using Fourier Transform Mechanical Spectroscopy (FTMS). It is found that the ternary system can provide a relatively wide range of processing window from 50 to 200°C and can maintain low melt viscosity for a long period time. In addition, BEP362 show the highest processability for prepregging process due to low melt viscosity i.e. 1.4 Pa.s at 100°C and can gel in less than 5 min at 180°C. The glass transition temperatures of the above four ternary systems are relatively similar in values of approximately 150-165°C with BEP362 showing the highest Tg of 165°C. Furthermore, BEP362 can be kept at room temperature (~33°C) with minimal effect on its processability i.e. a little change in Tg of the resin (less than 25% conversion of BEP362 up to 270 days). Therefore, the optimum composition of the ternary systems for making high processable carbon fiber prepregs is BEP362. The flexural modulus and flexural strength of the carbon fiber-reinforced BEP362 at approximately 55% volume of the fiber in cross-ply orientation and without any surface treatment render relatively high values of about 68 GPa and 1,156 MPa respectively. The honeycomb structure from carbon fiber-BEP362 prepregs is found to be relatively easy to fabricate as a results of the above mentioned characteristics.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว และเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย โครงสร้างรังผึ้ง ผลิตจากโนเม็กซ์® ชนิด 410 ที่มีความหนา 0.05 มิลลิเมตร โดยวิธีการเชื่อมติดด้วยกาว และ กระบวนการผลิตแบบดึงขยาย กาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน จากการทดลองพบว่า โครงสร้างรังผึ้ง ที่ผลิตได้ มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 15.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีขนาดเซลล์เฉลี่ย 9.21 มิลลิเมตร ซึ่งเล็กกว่าที่ได้ออกแบบไว้ และมีมุมดึงขยายประมาณ 49.5 องศา นอกจากนี้ เมื่อเวลา ผ่านไปโครงสร้างรังผึ้งมีการหดตัวเล็กน้อย ซึ่งเมื่อขนาดเซลล์และมุมดึงขยายของโครงสร้างรังผึ้ง ลดลง ทำให้น้ำหนักของโครงสร้างรังผึ้งมีค่ามากขึ้น จึงจำเป็นต้องเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินเพื่อเพิ่มความเสถียร จากนั้นสมบัติทางกล ซึ่งคือ ความทนแรงกด และความทนแรง เหยือนของโครงสร้างรังผึ้งจะถูกทดสอบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

In this work, devices for producing honeycomb structure, a machine for applying adhesive patterns to produce HoBE (Honeycomb Before Expansion) and a machine for expanding HoBE to form hexagonal honeycomb structure, were designed and made. The honeycomb structure was produced from Nomex410 paper[®] (0.05 mm thickness) by the adhesion bonding, adhesive was epoxy resin, and the expansion process. Using the devices, honeycomb structures were produced, and its average density is 15.57 kg/m³. The average cell size of honeycomb structure, 9.21 mm, is smaller than the designed value. The expansion angle is 49.5 degree. After 3 days, honeycomb structure was not stable without dip coating to reinforce the structure. When the cell size and angle of the honeycomb structure decreased, its density increased. So liquid phenolic resin will be used to coat the honeycomb structure for reinforcement. Next properties of the honeycomb structure will be tested for its compressive strength and shear strength.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยเงินสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ – เอกชน ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2547

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมคูต ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท สฤณ โมลด์ จำกัด ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำและประสบการณ์เกี่ยวกับการออกแบบกลไกต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยพอลิการ์บอนเนต จำกัด (TPCC) และ บริษัท คอบบร้า อินเตอร์เนชั่นแนล ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารตั้งต้น

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. Takeshi Kitano แห่ง AIST ประเทศญี่ปุ่น สำหรับความอนุเคราะห์เส้นใยคาร์บอน

ขอขอบพระคุณ คุณ ภาสกร วรณวิริยกิจ แห่งบริษัท เมโทรมสยาม สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Rheometer และ คุณ วุฒิ เตชะเกษมบัณฑิต แห่งบริษัท เมดเลอร์-โทโลเรโด (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุน และเป็นแรงใจที่ดี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยดูแล ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในด้านต่างๆ ที่มีประโยชน์ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(i)
สารบัญตาราง	(iii)
สารบัญภาพ	(iv)
1. คำนำ	1
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	3
3. การตรวจเอกสารและความรู้พื้นฐาน	4
3.1 การพัฒนาพรีเฟลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)	
3.1.1 วัสดุประกอบแต่งขั้นสูง (Advanced Composite Materials)	4
3.1.2 พรีเฟลกส์ (Prepregs)	5
3.1.3 เส้นใย (Fiber)	6
3.1.4 เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)	7
3.1.5 กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอน	8
3.1.6 เมตริกซ์ (Matrix)	10
3.1.7 อีพอกซีเรซิน	12
3.1.8 เบนซอกซาซีนเรซิน (Benzoxazine Resin)	13
3.1.9 ฟีนอลิกเรซิน(Phenolic)	15
3.1.10 การขึ้นรูปพรีเฟลกส์	17
3.1.11 ลักษณะการสานกันของเส้นใยพรีเฟลกส์	19
3.1.12 โครงสร้างรังผึ้ง (Honeycomb)	19
3.1.13 งานวิจัยที่ผ่านมา	20
3.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)	
3.2.1 โครงสร้างรังผึ้ง	24
3.2.2 โนเม็กซ์ (Nomex ®)	30
3.2.3 อีพอกซีเรซิน	36
3.2.4 ฟีนอลิกเรซิน	40
3.2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา	43

	หน้า
4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	47
4.1 การพัฒนาพรีเพลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)	
4.1.1 วัสดุดิบและสารเคมี	47
4.1.2 วิธีการทดลอง	47
4.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)	
4.2.1 วัสดุและสารเคมี	52
4.2.2 วิธีการทดลอง	53
5. ผลการทดลอง	59
5.1 การพัฒนาพรีเพลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)	
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของเมตริกซ์เรซิน	59
5.1.2 สมบัติหลังการขึ้นรูปของพอลิเมอร์อัลลอยด์	70
5.1.3 ความสามารถในการเก็บรักษาของเมตริกซ์เรซิน	76
5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต	79
5.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)	
5.2.1 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง	84
5.2.2 ผลการเคลือบโนเม็กซ์ด้วยฟีนอลิกเรซิน	86
5.2.3 ขนาดเซลล์ ลักษณะเซลล์ และความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง	87
5.2.4 สมบัติการบ่มของ โครงสร้างรังผึ้ง	88
6. สรุปผลการทดลอง	89
6.1 การพัฒนาพรีเพลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)	89
6.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)	89
เอกสารอ้างอิง	91
1. การพัฒนาพรีเพลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)	91
2. เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)	94

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1.1	คุณสมบัติของวัสดุคอม โพลีทประเภทต่างๆเทียบกับ โลหะ	5
3.1.2	สมบัติของพรีเพลกส์บางระบบ	6
3.1.3	สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ	7
3.1.4	สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากสารตั้งต้นชนิดต่างๆ	8
3.1.5	คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนชนิด PAN base	10
3.1.6	ลักษณะเด่นและการใช้งานของเมตริกซ์ชนิดต่างๆ	11
3.1.7	คุณสมบัติของเบนซอควาซีนเทียบกับอีพอกซีและฟีนอลิก	14
3.2.1	เปรียบเทียบสมบัติของ โครงสร้างรังผึ้งและ โฟม	25
3.2.2	สมบัติเชิงกลของ โนเม็กซ์	36
5.1.1	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่สภาวะการบ่มต่างๆ	70
5.1.2	การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเบนซอควาซีน พอลิเมอร์อัลลอยด์ เปรียบเทียบกับอีพอกซี และฟีนอลิกทั่วไป	73
5.1.3	ความสามารถในการตัดโค้งของพอลิเมอร์อัลลอยด์	75
5.1.4	สมบัติทางกลของวัสดุคอม โพลีทที่ได้จากเมตริกซ์เรซินที่ศึกษาเปรียบเทียบกับ วัสดุคอม โพลีทในระบบอื่น	80
5.2.1	ลักษณะเซลล์ของ โครงสร้างรังผึ้ง	88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1.1 การเปลี่ยน โมเลกุลที่โค้งงอได้ของ PAN ไปเป็น โมเลกุลแข็งแรงแบบขั้นบันได	9
3.1.2 วงแหวน โอไซเรน (Oxirane Rings)	12
3.1.3 โครงสร้าง โมเลกุลของบิสฟีนอลเอ	13
3.1.4 การสังเคราะห์ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA)	13
3.1.5 การสังเคราะห์เบนซอกซาซิมอนอเมอร์	15
3.1.6 การเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซี	15
3.1.7 การสังเคราะห์ฟีนอลิกและ โครงสร้าง โมเลกุลของฟีนอลิก	16
3.1.8 การขึ้นรูป พรีเพลกต์ ด้วยวิธีใช้ตัวทำละลาย	17
3.1.9 การขึ้นรูป พรีเพลกต์ ด้วยวิธีเคลือบด้วยลูกกลิ้ง	18
3.1.10 การขึ้นรูป พรีเพลกต์ ด้วยวิธีเรซินเหลว	18
3.1.11 ลักษณะการสานกันของเส้นใยพรีเพลกต์	19
3.1.12 โครงสร้างแซนวิช	20
3.2.1 โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยม	24
3.2.2 โครงสร้างแซนวิช	25
3.2.3 ด้านต่างๆ ของ โครงสร้างรังผึ้ง และคำศัพท์ที่ใช้เรียก โครงสร้างรังผึ้ง	26
3.2.4 วิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้งแบบดิ่งขยาย	28
3.2.5 การทำแนวทาบบนแผ่นวัสดุ	28
3.2.6 วิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้งแบบทำให้เป็นรอยขุ่น	29
3.2.7 รูปแบบเซลล์ชนิดต่างๆ	30
3.2.8 เปรียบเทียบความต้านแรงดึง มอดูลัสแบบดิ่งของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ	32
3.2.9 เปรียบเทียบน้ำหนักต่อพื้นที่ของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ	32
3.2.10 เปรียบเทียบราคาของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ	33
3.2.11 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (m - phenyleneisophthalamide)	33
3.2.12 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - benzamide)	34
3.2.13 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - phenyleneterephthalamide)	34
3.2.14 ลักษณะอะรามิดแบบไฟบริดส์ และ ฟลอก	35
3.2.15 ภาพตัดขวาง โนเม็กซ์ชนิด 410 และ 411	35
3.2.16 หมู่อีพอกไซค์	37

ภาพที่	หน้า
3.2.17 โครงสร้างของอีพอกซีเรซิน	39
4.1.1 ปฏิบัติการเตรียมเบนซอกซาซินเรซินชนิดไบฟังก์ชันนอล	48
4.1.2 ปฏิบัติการเตรียมฟีนอลิกโนโวแลกเรซิน	48
4.1.3 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต	49
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่างๆ ของเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง	53
4.2.2 ภาพตัดขวางของลูกกลิ้งเซาร่องและค่าออกแบบ	54
4.2.3 แผนภาพลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว	55
4.2.4 ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว	55
4.2.5 ลักษณะแบบหล่อหกเหลี่ยม	57
5.1.1 DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี	59
5.1.2 DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี และเรซินผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลก	61
5.1.3 DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ ฟีนอลิกโนโวแลก	63
5.1.4 ความหนืดของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	64
5.1.5 ช่วงการหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ ฟีนอลิกโนโวแลกที่อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที	66
5.1.6 ระยะเวลาในการเจลมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ ฟีนอลิกโนโวแลกที่อัตราส่วน 3/6/2 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส	68
5.1.7 ระยะเวลาในการเจลมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ ฟีนอลิกโนโวแลกที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	69
5.1.8 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วน ระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลก	71
5.1.9 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์	72
5.1.10 Flexural stress & strain ของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนระหว่าง เบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลก	74
5.1.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลก 3/6/2	77
5.1.12 การเปลี่ยนแปลงของความร้อนที่ได้จากปฏิบัติการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ของมอนอเมอร์ผสม	78

ภาพที่	หน้า
5.1.13 ผลของปริมาณเส้นใยที่มีต่อมอดูลัสในการคัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีเมตริกซ์เรซินที่อัตราส่วนเบนซอกลูนาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2	82
5.1.14 SEM micrographs ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดลองแล้ว	83
5.1.15 โครงสร้างรังผึ้งจากพรีเพลกส์เส้นใยคาร์บอนที่อัตราส่วน 3/6/2 เป็นเมตริกซ์	84
5.2.1 เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว	85
5.2.2 ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว	85
5.2.3 เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย ขณะดึงขยายโครงสร้างรังผึ้ง	86
5.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบและน้ำหนักของ โนเม็กซ์	87
5.2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของโครงสร้างรังผึ้ง ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	88



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพัฒนาพรีเพล็กส์ของวัสดุแกนแบบรังผึ้งจากเส้นใยคาร์บอน และ
เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

Development of Carbon Fiber Based Prepregs for Honeycomb Core Material and
Prototype Device for Making Honeycomb

1. คำนำ

ปัจจุบันการพัฒนาทางด้านวัสดุ เพื่อให้ได้วัสดุสำหรับใช้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบาเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ยานอวกาศ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา และยานพาหนะ เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในวัสดุโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบา คือ โครงสร้างรังผึ้ง (Honeycomb Structure) โครงสร้างดังกล่าวอาจทำได้จากการขึ้นรูปแผ่นโลหะ เช่นอลูมิเนียม หรือ ขึ้นรูปจากแผ่นกระดาษพิเศษ เช่น กระดาษโนเมกซ์ (Nomex paper) หรือพรีเพล็กส์ (Prepregs)

พรีเพล็กส์ คือวัสดุที่ได้จากการอบเส้นใยเสริมแรง (Fiber) ด้วยเมตริกซ์เรซิน (Matrix resin) ที่อยู่ในสภาพการพอลิเมอร์ไรเซชันบางส่วน (B-stage) เส้นใยที่นำมาใช้ทำเป็นพรีเพล็กส์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยเคฟลาร์อะรามิด (Kevlar Aramid) เส้นใยโนเมกซ์อะรามิด (Nomex Aramid) เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน ในส่วนของเมตริกซ์เรซินที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ อีพอกซี (Epoxy) พอลิอิมิด (Polyimide) และ ฟีนอลิก (Phenolic) เรซิน แต่เรซินทั้ง 3 ชนิดมีข้อดีต่างกัน เช่น อีพอกซีไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลได้เอง ต้องทำการใส่สารบ่มเพื่อเป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุล และ เมื่อทำการผสมระหว่างอีพอกซีกับสารบ่มบางชนิด แล้วจะต้องใช้งานทันทีที่ไม่สามารถเก็บรักษาได้ (Pot-life สั้น) เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลได้ที่อุณหภูมิห้องฟีนอลิกมีข้อเสียคือ เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลแล้วจะมีความเปราะ มักต้องใช้กรดแก่และอัลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อายุใช้งานสั้น (Shelf-life สั้น) มีผลพลอยได้ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน เช่น มีฟองอากาศอยู่ในชิ้นงาน พอลิอิมิดมีข้อเสียคือ กระบวนการสังเคราะห์ทำได้ยาก มักต้องสังเคราะห์ในตัวทำละลาย ซึ่งยังต้องผ่านกระบวนการกำจัดตัวทำละลายออก และต้องมีกระบวนการนำตัวทำละลายมาใช้ใหม่ ที่สำคัญคือสารตั้งต้นมีราคาแพง

โครงสร้างรังผึ้งประกอบด้วยเซลล์เปิดหลายเซลล์เชื่อมต่อกัน ทำจากแผ่นวัสดุบางๆ เชื่อมติดกันในบริเวณที่ถูกกำหนด เพื่อให้เป็นเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม โครงสร้างรังผึ้งที่มีความหนาที่

เหมาะสมสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประกอบ (Composite material) ที่เรียกว่า โครงสร้างแซนด์วิช (Sandwich structure) ใช้เป็นวัสดุแกน (Core material) ที่มีความแข็งแรงได้

วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งมีหลายวิธี สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุประเภทโลหะ นั้น นิยมใช้การเชื่อมติดด้วยกาว (Adhesive bonding) และวิธีการผลิตแบบดิงขยาย (Expansion process) ในประเทศไทยยังคงต้องนำเข้าโครงสร้างรังผึ้งจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเน้นการศึกษาการพัฒนาพรีเฟลกซ์ของวัสดุแกนแบบรังผึ้งจากเส้นใยคาร์บอน และเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง โดยในส่วนของพรีเฟลกซ์จะใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงและเมตริกซ์เรซินประเภทเบนซอกซาซินเรซิน และ พอลิเมอร์คัดแปรระหว่างเบนซอกซาซินกับอีพอกซีและฟีนอลิกเรซินเป็นเมตริกซ์ เนื่องจากเบนซอกซาซินเรซินมีสมบัติเด่นด้านการขึ้นรูป การยึดผิวต่างๆ ได้ดี การมีสมบัติเด่นด้านความร้อน สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้มาก และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสายโซ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ($150-200^{\circ}\text{C}$) และเมื่อนำมาทำเป็นเรซินผสมระหว่างเบนซอกซาซิน อีพอกซี และฟีนอลิกแล้วสามารถปรับเปลี่ยนให้มีสมบัติต่างๆเป็นไปตามความต้องการได้ เช่น สามารถปรับเปลี่ยนให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสมโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเรซินทั้งสามชนิด ดังนั้นการใช้เรซินดังกล่าวในการทำพรีเฟลกซ์จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการเก็บรักษานานกว่าระบบของอีพอกซีหรือฟีนอลิกทั่วไป และเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) สูงเมื่อเทียบกับเส้นใยประเภทอื่นๆ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะได้พรีเฟลกซ์ที่มีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา เพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปโครงสร้างของรังผึ้ง

อุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยยังต้องนำเข้าโครงสร้างรังผึ้งจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง โดยเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งจะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุประเภทโนเม็กซ์ (Nomex®) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ โครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ประมาณ 10 มิลลิเมตร และความหนาแน่นน้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะถูกผลิตโดยวิธีเชื่อมแบบใช้กาว (Adhesive bonding) โดยกาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน สำหรับการทากาวจะทาในแนวขวางกับแผ่นโนเม็กซ์ เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ และวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งใช้วิธีการผลิตแบบดิงขยาย (Expansion Process) โดยศึกษาสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบ่มโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิงขยาย (Honeycomb before expansion) และคุณสมบัติของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ ซึ่งคือ ความหนาแน่น ความทนแรงอัด (Compressive strength) และความทนแรงเฉือน (Shear strength)

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

2.1.1 เพื่อพัฒนาพรีเฟลกส์ที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูงโดยเติมเส้นใยคาร์บอน โดยในเมตริกซ์ประเภทเบนซอกซาซินเรซิน หรือ เรซินดัดแปรของเบนซอกซาซินเรซินที่ผลิตได้ในประเทศเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

2.1.2 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงกลไกหลักของเครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้งที่มีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบา

2.2 ขอบเขตการวิจัย

2.2.1 การพัฒนาพรีเฟลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)

เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนของเมตริกซ์เรซินที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นเมตริกซ์เรซินของวัสดุ พรีเฟลกส์ โดยคำนึงถึงความสามารถด้านการขึ้นรูป สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนของเมตริกซ์เรซิน สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเป็นโครงสร้างรังผึ้ง

2.2.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)

1. วัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งเพื่อออกแบบกลไกหลักสำหรับทากาวเพื่อผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายจะใช้วัสดุประเภทโนเม็กซ์ หนา 0.05 มิลลิเมตร (50 μm) โดยวิธีการผลิตแบบดึงขยาย

2. ชนิดของกาวที่ศึกษาคือ กาวประเภทอีพอกซี

3. ศึกษาเงื่อนไขการบ่มของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่มอีพอกซี

4. สมบัติของโครงสร้างรังผึ้งที่จะศึกษา คือ ความหนาแน่น ความทนแรงกด (Compressive strength) และความทนแรงเฉือน (Shear strength)

3. การตรวจเอกสารและความรู้พื้นฐาน

3.1 การพัฒนาพรีเฟลกซ์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัสดุประสมสังเคราะห์ 2.1.1)

3.1.1 วัสดุประกอบแต่งขั้นสูง (Advanced Composite Materials)

วัสดุประกอบแต่งเสริมแรงหรือวัสดุคอมโพสิตเป็นที่รู้จักกันดีในด้านของความแข็งแรง ทนทาน ความสามารถในการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายทั้งในระดับอุตสาหกรรม ใช้เป็นอุปกรณ์กีฬา ไปจนถึงใช้ทำเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในยานอวกาศ ซึ่งวัสดุคอมโพสิตก็คือ เมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างๆ ที่มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด หรือเส้นใยโบรอน เส้นใยพวกนี้จะเรียงตัวในลักษณะที่เป็นชั้นๆ (Layer) ที่มีความแข็งแรง (Rigid) และแข็งแรงในทิศทางต่างๆตามต้องการ ความแข็งแรงของพวกวัสดุคอมโพสิตนั้นก็เนื่องมาจากการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไอออนิกและพันธะโลหะเนื่องจากเป็นแรงภายใน โมเลกุล ข้อสำคัญของวัสดุคอมโพสิตนี้คือจะต้องเลือกเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ให้มีความสอดคล้องกับการใช้งานเพื่อให้ได้คุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากชนิดของเส้นใย และชนิดของเมทริกซ์ จะมีผลโดยตรงกับคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตชนิดนั้น คุณสมบัติเด่นของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการผสมระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์นั้นจะได้สมบัติที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เช่น ในกรณีของเส้นใยคาร์บอนชนิดความแข็งแรงสูงที่เสริมแรงด้วยอีพอกซีเมทริกซ์จะได้ค่าความแข็งแรงจำเพาะสูงถึง $800 \text{ MPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ เมื่อเทียบกับโลหะซึ่งมีเพียง $140 \text{ MPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ [1.45] ตัวอย่างสมบัติของวัสดุคอมโพสิตประเภทต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.1.1 เมื่อ WR คือการเรียงเส้นใยชนิดผืนผ้า และ UD คือการเรียงเส้นใยชนิดทางเดียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1.1 คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตประเภทต่างๆเทียบกับโลหะ [1.47]

Reinforcement	Glass fiber WR	aramid UD roving	Carbon UD high modulus	Steel	Aluminium alloy
Resin	polyester	Epoxy	Epoxy	-	-
Post-cure	16 h 40°C	180°C	180°C	-	-
Fiber Volume Fraction	0.32	0.60	0.60	-	-
Property					
Specific Gravity	1.7	-	-	7.8	2.8
Tensile Strength (MPa)	220	1380	1260	450	300
Tensile Modulus (GPa)	14	76	200	207	70
Tensile Elongation to Failure(%)	1.7	1.8	0.5	45	-
Compression Strength (MPa)	230	276	840	-	-
Compression Modulus (GPa)	15	76	190	-	-
Flexural Strength (MPa)	270	620	1070	-	-
Flexural Modulus (GPa)	14	76	190	-	-
Shear Strength (MPa)	90	60	65	330	180
Shear Modulus (MPa)	3.3	2.1	5.5	80	26

3.1.2 พรีเพลกส์ (Prepregs)

พรีเพลกส์ ย่อมาจาก Pre-impregnation หรือ Pre-impregnated Material หมายถึงวัสดุที่ได้จากการอบเส้นใยเสริมแรงด้วยเมตริกซ์เรซินและพร้อมที่จะผ่านกระบวนการทำให้เซตตัวเป็นโครงสร้างที่ถาวรเมื่อทำการให้ความร้อนหรือความดัน พรีเพลกส์มักจะอยู่ในรูปของแผ่นบาง ค่อนข้างนิ่ม จัดให้เป็นรูปทรงต่างๆได้ง่าย ทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย ซึ่งข้อดีของพรีเพลกส์คือสามารถควบคุมความหนาของแผ่นพรีเพลกส์ การจัดเรียงตัวของเส้นใย และปริมาณเรซินที่ใช้อบ และสามารถกำหนดสมบัติของพรีเพลกส์ให้เป็นไปตามต้องการได้ เนื่องจากสมบัติของพรีเพลกส์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ชนิดของเมตริกซ์ ลักษณะการสานกันของเส้นใย รวมไปถึงวิธีการผลิต โดยการที่พรีเพลกส์ใช้งานมากในวัสดุคอมโพสิตนั้นเนื่องมาจากข้อดีดังนี้

- สามารถเลือกหรือตัดแปลงเมตริกซ์ให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการได้ เช่น ความทนไฟ ความแข็งแรง เป็นต้น

- การใช้งานเมตริกซ์ในกระบวนการอยู่ในลักษณะของแบทช์ต่อแบทช์ (Batch-to-batch)
- สามารถควบคุมปริมาณของเรซินที่อบเส้นใยได้
- คุณสมบัติทางกายภาพเช่น การไหลตัวของเรซิน (Resin Flow), ความเหนียว (Tack), เวลาในการเจล (Gel Time) สามารถกำหนดให้เป็นไปตามต้องการ
- การใช้งานพรีเพลกต์ช่วยความลดเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเส้นใยในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
- พรีเพลกต์ช่วยให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากได้อบเส้นใยด้วยเมตริกซ์เรซินแล้วทำให้สะดวกต่อการใช้งานเพียงแค่ให้ความร้อนและความดันก็สามารถขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตได้

ระบบของ พรีเพลกต์ มีอยู่หลายระบบด้วยกันเช่น เส้นใยคาร์บอน/อีพอกซี เส้นใยแก้ว/อีพอกซี เส้นใยคาร์บอน/ฟีนอลิก เป็นต้น แต่ละระบบก็จะมีคุณสมบัติต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการตัดแปรและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการดังเช่นตารางที่ 3.1.2

ตารางที่ 3.1.2 สมบัติของ พรีเพลกต์ บางระบบ [1.44]

Reinforcing	7781Glass	E-Glass	Carbon	Kevlar
Matrix*	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy
Resin Content (%wt)	45-50	30	38	25
Cure Temperature (°C)	121	121	121	121
Tensile Strength (psi)	72,000	150,000	310,000	-
Tensile Modulus (psi)	4.3x10 ⁶	6.4x10 ⁶	18.8x10 ⁶	-
Flexural Strength (psi)	114,000	206,000	226,000	100,000
Flexural Modulus (psi)	4.6x10 ⁶	6.25x10 ⁶	18.1x10 ⁶	8.1x10 ⁶
Compressive Strength (psi)	-	-	-	-
Short Beam Shear (psi)	-	10,328	14.1x10 ⁶	6,800

* เครื่องหมายทางการค้า DA4518

3.1.3 เส้นใย (Fiber)

เมื่อพิจารณาถึงวัสดุคอมโพสิตแล้วเส้นใยก็จะเปรียบเสมือนส่วนที่เป็นสันหลังของวัสดุ ดังนั้นสมบัติของพรีเพลกต์จะดีหรือไม่ก็จะขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใยด้วย เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength), โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity), ความแข็งแรง

ต่อความล้า (Fatigue Strength) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเส้นใย สมบัติของเส้นใยเหล่านี้จะมีผลโดยตรงกับความแข็งแรงของ พรีเฟลกส์ สำหรับเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในการผลิตพรีเฟลกส์มักเป็นเส้นใยที่มีความโดดเด่นในแง่ของ ความแข็งแรง ความทนทาน มีน้ำหนักที่เบา และมีคุณสมบัติทางความร้อน ทางเคมี ทางไฟฟ้าที่ดี เช่น เส้นใย อะรามิด เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน แต่ละเส้นใยจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามตารางที่ 3.1.3

ตารางที่ 3.1.3 สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ[1.47]

Reinforcement	Specific gravity	Tensile strength MPa	Specific strength 10^4 m	Tensile modulus GPa	Specific modulus 10^6 m
Glass					
E glass	2.54	3.4	13.8	72.4	2.9
S glass	2.48	4.6	18.7	85.5	3.5
Boron on tungsten substrate	2.63	3.1	12.0	400.0	15.5
Graphite					
High strength	1.80	2.7	15.6	262.0	14.8
High modulus	1.94	2.0	10.9	380.0	19.9
Intermediate	1.74	2.5	14.5	186.0	10.9
Organic fiber					
aramid	1.44	2.7	19.5	124.0	8.8

จากตารางจะเห็นว่าเส้นใยคาร์บอนมีค่าความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักที่เบากว่าเส้นใยชนิดอื่นดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปพรีเฟลกส์เพื่อเป็นการพัฒนาสมบัติความแข็งแรงต่อน้ำหนักของ โครงสร้างรังผึ้งที่จะนำไปใช้งาน

3.1.4 เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

เส้นใยคาร์บอนหรือที่เรียกอีกชื่อว่าเส้นใยกราไฟต์ได้จากการเกิดปฏิกิริยากราไฟต์เซชัน (Graphitization) ทำให้โมเลกุลคาร์บอนเกิดโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยม (Hexagonal Crystalline Structure) ขึ้นบางส่วน และความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนจะแปรตรงกับเปอร์เซ็นต์ของกราไฟต์ ค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนมากที่สุดที่น่าจะเป็นไปได้คือ 100 จิกะปาสกาล ซึ่งค่าความแข็งแรงทางทฤษฎีของผลึกเดี่ยวของแกรไฟต์ single crystal of graphite คือ 150 จิกะ

ปาสคาล ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุทั้งหมด อย่างไรก็ตามในทั่วไป เส้นใยคาร์บอนในปัจจุบันทางการค้าจะมีความแข็งแรงสูงสุดที่ประมาณ 7 จิกะปาสคาลด้วยกัน [1.3] ทั้งนี้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีการใช้งานเป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุประกอบแต่งชั้นสูงอย่างแพร่หลายเนื่องจาก เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงจำเพาะสูงเนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนที่มีค่าที่ต่ำมากนั่นเอง การสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนสารตั้งต้นที่จะใช้ในการผลิตเส้นใยคาร์บอนจะเป็นสารตั้งต้นประเภทอินทรีย์สารที่มีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนสูง แบ่งได้ 3 ประเภทคือ

1. PAN (polyacrylonitrile)
2. Pitch (isotropic, mesophase)
3. Rayon

ในบางครั้งจะเรียกรวมระหว่าง PAN และ rayon ว่าเป็น organic precursors ซึ่งเส้นใยคาร์บอนมักนิยมใช้สารตั้งต้นคือ PAN เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ได้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและมีเส้นใยขาว ดังตารางที่ 3.1.4 ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากสารตั้งต้นชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3.1.4 สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากสารตั้งต้นชนิดต่างๆ

[1.3]

Precursor	Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)
PAN	2.5-7.0	250-400	0.6-2.5
Pitch	1.5-3.5	200-800	0.3-0.9
Rayon	~1.0	~50	~2.5

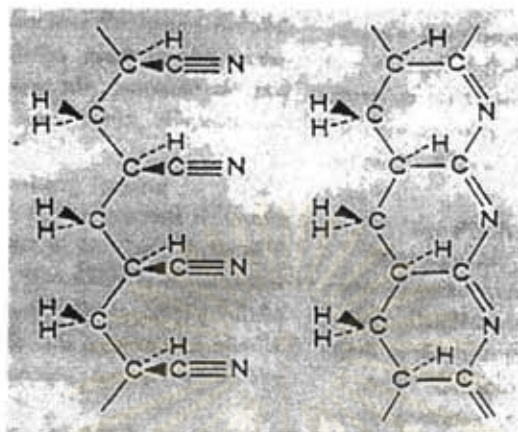
3.1.5 กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอน [1.48]

กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอนมีหลายวิธีด้วยกัน โดยวิธีใหญ่ๆที่ใช้โดยทั่วไปมี 3 วิธีโดยสรุปคือ

1. Orientation by stretching

การผลิตแบบนี้ใช้ PAN เป็นวัสดุเริ่มต้น โดยการดึง bulk PAN ให้เป็นเส้นใยในลักษณะที่สายโซ่-โมเลกุลขนานกันกับแกนของเส้นใย และให้ความร้อนแก่เส้นที่ดึงในบรรยากาศออกซิเจนเพื่อให้หมู่นาไนไตรด์ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบขั้นบันได (Ladder Polymer) ซึ่งประกอบด้วยแถวของวงแหวนคาร์บอน 6 ตัว ดังรูปที่ 3 จนกระทั่งเกิดการเชื่อมโยง

ระหว่างโมเลกุลชั้นบันได และเมื่อ PAN ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะได้กราไฟต์ จากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนการให้ความร้อนขั้นสุดท้ายซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติที่ได้ของเส้นใย วิธีนี้สามารถใช้ Rayon เป็นสารตั้งต้นได้



รูปที่ 3.1.1 การเปลี่ยน โมเลกุลที่โค้งงอได้ของ PAN ไปเป็น โมเลกุลแข็งแรงแบบชั้นบันได [1.48]

2. Orientation by Spinning

เส้นใยคาร์บอนแบบใช้ Pitch เริ่มค้นพบโดย Otani ในประเทศญี่ปุ่น คาร์บอนที่มีลักษณะเส้นใยแบบวิสเกอร์ (Whisker) พบครั้งแรกในขณะเตรียมคาร์บอน โดยให้ความร้อนแก่ผงลิกนินในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อผงลิกนินหลอมตัวก็จะนำไปปั่นเป็นเส้นใย และทำให้งวดที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C แล้วนำไปเผาต่อในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1000 °C จะผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ให้เส้นใยที่ต้องการ

3. Orientation During Graphitization

ขั้นตอนนี้เกี่ยวกับการยึดเส้นใยระหว่างการเกิดปฏิกิริยากราฟไฟต์ เซชันที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้เกิดการเลื่อนตัวของชั้นกราฟไฟต์ เพื่อจะได้การจัดเรียงชั้นที่ขนานไปกับแนวแกนของเส้นใยซึ่งสารตั้งต้นทั้ง 3 ประเภทสามารถใช้วิธีเดียวกันได้

ค่ามอดูลัสของยัง และ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ของเส้นใยคาร์บอนสามารถเป็นไปได้หลายค่า เช่น ในถึงกวนเดียวกันค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ PAN เป็นสารตั้งต้นสามารถเป็นได้ตั้งแต่ 0.5-4.3 GN/m² ค่ามอดูลัสของยังสามารถเป็นได้ตั้งแต่ 270-580 GN/m² ซึ่งสาเหตุที่ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอนกระจายสูง เนื่องมาจากการเกิดการไหลตัวของโมเลกุลในระหว่างการผลิตกระจายไปตามความยาวของเส้นใย ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลจึงใช้หลักทางสถิติมาช่วยในการประมาณค่า ข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอนทำให้ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งเส้นใย

ตารางที่ 3.1.5 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนชนิด PAN base [1.47]

คุณสมบัติ	High Strength	High Modulus	Ultra High Modulus
Carbon content, wt%	92-94	>99	>99.9
Specific gravity	1.7-1.8	1.8-1.9	1.9-2.1
Filament Diameter, μm	7-8	7-8	8-9
Tensile Modulus, GPa	220-250	340-380	520-550
Tensile Strength, GPa	2.5-3.5	2.2-2.4	1.8-1.9
Tensile Elongation	1.2-1.4	0.6-0.7	0.3-0.4
Toughness, MPa	20	7.5	3
Electrical Resistivity, $\mu\Omega/\text{m}$	15-18	9-10	6-7
Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion, $10 \text{ m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	-0.5	-0.7	-0.9
Range of Available Tow Counts, Thousand Fiber/Bundle	1-320	1-12	<1

3.1.6 เมตริกซ์ (Matrix)

เมตริกซ์เรซินสำหรับใช้ในงานพวกวัสดุประกอบแต่งมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือเป็นสารยึดสาร-ประกอบพวกเส้นใยให้คงอยู่ด้วยกัน ซึ่งเมตริกซ์เรซินที่จะนำมาใช้งานในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะมีผลต่อการใช้งาน เช่น การขึ้นรูป และสมบัติของวัสดุประกอบแต่งภายหลังการขึ้นรูปแล้ว เมตริกซ์เรซินที่นิยมนำมาใช้งานเป็นวัสดุประกอบแต่งนั้นจะเป็นเมตริกซ์เรซินในกลุ่มของเทอร์โมเซต เนื่องจากเมตริกซ์เรซินกลุ่มนี้มีความโดดเด่นทั้งในด้านความสามารถในการขึ้นรูปสมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้หน้าที่ของเมตริกซ์เรซินเมื่อนำมาทำเป็นวัสดุประกอบแต่งคือ มีลักษณะที่สำคัญคือ

1. คงรูปชิ้นงานให้เป็นไปตามต้องการ
2. กระจายเส้นใยออกจากกันตามแนวทางการเรียงตัวที่ต้องการ
3. ให้ความเสถียรของชิ้นงานภายใต้แรงกดดันทั้งทางความร้อนและทางกล และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภายนอก
4. กระจายแรงกดดันจากภายนอกเพื่อลดความเสียหายของชิ้นงาน

เนื่องจากเมตริกซ์จะมีผลต่อสมบัติของวัสดุประกอบแต่ง ดังนั้นการเลือกใช้เมตริกซ์ที่จะนำมาใช้-งานเพื่อทำพรีเพลกส์ จึงมีความสำคัญมากเพื่อให้ได้พรีเพลกส์ที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการ เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในการทำพรีเพลกส์ที่สำคัญก็คือ อีพอกซี, พอลิอีมีนค์ และฟีนอลิก ซึ่งเมตริกซ์ทั้ง 3 ชนิดแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัันดังตารางที่ 3.1.6

ตารางที่ 3.1.6 ลักษณะเด่นและการใช้งานของเมตริกซ์ชนิดต่างๆ [1.44]

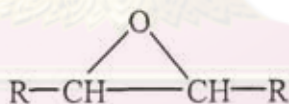
ชนิดของMatrix	ลักษณะเด่น	ข้อเสีย	การนำไปใช้งาน
<u>อีพอกซี</u>	<ul style="list-style-type: none"> - มีคุณสมบัติทางกลดี - ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมสูง - มีความเหนียวสูง - สามารถขึ้นรูปได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถบ่มเองได้ - ต้องมีการผสมสารบ่ม - เมื่อผสมสารบ่มจะต้องใช้งานทันทีที่ไม่สามารถเก็บได้ (Pot-life สั้น) 	<ul style="list-style-type: none"> - บ่มที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เป็นส่วนประกอบของอากาศยาน เรือ รถยนต์ รถไฟ อุปกรณ์กีฬา - บ่มที่อุณหภูมิ 180°C ใช้เป็นงานด้านอากาศยาน หรือทางทหาร
<u>ฟีนอลิก</u>	<ul style="list-style-type: none"> - มีคุณสมบัติทางการทนไฟดี - ทนความร้อนสูง - ทนวันและสารพิษที่กระจายน้อย(FST) - เวลาที่ใช้ในการบ่มน้อยได้ - ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - เปราะ - ต้องใช้กรดแก่และอัลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา - อายุใช้งานสั้น (Shelf-life สั้น) - มีผลพลอยได้ระหว่างการบ่ม 	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เป็นชิ้นส่วนภายในของยานอวกาศ เครื่องบิน เรือ รถไฟ
<u>พอลิอีมีนค์</u>	<ul style="list-style-type: none"> - คุณสมบัติด้านการทนความร้อนดี - ทนความร้อนได้ถึง 260°C - ทนสารเคมีไฟและรังสี 	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการสังเคราะห์ทำได้ยาก เช่น ต้องสังเคราะห์ในตัวทำละลาย ใช้อุณหภูมิสูง - ราคาสารตั้งต้นแพง 	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และพวกวัสดุที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

จากตารางจะเห็นว่าเมตริกซ์เรซินที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อเสียอีกหลายประการด้วยกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อหาเมตริกซ์เรซินที่มีความเหมาะสมที่จะ

นำมาใช้งานเป็นเมตริกซ์เรซินของพรีเพลด์ โดยจะคำนึงถึงความสามารถในด้านต่างๆ เช่น ความสามารถในการขึ้นรูป อายุการใช้งาน รวมถึงสมบัติภายหลังการขึ้นรูปของเมตริกซ์เรซิน และสมบัติภายหลังการขึ้นรูปของวัสดุประกอบแต่งเป็นสำคัญ ทั้งนี้เมตริกซ์เรซินที่สนใจจะนำมาศึกษาคือ เมตริกซ์เรซินที่ได้จาก เบนซอกซาซีนเรซิน และเรซินผสมของเบนซอกซาซีน อีพอกซี และฟีนอลิก โนวาแลคเรซิน ซึ่งเรซินทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติต่างๆที่แตกต่างกันดังนี้

3.1.7 อีพอกซีเรซิน [1.21]

อีพอกซีเรซินนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสมบัติเด่นของอีพอกซีเรซิน ทั้งในด้าน ความสามารถด้านการขึ้นรูป การควบคุมการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล รวมถึงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ข้อดีของอีพอกซีเรซิน คือ โมเลกุลของอีพอกซีเรซิน ก่อนการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลมีขนาดเล็ก (Low Molecular Weight) ซึ่งทำให้อีพอกซีเรซินบางชนิดมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องหรือทำให้เป็นของเหลวได้โดยง่ายทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้อีพอกซียังให้สมบัติทางกลและการทนทานต่อสารเคมีที่ดีเยี่ยม มีความคงรูปที่ดี ความสามารถในการยึดเกาะสูง และราคาถูก เรซินในตระกูลของอีพอกซีเรซินจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันนอลที่เรียกว่า วงแหวนโอไซเรน (Oxirane Rings) (รูปที่ 3.1.2) เมื่ออีพอกซีเรซินเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลแล้วจะกลายเป็นพันธะอีพอกซี (Epoxy Networks).

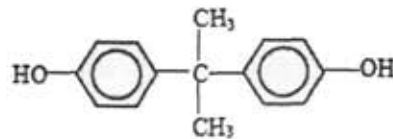


รูปที่ 3.1.2: วงแหวนโอไซเรน (Oxirane Rings)

นอกจากนี้การเรียกชื่อหมู่ฟังก์ชันนอลของอีพอกซียังสามารถเรียกชื่อได้หลายแบบด้วยกัน เช่น อีพอกไซด์(Epoxides), อีโธไซลีน(Ethoxylines), โอไซเรน(Oxiranes), กลีซิดิลพอลิเอเทอร์(Glycidyl Polyethers) และ ไดอีพอกไซด์ พอลิเมอร์(Diepoxide Polymers) เป็นต้น.

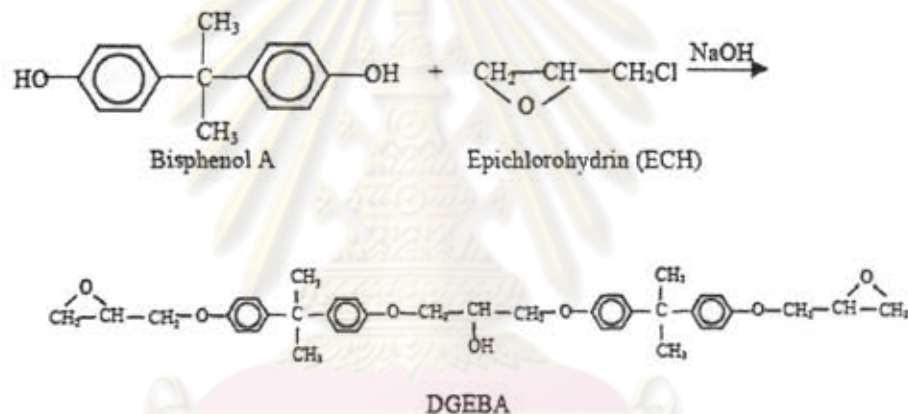
Diglycidyl Ether of Bisphenol (Standard Epoxy)

อีพอกซีที่นิยมใช้งานมากที่สุดคืออีพอกซีในกลุ่มของบิสฟีนอลเอ bisphenol A ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของบิสฟีนอลเอแสดงในรูปที่ 3.1.3



รูปที่ 3.1.3 โครงสร้างโมเลกุลของบิสฟีนอลเอ

อีพอกซีในกลุ่มของบิสฟีนอลเอนิยมนำมาใช้งานประเภทสารเคลือบผิวโดยทำหน้าที่เป็นทั้ง Protective Coating , Adhesive, Sealants Impregnate, Bonding, และ Laminating Materials ทั้งนี้อีพอกซีเรซินที่นำมาศึกษาคืออีพอกซีเรซินในกลุ่มของ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอ และอีพิกลอรไฮดริน (Epichlorohydrin) ตามรูปที่ 3.1.4



รูปที่ 3.1.4 การสังเคราะห์ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA)

จากที่ผ่านมามีอีพอกซีเรซินมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ แต่อย่างไรก็ตามอีพอกซียังไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลได้เองและเมื่อทำการผสมสารบ่มแล้วจะต้องใช้งานทันที เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่สั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษารีซินชนิดใหม่คือเบนซอกซาซีนเรซินเพื่อนำมาทำเป็นเรซินผสม ให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

3.1.8 เบนซอกซาซีนเรซิน (Benzoxazine Resin)

พอลิเบนซอกซาซีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตตระกูลฟีนอลิกเรซินชนิดใหม่ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ ฟีนอล อัลดีไฮด์ และเอมีน พอลิเบนซอกซาซีนนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้น

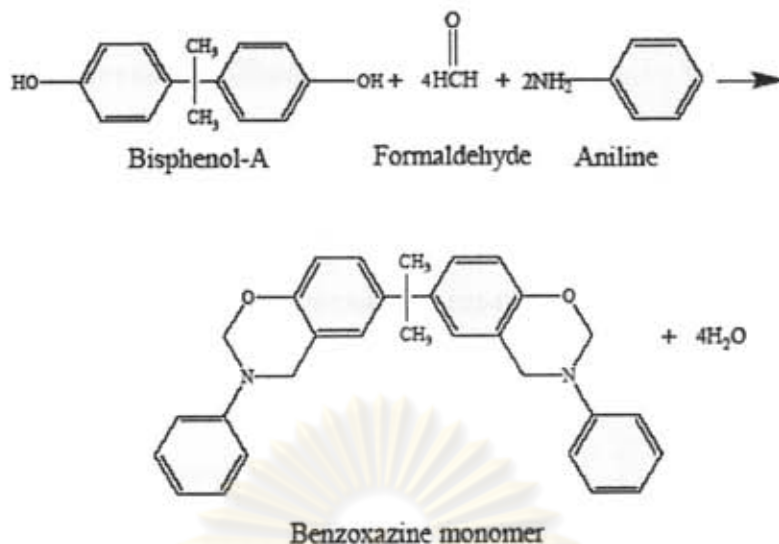
เพื่อนำมาแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆของฟีนอลิกโนโวแลคและฟีนอลิกรีโซล นอกจากนี้พอลิเบนซอกซาซีนยังมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ดีเมื่อเทียบกับฟีนอลิกและอีพอกซีเรซินทั่วไป

ตารางที่ 3.1.7 คุณสมบัติของเบนซอกซาซีนเทียบกับอีพอกซีและฟีนอลิก [1.10]

Properties	BA-a	epoxy	phenolic
Flexural Modulus (GPa)	4.5	2.9	-
Flexural Strength (MPa)	126	119	-
Strain at break (%)	2.9	4.5	-
Impact strength (J/m, 3.2mm thick)	18	32	17
Density (g/cc)	1.200	1.16	-
Monomer	1.195	1.26	1.28
Polymer			
Coeff. Thermal expansion	1.7	2.3	-
α ($10^{-4} \text{cm}^3/\text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$)	69	58	65
β ($10^{-6} \text{cm}/\text{cm} \text{ } ^\circ\text{C}$)	170	165	170
Tg ($^\circ\text{C}$)			

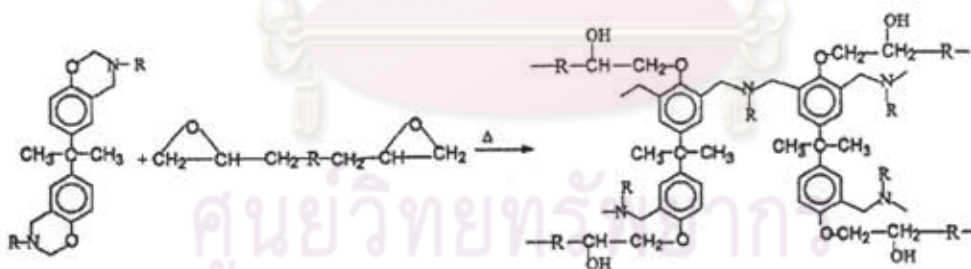
เบนซอกซาซีนเรซินมีสามารถใช้งานได้ง่ายเนื่องจากมีสมบัติการขึ้นรูปที่ดี เช่นมีความหดตัว มีการหดตัวจากการขึ้นรูปเข้าใกล้ศูนย์ (Near-Zero Shrinkage Upon Polymerization) มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงสามารถพัฒนาสมบัติทางกลได้อย่างรวดเร็วแม้ในระดับการเกิดปฏิกิริยาต่ำ สารตั้งต้นมีราคาถูก ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เองโดยไม่ต้องใช้สารอื่นเช่นกรดแก่หรือเบสช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เพียงแค่ความร้อน ทำให้ไม่เกิดผลพลอยได้จากปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันอื่นไม่เพียงประสงค์ นอกจากนี้โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเบนซอกซาซีนยังสามารถดัดแปรให้มีสมบัติเป็นไปตามต้องการได้ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆเหมาะสมกับการใช้งาน

เบนซอกซาซีนเรซินที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเบนซอกซาซีนเรซินที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอ ฟอร์มัลดีไฮด์ และ อะนิลีน โดยมีปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.1.5 [1.25-1.26].



รูปที่ 3.1.5 การสังเคราะห์เบนซอกซาซิมอนอเมอร์

นอกจากเบนซอกซาซีนเรซินจะแสดงสมบัติที่ดีโดยตัวเองแล้ว เบนซอกซาซีนเรซินยังสามารถนำมาผสมกับอีพอกซีเรซินเพื่อให้ได้พอลิเมอร์อัลลอยด์ที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลสูง สามารถนำมาใช้งานเป็นเมตริกซ์เรซินของวัสดุพรีเพลกต์ หรือใช้งานในระบบของ Resin Transfer Molding (RTM) เป็นต้น ลักษณะการเชื่อมขวางโมเลกุลระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซีแสดงดังรูปที่ 3.1.6



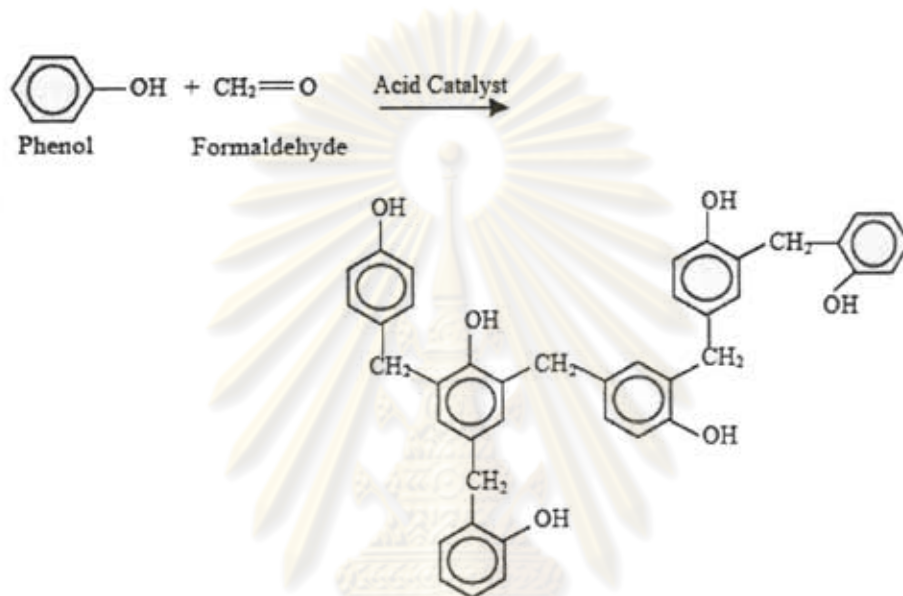
รูปที่ 3.1.6 การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซี [1.12]

3.1.9 ฟีนอลิกเรซิน(Phenolic)

ฟีนอลิกเรซินเป็นเรซินในตระกูลเทอร์โมเซตชนิดแรกที่สังเคราะห์ขึ้น ฟีนอลิกเรซินเป็นเรซินที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีสมบัติการทนไฟที่ดีเยี่ยม ฟีนอลิกสามารถสังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอลิกสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด (ฟีนอลิกโนโวแลค และฟีนอลิกรีโซล) ตามปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองซึ่งควบคุมด้วยค่า pH

ของสารละลายและอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นทั้งสอง ฟีนอลิกโนโวแลคสามารถสังเคราะห์ได้จากสารละลายในสภาวะกรดแก่และมีฟีนอลที่มากเกินไป ในขณะที่ ฟีนอลิกรีโซลสามารถสังเคราะห์ได้จากสารละลายในสภาวะเบสและมีฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไป

ฟีนอลิกโนโวแลคสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย หลอมเหลวได้ และต้องการสารบ่ม เช่น HTMA เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของฟีนอลิก ในขณะที่ฟีนอลิกรีโซลสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลโดยใช้เพียงแค่วัสดุร้อน โครงสร้างโมเลกุลของฟีนอลิกโนโวแลคแสดงดังรูปที่ 3.1.7



รูปที่ 3.1.7 การสังเคราะห์ฟีนอลิกและโครงสร้างโมเลกุลของฟีนอลิก

เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีควันดำฟีนอลิกจึงเป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานประเภททนไฟ หรือ งานตกแต่งภายใน นอกจากนี้ฟีนอลิกยังได้รับความนิยมในวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งอวกาศยาน อย่างไรก็ตามระหว่างปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเป็นผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ หรือ แอมโมเนีย ซึ่งทำให้เกิดครุพูนในชิ้นงาน จึงทำให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าที่ควร

จากลักษณะของเรซินทั้ง 3 ชนิด จะเห็นว่ามีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษา การนำเรซินผสมของเรซินทั้ง 3 ชนิดมาใช้เป็นเมตริกซ์สำหรับวัสดุพรีเพลกส์ ซึ่งเรซินทั้ง 3 ชนิดจะสามารถปรับปรุงสมบัติของกันและกันให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

3.1.10 การขึ้นรูปพรีเพลกต์

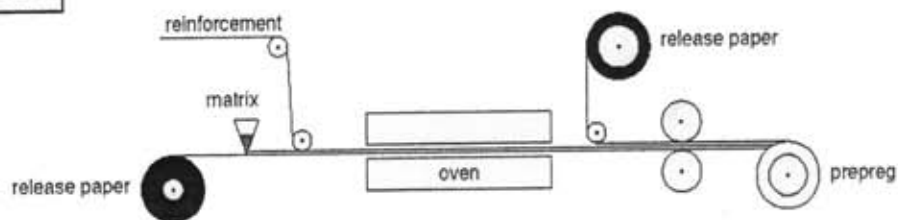
วิธีการทำพรีเพลกต์ สามารถทำได้โดยการอบเส้นใยชนิดที่ต้องการกับเรซินซึ่งมักมีสภาพเป็นของเหลวหรือทำให้มีสภาพเป็นของเหลว ถ้าในกรณีที่ใช้เมตริกซ์ในตระกูลของเทอร์โมเซตจะต้องทำการผ่านกระบวนการเพื่อให้เรซินเหลว ซึ่งมักอยู่ในสภาพมอนอเมอร์หรือพรีพอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น การผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันบางส่วนนี้จะลดความสามารถในการไหลตัว (Flowability) ของเรซินรวมถึงลดความเหนียวเหนอะ (Tackiness) ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันบางส่วนดังกล่าวจะต้องควบคุมให้หมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ในปริมาณสูงพอสำหรับขั้นตอนการเซตตัวเป็น โครงสร้างที่ถาวร สำหรับกรณีที่ใช้ เมตริกซ์ในตระกูลของเทอร์โมพลาสติก จะใช้วิธีการหลอมเรซินเพื่อให้เรซินสามารถอบเส้นใยเพื่อทำพรีเพลกต์ รวมทั้งในการเชื่อมต่อโครงสร้างถาวรก็จะต้องทำการหลอมเรซินด้วย

กระบวนการที่ใช้ในการทำพรีเพลกต์สามารถแยกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

1. Hot Melt เป็นกระบวนการทำพรีเพลกต์โดยทำให้เรซินเหลวด้วยความร้อนและความดันโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย
2. Solvent Impregnated เป็นกระบวนการทำพรีเพลกต์โดยทำให้เรซินเหลวโดยใช้ตัวทำละลาย

ในกรณีของ Solvent Impregnated จะมีข้อเสียคือจะต้องมีขั้นตอนของการระเหยตัวทำละลายออกจาก พรีเพลกต์ ซึ่งอาจทำให้เกิดมลภาวะจากตัวทำละลายและจะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีของ Hot Melt และในกรณีของ Hot Melt จะมีข้อดีคือไม่ต้องมีกระบวนการในการระเหยตัวทำละลายออกจากพรีเพลกต์ นอกจากนี้กระบวนการที่สำคัญในการทำพรีเพลกต์ สามารถแบ่งแยกได้หลายวิธีด้วยกันตามลักษณะของกระบวนการเช่น การจุ่มในสารละลาย (Solution Dipping) การสเปรย์ด้วยสารละลาย (Solution Spray) การเคลือบโดยตรงด้วยเรซินเหลว (Direct Hot Melt Coat) หรือถ้าในกรณีของเมตริกซ์ในตระกูลของเทอร์โมพลาสติกจะใช้วิธีการทำฟิล์มเคลือบด้วยลูกกลิ้ง(film calendaring) ดังรูปที่ 3.1.8, 3.1.9, 3.1.10

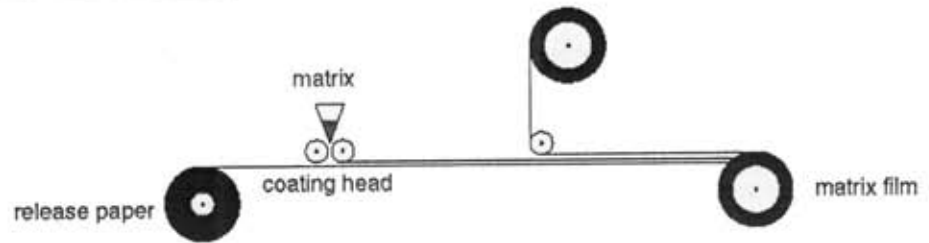
Solution route



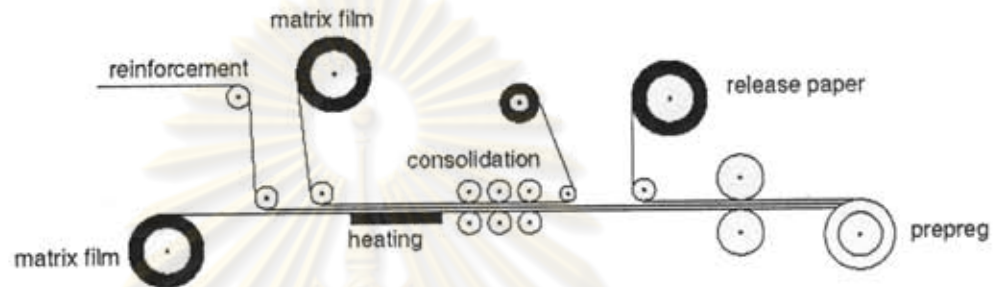
รูปที่ 3.1.8 การขึ้นรูป พรีเพลกต์ ด้วยวิธีใช้ตัวทำละลาย [1.44]

Film route : 2 steps process

Step 1

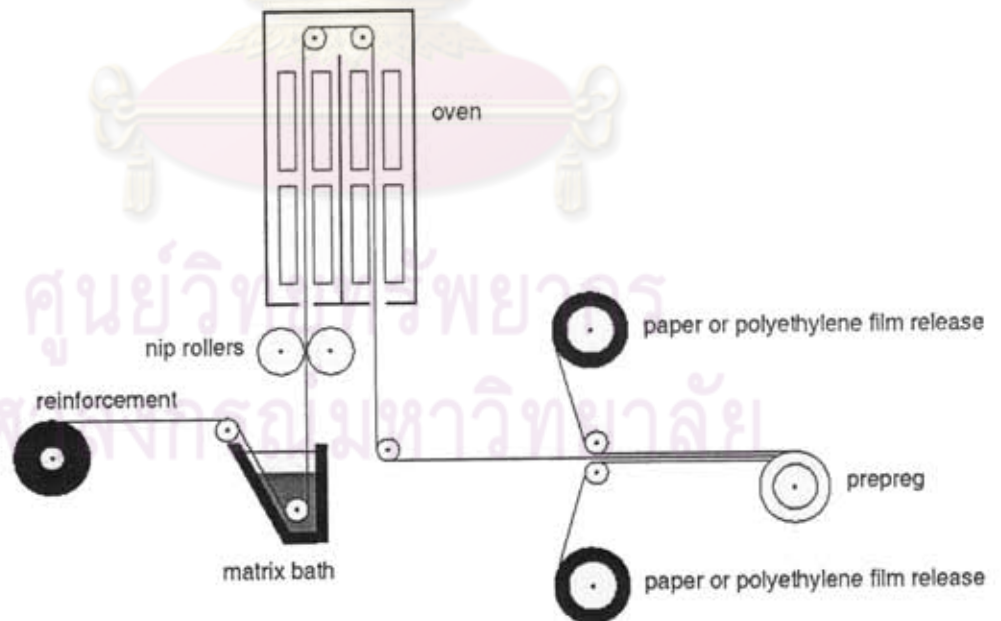


Step 2



รูปที่ 3.1.9 การขึ้นรูป ฟิล์มเคลือบ ด้วยวิธีเคลือบด้วยลูกกลิ้ง [1.44]

Bath route

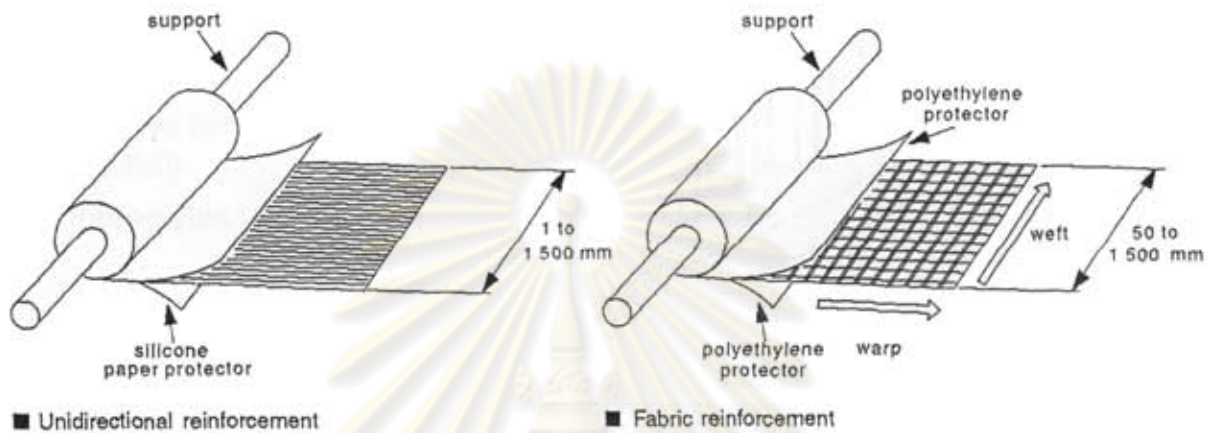


รูปที่ 3.1.10 การขึ้นรูป ฟิล์มเคลือบ ด้วยวิธีเรซินเหลว [1.44]

3.1.11 ลักษณะการสานกันของเส้นใยพรีเพลกต์

ลักษณะการสานกันของเส้นใยสามารถทำได้หลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ

1. Unidirectional เป็นการสานแบบที่มีทิศทางเดียวกัน
2. Fabric form ลักษณะการสานเหมือนแผ่นผ้า ดังรูปที่ 3.1.11



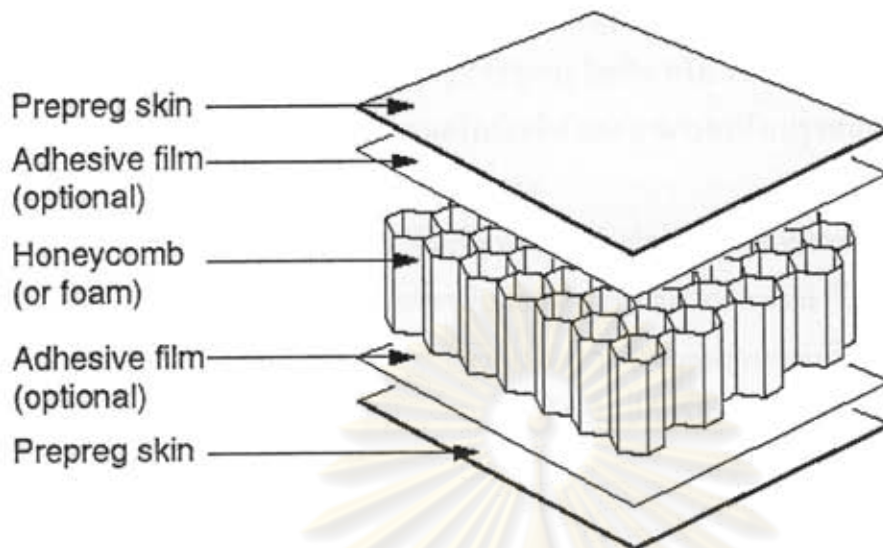
รูปที่ 3.1.11 ลักษณะการสานกันของเส้นใยพรีเพลกต์ [1.44]

ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะขึ้นรูปพรีเพลกต์โดยใช้ลักษณะการสานกันของเส้นใยในแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนมากนักและยังได้เส้นใยที่แข็งแรง มีน้ำหนักเบา ตามที่ต้องการ

3.1.12 โครงสร้างรังผึ้ง (Honeycomb)

โครงสร้างรังผึ้งเป็นโครงสร้างที่ประกอบกันขึ้นจากการนำวัสดุแผ่นบางๆมาประกอบติดกันให้อยู่ในลักษณะของเซลล์เปิดซึ่งโดยมากมักอยู่ในรูปของหกเหลี่ยม โดยการใช้งานของ รังผึ้ง จะอยู่ในลักษณะเป็นแกนของวัสดุในรูปแบบของโครงสร้างแซนวิช (Sandwich) โดยจะมีโครงสร้างของ รังผึ้ง เป็นวัสดุแกน (Core Materials) และมีชั้นผิว (Skin) ซึ่งมักทำจากพรีเพลกต์ ดังรูปที่ 3.1.11 โดยผลที่ได้ของโครงสร้าง sandwich ดังกล่าวจะได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงโดยเทียบได้กับโครงสร้างของ I Beam

HONEYCOMB SANDWICH WITH PREPREG SKINS



รูปที่ 3.1.12 โครงสร้างแซนวิช [1.44]

3.1.13 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในกระบวนการขึ้นรูปพรีเพลกส์นั้นมีความต้องการที่จะให้เมตริกซ์เรซินที่จะนำมาอบเส้นใยควรจะมีคุณสมบัติทั้งนี้เพื่อให้การขึ้นรูปสามารถทำได้ง่าย และให้ความสามารถในการแทรกซึมไปยังเส้นใยได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอมากกว่าเรซินที่มีความหนืดสูง ในกรณีที่เมตริกซ์เรซินมีความหนืดสูง กระบวนการขึ้นรูปของพรีเพลกส์นั้นจะซับซ้อนและทำได้ยากขึ้นกว่าเคม เช่น ใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น หรือ ใช้ตัวทำละลาย เพื่อให้เมตริกซ์เรซินมีความหนืดที่ต่ำลง และสามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึง

Shin และคณะ [1.38] ศึกษาผลของความหนืดของเมตริกซ์เรซินชนิด Polyimide ที่มีต่อความสามารถในการอบเส้นใย และ สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล ของวัสดุคอมโพสิต โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการขึ้นรูป 2 กระบวนการด้วยกัน คือ กระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน (Hot Melt Impregnation) และ กระบวนการขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (Solvent Impregnation) และใช้สารละลายเมตริกซ์เรซินที่มีความหนืด คือ 0.015, 1.5, 3, และ 9 Pa.s ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการอบเส้นใยของเมตริกซ์เรซินสามารถควบคุมได้ด้วยความหนืดของเมตริกซ์เรซิน เมตริกซ์เรซินที่มีความหนืดต่ำจะสามารถแทรกซึมและอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึงกว่า ซึ่งในกรณีที่เมตริกซ์เรซินมีความหนืดสูงในกระบวนการขึ้นรูปจะต้องใช้ตัวทำละลายเพื่อให้มีความหนืดต่ำลงและสามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามการใช้ตัวทำละลายที่มากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ขึ้นใน

ขึ้นงานและจะทำให้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติต่ำลงถ้าเมตริกซ์เรซินมีความสามารถในการอบเส้นใยต่ำ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนต่ำ และนอกจากนี้ความสามารถในการอบเส้นใยของเมตริกซ์เรซินในกระบวนการขึ้นรูปพรีเพกสท์มีผลต่อคุณภาพของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าตัวแปรอื่น เช่น วิธีการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต หรือ วิธีการบ่ม ดังนั้นสมบัติของวัสดุคอมโพสิตจึงขึ้นอยู่กับความหนืดของเมตริกซ์เรซิน และสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตได้โดยการใช้เมตริกซ์เรซินที่มีความหนืดต่ำลง

พอลิเบนซอกซาซินเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีศักยภาพ เนื่องจากจุดเด่นและข้อดีของพอลิเมอร์ชนิดนี้ เช่น เบนซอกซาซินมอนอเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นราคาถูก สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่ของโมเลกุล (Polymerization) ได้โดยใช้เพียงแค่ความร้อน ไม่ต้องใช้สารบ่ม ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นปฏิกิริยาการเปิดวงของมอนอเมอร์ดังนั้นจึงไม่มีผลพลอยได้จากปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิด void ในชิ้นงาน สามารถปรับปรุงโครงสร้างให้มีสมบัติตามต้องการ รวมถึง มีความสามารถด้านการขึ้นรูปที่โดดเด่น เช่น มีความหนืดต่ำ (5 Pa.s ที่ 100 องศาเซลเซียส) อิซิคะและอัลเลน [1.11] ศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเบนซอกซาซินเปรียบเทียบกับฟีนอลิกและอีพอกซีเรซิน พบว่า พอลิเบนซอกซาซินมีสมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีมาก และยังสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature) ที่สูง (ประมาณ 190 องศาเซลเซียส) มีค่ามอดูลัสการดึง (tensile modulus) 5.2 จิกะปาสคาล และความแข็งแรงในการดึง 64 เมกกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าอีพอกซี (165 องศาเซลเซียส, 2.7 จิกะปาสคาล และ 59 เมกกะปาสคาล) และฟีนอลิก (121 องศาเซลเซียส, 3.8 จิกะปาสคาล และ 48 เมกกะปาสคาล) ตามลำดับ

นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา เบนซอกซาซินยังสามารถทำเป็นพอลิเมอร์ลูกผสม หรือ พอลิเมอร์อัลลอยกับเรซินอีกหลายชนิดซึ่งจะให้ระบบเรซินลูกผสมที่มีสมบัติตามต้องการได้ เช่นอิซิคะและอัลเลน [1.12]ศึกษาาระบบเรซินลูกผสมระหว่างเบนซอกซาซินและอีพอกซีเรซิน พบว่าเรซินลูกผสมที่ได้มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงขึ้น โดยที่ปริมาณอีพอกซี ชนิด DGEBA 35% กับเบนซอกซาซินชนิด BA-a ให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้นจาก 143 องศาเซลเซียสเป็น 153 องศาเซลเซียส แต่ถ้ามีปริมาณของอีพอกซีมากเกินไปจะทำให้มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ต่ำกว่าเดิม นอกจากนี้เรซินลูกผสมที่ได้ยังมีค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งสูงขึ้น เช่น ที่ปริมาณอีพอกซี 50 % มีค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งคือ 170 เมกกะปาสคาล จากเดิม 125 เมกกะปาสคาล

Tyberg และคณะ [1.49] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเรซินลูกผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและฟีนอลิกเรซิน จากการวิเคราะห์พบว่าความร่วมมือกันของการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลมีได้จากสองปัจจัยคือ การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลและแรงระหว่างโมเลกุล(พันธะไฮโดรเจน) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในทางตรงกันข้ามคือเมื่อปริมาณของฟี

นอลิกเพิ่มขึ้นจะมีการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลลดลงแต่จะมีแรงระหว่างโมเลกุลมากขึ้น ดังนั้น ทำให้ที่อัตราส่วนฟีนอลิกต่ออีพอกซี 3ต่อ1 เป็นสัดส่วนระหว่างฟีนอลิกและอีพอกซีที่เหมาะสม

ริมคูตติและอิซิคะ [1.28-1.30] พัฒนาความสามารถด้านการขึ้นรูปของเบนซอกซาซินเรซินโดยทำเป็นเรซินลูกผสมระหว่าง เบนซอกซาซี อีพอกซี และ ฟีนอลิเรซิน เรซินลูกผสมที่ได้มีความสามารถด้านการขึ้นรูปที่สูงและยังสามารถดัดแปรสมบัติให้เป็นไปตามต้องการได้ด้วยการเปลี่ยนสัดส่วนของเรซินทั้งสาม เบนซอกซาซินที่อยู่ในระบบจะแสดงความสามารถในการขึ้นรูปด้วยความร้อน ความแข็งแรงที่สูง และการดูดซึมน้ำที่น้อย ในขณะที่อีพอกซี จะช่วยให้เรซินผสมมีความหนืดต่ำลง ช่วยให้พอลิเมอร์ที่ได้หลังจากการบ่มมีปริมาณการเชื่อมโยงสูงขึ้น มีความสามารถในการดัดโค้งดีขึ้น และช่วยให้มีการยึดเกาะกับพื้นผิวที่มีขรุขระมากขึ้น ในส่วนของฟีนอลิกจะช่วยให้อุณหภูมิการบ่มลดลง และช่วยให้มีความสามารถด้านการทนไฟที่ดีขึ้น จากการทดลอง พบว่าเรซินลูกผสมให้ค่าความหนืดที่ต่ำและยังคงค่าความหนืดนั้นไว้ได้เป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น 0.3 Pa.s ที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลากว่า 1000 วินาที ในขณะที่มีระยะเวลาการเจลไม่นานนักที่อุณหภูมิบ่ม คือ 5 ถึง 30 นาที ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และน้อยกว่า 5 นาที ที่ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเมตริกซ์เรซินสำหรับวัสดุพรีเพลกส์ได้ดี เนื่องจากมีช่วงระยะเวลาในการเจลที่เหมาะสม ทั้งนี้เมตริกซ์เรซินที่เหมาะสมสำหรับวัสดุพรีเพลกส์จะต้องมีระยะเวลาในการเจลอยู่ในช่วง 1-15 นาที และต้องมีอุณหภูมิในการบ่มอยู่ในช่วง 90-210 องศาเซลเซียส [1.33] พอลิเมอร์อัลลอยด์ที่ได้จากการบ่มอย่างสมบูรณ์ให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงถึง 170 องศาเซลเซียส และให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 5% การสูญเสียของน้ำหนัก สูงถึง 370 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบพบว่าพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่ได้มีค่าทั้งสองมากกว่าพอลิเบนซอกซาซิน นอกจากนี้พอลิเมอร์อัลลอยด์ที่ได้ยังให้ค่า char yield มากกว่าอีพอกซีเรซิน ซึ่งแสดงความสามารถด้านการทนไฟของพอลิเมอร์อัลลอยด์ ดังนั้น การใช้งานในระบบของเรซินลูกผสมจะให้พอลิเมอร์ที่มีความสามารถด้านการทนไฟ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานเป็นส่วนประกอบภายในของโครงสร้างสำคัญได้

Frigione และ Kenny [1.5] ศึกษาเสถียรภาพของพรีเพลกส์ที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมและมีอีพอกซีเป็นเมตริกซ์เรซิน โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมให้คงที่ โดยเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา และความสามารถในการขึ้นรูปของพรีเพลกส์เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาพรีเพลกส์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานขึ้น พรีเพลกส์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ลดลง โดยสามารถสังเกตได้จาก ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ที่ลดลงจาก 141 จูล/กรัม เป็น 90 จูล/กรัม ในระยะเวลา 5 เดือน คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ถึง 35% อย่างไรก็ตามเนื่องจากยังมีมอนอเมอร์บางส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังนั้นพรีเพลกส์จึงยังสามารถนำมาใช้งานขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตได้

วัสดุคอมพอสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงเป็นวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในงานประเภทโครงสร้างทางวิศวกรรมต่างๆ รวมไปถึงงานทางการแพทย์และงานที่ต้องการความแข็งแรงจำเพาะสูง ซึ่งวัสดุคอมพอสิตสำหรับงานประเภทนี้ต้องการสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม ทั้งนี้ถึงแม้ว่าพอลิเบนซอกซาซินจะแสดงสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่นความเหนียวต่ำ หรือ ไม่มีผลพลอยได้จากปฏิกิริยาการเชื่อมโยง แต่เนื่องจากพอลิเบนซอกซาซินมีโครงสร้างโมเลกุลที่แข็ง ทำให้พอลิเบนซอกซาซินยังคงมีความเปราะอยู่บ้าง

สำหรับวัสดุคอมพอสิตที่ต้องการความแข็งแรงสูง การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์เรซินมีความสำคัญมาก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายงานวิจัยด้วยกันที่ทำการศึกษารพัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตด้วยการปรับปรุงการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เรซิน เช่น Jang and Yang [1.18] ได้พัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและมีพอลิเบนซอกซาซินเป็นเมทริกซ์เรซิน โดยวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย โดยศึกษาวิธีการปรับปรุงเส้นใย 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการทางพลาสมา oxygen plasma treatment และวิธีการทางกรด nitric acid treatment จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยวิธีทั้งสองวัสดุคอมพอสิตที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงในการตัดโค้งสูงขึ้น จากเดิม (ประมาณ 380 เมกะปาสกาล) เป็น 850 เมกะปาสกาลและ 600 เมกะปาสกาลด้วยวิธีการทางกรด และวิธีการพลาสมาตามลำดับ นอกจากนี้จากการตรวจสอบยังพบความเสียหายที่เกิดขึ้นในลักษณะของความเสียหายที่เกิดแก่เมทริกซ์เรซิน cohesive failure ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เรซิน

อย่างไรก็ตามในวัสดุคอมพอสิตที่มีการจัดเรียงของเส้นใยอย่างเป็นระเบียบ และมีเมทริกซ์ที่มีความแข็งแรงเปราะลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นความเสียหายที่เกิดในลักษณะของการแยกระหว่างชั้น Delamination ด้วยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือน ดังนั้นในการที่จะให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติทางกลที่ดีจึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์เรซินให้มีความเหนียวมากขึ้น Jang and Yang [1.17] ได้ทำการปรับปรุงพอลิเบนซอกซาซินให้มีความเหนียวมากขึ้นโดยทำการเติมยางเหลว liquid rubber (ATBN and CTBN) ลงไปในเบนซอกซาซินเรซิน จากการศึกษาพบการเติม ATBN ลงไปในพอลิเบนซอกซาซิน สามารถปรับปรุงให้มีความเหนียวมากขึ้นและทำให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการเติมยางเหลวลงไปในเมทริกซ์เรซินยังคงมีข้อเสียคือ ยางเหลวจะทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมทริกซ์เรซินมีค่าลดลง

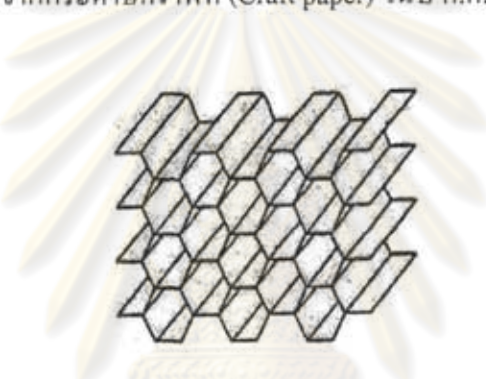
Ishida and Chaisuwan [1.13] ได้พัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงและมีเบนซอกซาซินชนิด BA-35X เป็นเมทริกซ์เรซินด้วยวิธีออบเส้นใยด้วยยาง ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เบนซอกซาซินชนิด BA-35X เนื่องจากเป็นเบนซอกซาซินในกลุ่มของบิสฟีนอลเอและเป็นอนุพันธ์ของอนิลินที่มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ

คล้ายแก้วที่มากที่สุด ($T_g = 236^\circ\text{C}$ of BA-35X and $T_g = 170^\circ\text{C}$ of BA-a) เส้นใยคาร์บอนที่ใช้เป็นเส้นใยชนิดเส้นผ้า และมีปริมาณของเมตริกซ์เรซินอยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นของ ATBN ที่เหมาะสมวัสดุคอมโพสิตจะให้สมบัติทางกลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่มีเมตริกซ์เรซินในระบบของอีพอกซีดีคแปร์ และฟีนอลิก

3.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)

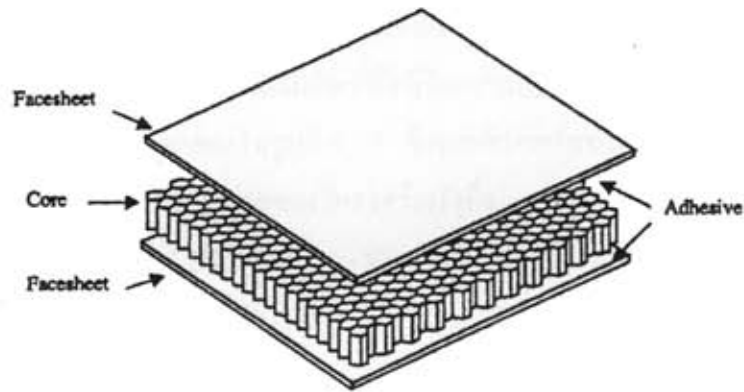
3.2.1 โครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งประกอบด้วยเซลล์เปิดหลายๆ เซลล์เชื่อมต่อกัน ทำจากแผ่นวัสดุบางๆ เชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 3.2.1 ส่วนมากเซลล์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า โครงสร้างรังผึ้งสามารถผลิตจากวัสดุที่เป็นแผ่นบางได้มากกว่า 500 ชนิด โครงสร้างรังผึ้งที่ใช้เป็นวัสดุแกน (Core material) เริ่มแรกผลิตจากกระดาษกราฟท์ (Craft paper) ในปี ค.ศ. 1905 ในประเทศเยอรมัน



รูปที่ 3.2.1 โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยม [2.1]

ใน ค.ศ. 1919 ได้เริ่มมีโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบิน และระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 และ 2 โครงสร้างรังผึ้งถูกใช้ในอุตสาหกรรมทหาร จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1945 ได้เริ่มมีโครงสร้างแซนวิชซึ่งทำจากอลูมิเนียมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบินอย่างแพร่หลาย รูปที่ 3.2.2 แสดงโครงสร้างแซนวิช ซึ่งประกอบด้วยแผ่นซีทและกาวด้านบนและล่าง และโครงสร้างรังผึ้งอยู่ตรงกลาง



รูปที่ 3.2.2 โครงสร้างแซนด์วิช [2.2]

ข้อดีของโครงสร้างรังผึ้งที่เด่นชัดที่สุดคือ มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงมาก มีความต้านทานการเสียดความยืดหยุ่น (Fatigue resistance) และไม่โค้งงอ (Buckling problem) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างรังผึ้งกับโฟมชนิดต่างๆ ที่มีความหนาแน่นเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2.1 ค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) และความทนแรงเฉือน (Shear strength) ของโครงสร้างรังผึ้งมีค่ามากกว่าโฟมมาก

ตารางที่ 3.2.1 เปรียบเทียบสมบัติของโครงสร้างรังผึ้งและโฟม [2.1]

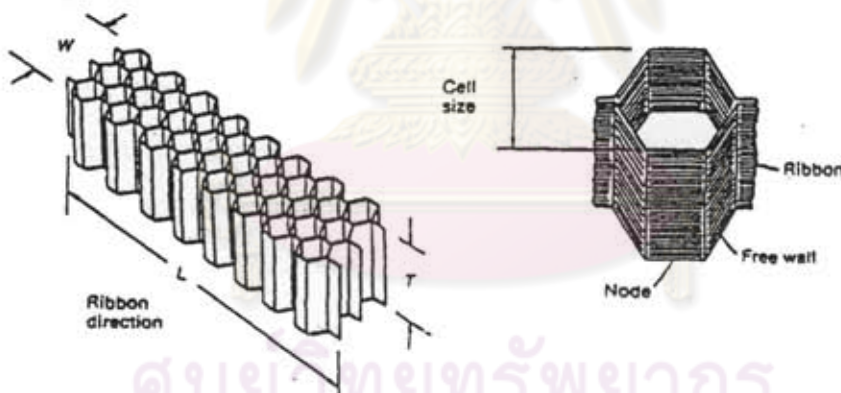
Material	Compression			Shear	
	Density (pcf)	Strength (psi)	Modulus (ksi)	Strength (psi)	Modulus (ksi)
Aluminum honeycomb	3.1	300	75	210	45
Nomex honeycomb	3.0	325	20	175	6
Fiberglass honeycomb	3.0	410	23	195	19
Rohacell foam	3.1	128	10	114	3
Klegecell foam	3.0	69	2.7	51	1.1
Rigicell foam	3.0	80	2.5	70	2.5
Divinycell foam	3.1	100	10.2	73	2.5

1 ksi = 1000psi

3.2.1.1 ส่วนประกอบของโครงสร้างรังผึ้ง และคำจำกัดความ [2.1]

วัสดุประเภทโครงสร้างรังผึ้งมีศัพท์ที่ใช้เรียกส่วนประกอบ และคำจำกัดความสำหรับเรียกส่วนต่างๆ โดยเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2.3 จึงขออธิบายศัพท์ที่ใช้กันเป็นส่วนมาก ดังนี้

1. เซลล์ (Cell) - หน่วยของโครงสร้างรังผึ้ง
2. ขนาดเซลล์ (Cell size) - ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง เป็นระยะตั้งฉากระหว่างส่วนที่เชื่อมติดกัน (วัดในด้านกว้าง)
3. ส่วนที่เชื่อมติดกัน (Node) - บริเวณของผนังเซลล์ที่เชื่อมติดกันระหว่างแต่ละเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง
4. ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน (Free wall) - บริเวณของผนังเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ไม่เชื่อมติดกับแผ่นอื่น
5. ด้านยาว (L direction or ribbon direction) - ด้านยาวของโครงสร้างรังผึ้งตามแนวแผ่นวัสดุ
6. ด้านกว้าง (W direction) - ด้านของโครงสร้างรังผึ้งที่ถูกดึงขยายออก หรือด้านที่ตั้งฉากกับด้าน L
7. ด้านสูง (T direction) - ความสูงของโครงสร้างรังผึ้ง



รูปที่ 3.2.3 ด้านต่างๆ ของโครงสร้างรังผึ้ง และคำศัพท์ที่ใช้เรียกโครงสร้างรังผึ้ง [2.1]

3.2.1.2 วัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้ง [2.1]

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โครงสร้างรังผึ้งผลิตได้จากวัสดุแผ่นมากมาย ทั้งโลหะและอโลหะ วัสดุแผ่นที่นิยมใช้ประเภทโลหะ ได้แก่ อลูมิเนียม สแตนเลส และไททานเนียม เป็นต้น ส่วนประเภทอโลหะ ได้แก่ ไฟเบอร์กลาส คาร์บอนไฟเบอร์ โนเม็กซ์ และกระดาษกราฟท์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีวัสดุอื่นๆ ที่ผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งได้ เช่น คอปเปอร์ ตะกั่ว และใยหิน เป็นต้น

การเลือกใช้วัสดุในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้งานเป็นหลัก ปัจจุบันโลหะที่นิยมนำมาผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ได้แก่ อลูมิเนียม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเครื่องบินและยานอวกาศ เช่น ในโครงสร้างเครื่องบินโบอิง 747 เป็นต้น วัสดุอีกประเภทที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ไฟเบอร์กลาส และอรามิด โดยเฉพาะในโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา และความแข็งแรงสูง เช่น อุปกรณ์กีฬา อุปกรณ์กีฬาทางน้ำ เป็นต้น

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากอลูมิเนียมมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด เมื่อต้องการโครงสร้างรังผึ้งที่มีน้ำหนักและราคาต่ำที่สุด ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากโนเม็กซ์และเทอร์โมพลาสติกจะมีความเหนียวและทนทานมากที่สุด โครงสร้างรังผึ้งที่มีราคาต่ำที่สุดคือ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากกระดาษกราฟท์เกรดการค้า

3.2.1.3 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งในอุตสาหกรรม [2.1]

วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามลักษณะการเชื่อมติดกันของแผ่นวัสดุ สามารถแบ่งได้เป็น 5 วิธี ได้แก่

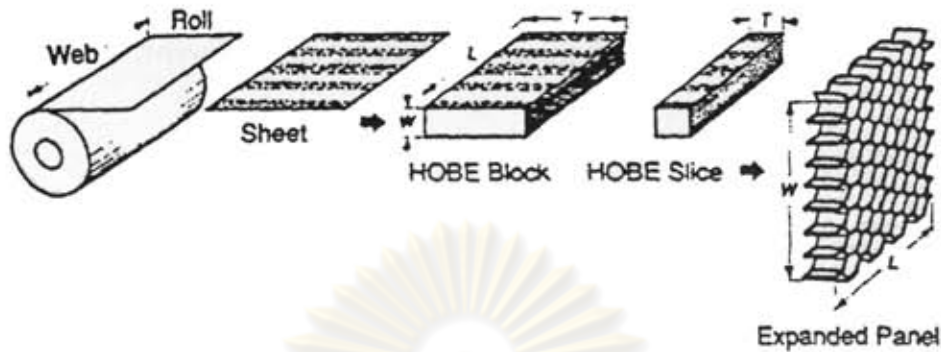
1. การเชื่อมแบบใช้กาว (Adhesive bonding)
2. การเชื่อมแบบใช้ความต้านทาน (Resistance welding)
3. การเชื่อมบัดกรี (Brazing)
4. การเชื่อมแบบการแพร่ (Diffusion bonding)
5. การเชื่อมแบบใช้ความร้อน (Thermal fusion)

วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การเชื่อมแบบใช้กาว ประมาณ 95% ของโครงสร้างรังผึ้งผลิตด้วยวิธีนี้ เช่น โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากอลูมิเนียม โนเม็กซ์ ไฟเบอร์กลาส และกระดาษกราฟท์ เป็นต้น โดยกาวที่ใช้ส่วนมากคือ อีพอกซี ฟีนอลิก และพอลิไอไมด์ สำหรับวิธีการเชื่อมแบบใช้ความต้านทาน บัดกรี และแบบการแพร่ ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่นำไปใช้กับอุณหภูมิสูงหรือในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ซึ่งการผลิตด้วยวิธีเหล่านี้จะมีราคาแพงมาก วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกบางชนิดผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งด้วยวิธีการเชื่อมแบบใช้ความร้อน โดยวัสดุบริเวณที่จะเชื่อมติดกันจะถูกหลอมด้วยความร้อน แล้วกดให้วัสดุ 2 แผ่นเชื่อมติดกัน

วิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแผ่นวัสดุเป็น โครงสร้างรังผึ้ง สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1. การผลิตแบบดึงขยาย (Expansion process) วิธีผลิตแบบเชื่อมติดกันด้วยกาว ส่วนมากจะใช้วิธีการผลิตแบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2.4 วิธีการผลิตเริ่มจากการทาแนวกาว (Adhesive lines) บนแผ่นวัสดุตามแนวที่จะเชื่อมติดกัน แล้วนำไปเรียงติดกันเป็นตั้ง ที่เรียกว่า

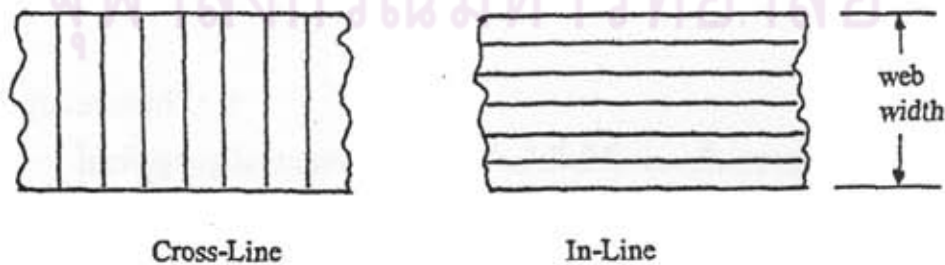
โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว หรือ HoBE (Honeycomb Before Expansion) จากนั้นนำไปบ่ม แล้วนำมาดึงขยายเป็นโครงสร้างรังผึ้งตามแบบที่ต้องการ



รูปที่ 3.2.4 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบบดึงขยาย [2.1]

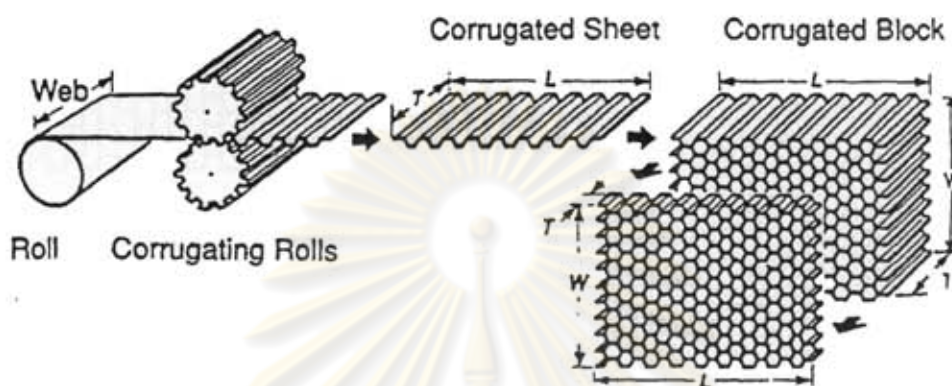
สำหรับวัสดุประเภทโลหะจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้หลังจากดึงขยายแล้ว จะต้องนำไปคงรูปโดยใช้ความร้อน (Heat-set) เพื่อให้โครงสร้างรังผึ้งไม่คืนรูปกลับไปเป็นโครงสร้างก่อนขยายตัวอีก หลังจากนั้นโครงสร้างรังผึ้งบางชนิด เช่น โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากกระดาษ หรือ ออราไมด์ เป็นต้น ต้องนำมาเคลือบด้วยเรซินและนำไปบ่มอีกครั้งเพื่อให้วัสดุคงรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งเรซินที่นิยมใช้เคลือบ คือ ฟีนอลิก และพอลิไอไมด์ การเคลือบและบ่มเรซินจะถูกทำซ้ำจนกว่าจะได้รับความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งตามที่ต้องการ โดยทั่วไปจะทำซ้ำประมาณ 2-3 ครั้ง

แนวทาบที่จะเชื่อมติดกันสามารถทาบแนววัสดุได้ทั้งแบบตามขวางแผ่นวัสดุ และตามยาวแผ่นวัสดุ รูปที่ 3.2.5 แสดงการทำแนวทาบบนแผ่นวัสดุ โดยการทำแนวทาบแบบตามขวางแผ่นวัสดุนั้น ความยาวของโครงสร้างรังผึ้งจะไม่ถูกจำกัดด้วยความกว้างของแผ่นวัสดุ อย่างไรก็ตามแนวทาบตามยาวแผ่นวัสดุ ซึ่งมีความสำคัญต่อการผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 3.2.5 การทำแนวทาบบนแผ่นวัสดุ [2.1]

2. การผลิตแบบทำให้เป็นรอยขุ่น (Corrugation process) ดังแสดงใน รูปที่ 3.2.6 วิธีการผลิตแบบนี้เป็นวิธีดั้งเดิม ใช้แรงงานในการผลิตมาก แต่ยังคงใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งประเภทโลหะ และประเภทโลหะบางชนิดที่ต้องการความหนาแน่นสูงๆ ที่ยากต่อการดึงขยาย วัสดุที่นิยมใช้กับการผลิตวิธีนี้ได้แก่ อลูมิเนียม และสแตนเลส เป็นต้น



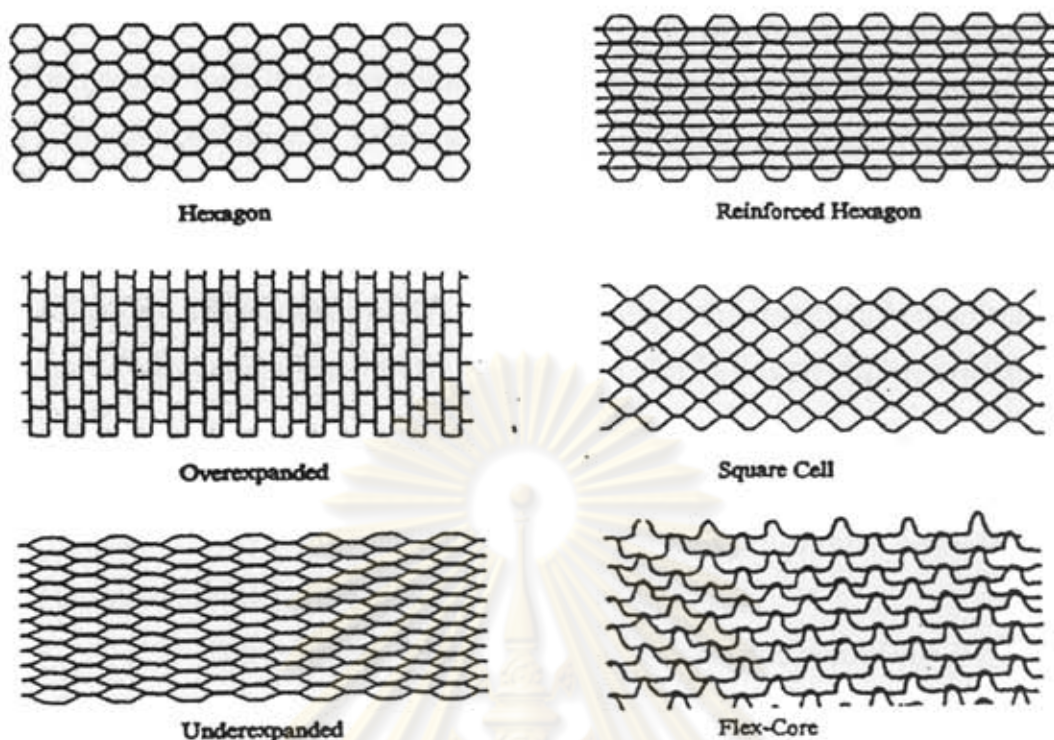
รูปที่ 3.2.6 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบบทำให้เป็นรอยขุ่น [2.1]

วิธีการผลิตแบบทำให้เป็นรอยขุ่นนี้ เริ่มแรกแผ่นวัสดุจะถูกนำมาขึ้นรูปเป็นรอยขุ่นก่อน จากนั้นกาวจะถูกทาในบริเวณที่จะเชื่อมติด แล้วนำแต่ละแผ่นมาติดกันภายหลัง และนำไปบ่ม เนื่องจากการเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งแบบทำให้เป็นรอยขุ่นนี้สามารถใช้แรงกดได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้กาวมีความหนามากกว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีดึงขยาย โดยทั่วไปโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีนี้มีน้ำหนักกาวประมาณ 10 % ของน้ำหนักโครงสร้างรังผึ้งทั้งหมด ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีดึงขยายจะมีน้ำหนักกาวประมาณ 1 % (หรือน้อยกว่า) ของน้ำหนักโครงสร้างรังผึ้งทั้งหมด

สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะบางชนิดที่ผลิตด้วยวิธีนี้ สามารถใช้วิธีการเชื่อมติดกันด้วยวิธีเชื่อมแบบใช้ความดัน ทาน บัดกรี และการเชื่อมแบบแพร่ แทนการเชื่อมติดด้วยกาวได้

3.2.1.4 รูปแบบเซลล์ [2.1]

โดยพื้นฐานรูปแบบเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagon) สี่เหลี่ยม (Square) และแบบโค้ง (Flex) นอกจากนี้ยังมีรูปแบบเซลล์ชนิดอื่นๆ อีก ได้แก่ แบบ Overexpanded Underexpanded และโครงสร้างรังผึ้งแบบเสริมแรง (Reinforced) รูปแบบต่างๆ ของเซลล์แสดงในรูปที่ 3.2.7



รูปที่ 3.2.7 รูปแบบเซลล์ชนิดต่างๆ [2.1]

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวิธีเชื่อมติดด้วยกาวส่วนใหญ่มีรูปแบบเซลล์แบบหกเหลี่ยม ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวิธีการเชื่อมแบบใช้ความดันทาน และบัดกรี จะมีรูปแบบเซลล์แบบสี่เหลี่ยม ซึ่งมีส่วนที่เชื่อมติดกันแคบ โครงสร้างรังผึ้งแบบ Overexpanded ก็คือ โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมที่มีการดึงขยายที่มากขึ้นจนกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะทำให้โครงสร้างรังผึ้งสามารถใช้ในลักษณะที่เป็นแบบทรงกระบอกได้ง่าย โดยโครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมนั้นทำให้เป็นรูปร่างที่โค้งได้ยาก ส่วนโครงสร้างรังผึ้งแบบโค้งใช้สำหรับงานที่ต้องการความโค้งมากๆ เช่น ใช้หุ้มวัสดุทรงกลมเล็กขนาดลูกเบสบอล เป็นต้น โครงสร้างรังผึ้งแบบเสริมแรงจะมีแผ่นวัสดุเสริมระหว่างจุดที่เชื่อมติดกัน เพื่อเพิ่มความหนาแน่น และสมบัติทางกล

3.2.2 โนเม็กซ์ (Nomex®)

เส้นใยไฟเบอร์ที่นิยมใช้เพื่อความแข็งแรงมี 3 ชนิด คือ คาร์บอนไฟเบอร์ กลาสไฟเบอร์ และอะรามิด

คาร์บอนไฟเบอร์ หรือแกรไฟต์ (Graphite) มักผลิตจากเส้นใยอะคริลิก (Acrylic fiber) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของอะครีโลไนไตรล์ ในกระบวนการผลิตมีการให้ความร้อน 3

ขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนเส้นใยอะคริลิกเป็นเส้นใยคาร์บอน ขั้นแรกให้ความร้อนแก่เส้นใยอะคริลิกที่ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิโดซิง ตามด้วยขั้นตอนที่ 2 ซึ่งให้ความร้อนแก่เส้นใยที่ถูกออกซิโดซิงในบรรยากาศเฉื่อยไปยังอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อะตอมไฮโดรเจนและไนโตรเจนจะถูกไล่ออกไป เหลืออะตอมคาร์บอนในรูปของวงแหวนหกเหลี่ยมจัดเรียงในเส้นใยที่ถูกดึงให้โมเลกุลเป็นระเบียบ สุดท้ายเส้นใยที่ถูกคาร์บอนไนซ์นี้จะถูกทำให้ร้อนไปที่อุณหภูมิ 3000 องศาเซลเซียสในบรรยากาศเฉื่อย เพื่อเพิ่มการจัดเรียงที่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนเป็นโครงสร้างผลึก คล้ายกับของแกรไฟต์ อะตอมเหล่านี้อยู่ในชั้นหรือระนาบที่ขนานกันและกัน ระนาบถูกดึงเป็นระเบียบดีในทิศทางตามแกนเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเส้นใยคาร์บอนที่มีมอดูลัสสูง

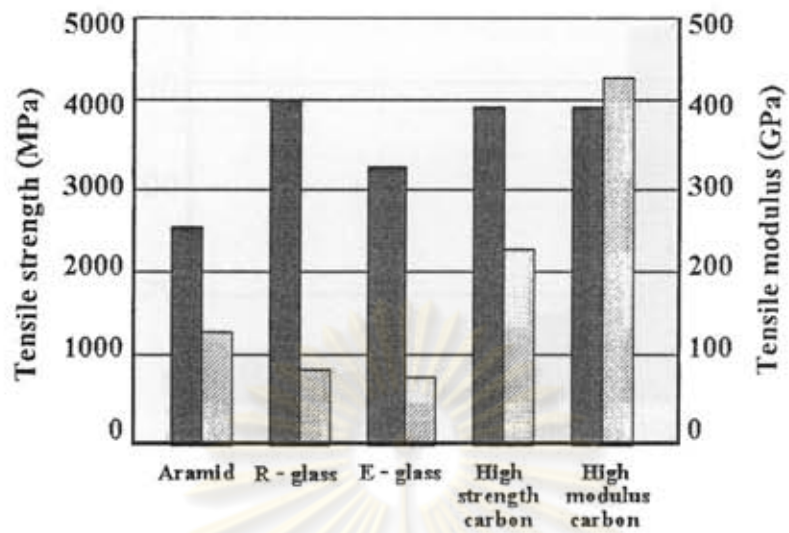
เส้นใยคาร์บอนมีสีดำ และผิวเรียบ มันวาว ไม่ติดไฟ เป็นเส้นใยที่มีค่าความแข็งแรง และค่าความแข็งดึงสูง ใช้ผสมกับพอลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์ประกอบ (Composites) เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีราคาแพงมาก

กลาสไฟเบอร์ หรือเส้นใยแก้วมีหลายชนิด กลาสไฟเบอร์ชนิด อี (E Glass fiber) มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ทนต่อน้ำและอัลคาไล และมีความแข็งแรงสูง กลาสไฟเบอร์ชนิด ซี (C Glass fiber) มีเคลือบออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ดำ มีความทนกรดดี ใช้ทำใยแก้วชนิดผืนเส้นใยละเอียด (Surfacing mats) กลาสไฟเบอร์ชนิด เอส (S Glass fiber) เป็นใยแก้วที่มีความแข็งแรงสูง ผลิตเป็นเส้นใยขาวต่อเนื่อง ใช้ในงานทำภาชนะทนความดัน กลาสไฟเบอร์ชนิด เอ็ม (M Glass fiber) เป็นใยแก้วชนิดมอดูลัสสูง มีราคาแพง

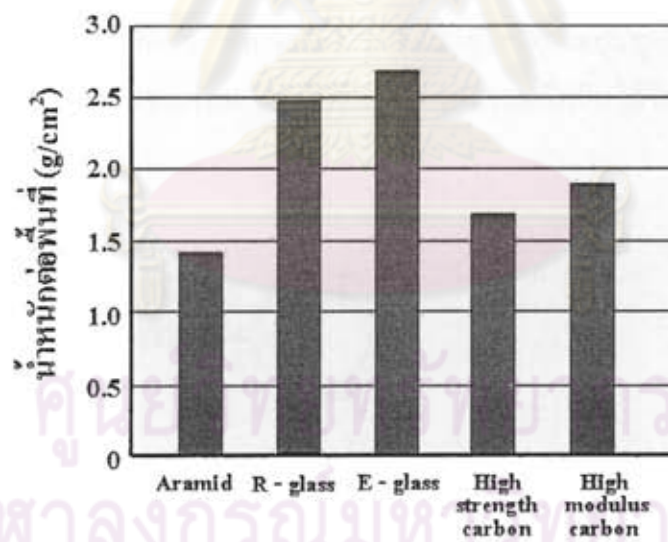
สมบัติต่างๆ ของกลาสไฟเบอร์ไม่เหมือนกับของแก้วปกติ กลาสไฟเบอร์มีความทนแรงดึงดีกว่าแก้วปกติ เป็นไปได้ที่กลาสไฟเบอร์จะมีความทนแรงดึงถึง 500,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความต้านทานต่อสารเคมีของกลาสไฟเบอร์จะลดลงจากของแก้วปกติ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของกลาสไฟเบอร์มีช่วงจากประมาณ 0.0001 ถึง 0.001 นิ้ว

อะรามิด หรืออะโรมาติกพอลิเอไมด์ (Aromatic polyamide) เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงดีมาก ทนไฟ ไม่หลอมแต่จะไหม้เกรียมที่อุณหภูมิประมาณ 760 องศาเซลเซียส บริษัทดูปองท์ (DuPont) ผลิตเส้นใยอะรามิดที่มีชื่อทางการค้าว่า โนเม็กซ์ ในปี ค.ศ. 1963 และชนิดที่มีชื่อทางการค้าว่า เคพลาร์ (Kevlar®) ในปี ค.ศ. 1973 [2.3]

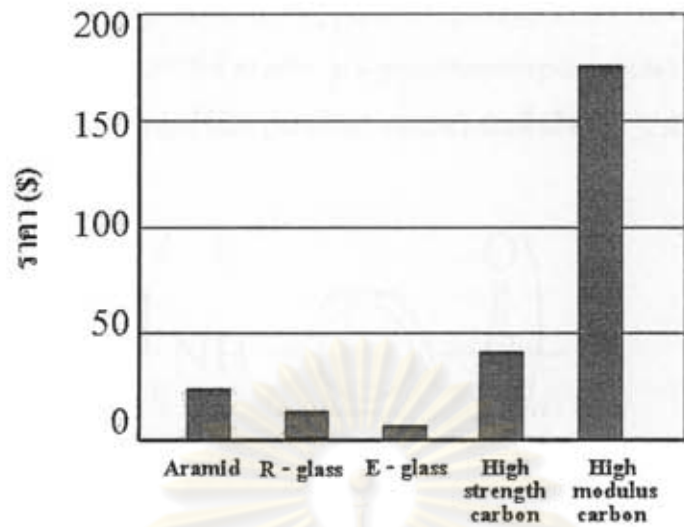
แต่ละชนิดมีข้อดีและสมบัติแตกต่างกัน รูปที่ 3.2.8 3.2.9 และ 3.2.10 เปรียบเทียบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัสแบบดึง (Tensile modulus) น้ำหนัก และราคาของไฟเบอร์ทั้ง 3 ชนิด [2.4]



รูปที่ 3.2.8 เปรียบเทียบความต้านแรงดึง ■ โมดูลัสแบบดึง □ ของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ

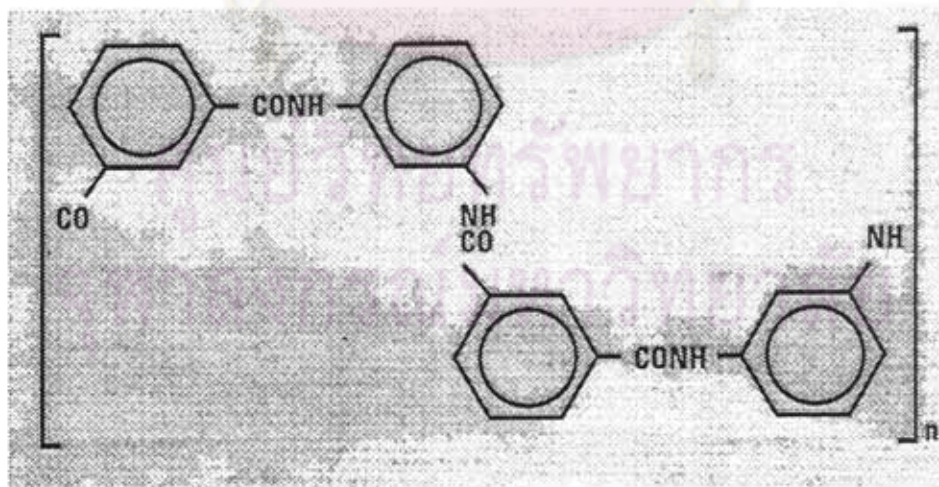


รูปที่ 3.2.9 เปรียบเทียบน้ำหนักต่อพื้นที่ของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ



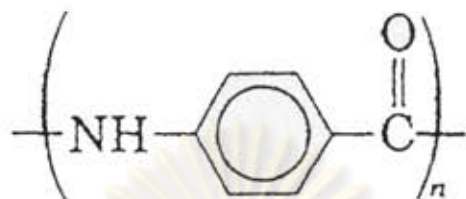
รูปที่ 3.2.10 เปรียบเทียบราคาของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ

โนเม็กซ์ ผลิตขึ้นโดยบริษัท DuPont เป็นชื่อทางการค้าของโพลีเมอร์อะรามิด แบบ m - isomer หรือ poly (m - phenyleneisophthalamide) ซึ่งมีสมบัติเด่นคือ ไม่ติดไฟ และทนความร้อน สามารถคงสมบัติทางกายภาพได้แม้อยู่ในที่อุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส ได้เป็นเวลานาน สมบัติทนความร้อน และไม่ติดไฟนี้ สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น ฟอสฟอรัส เป็นต้น

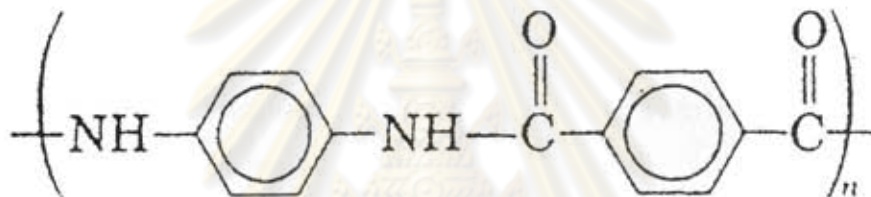


รูปที่ 3.2.11 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (m - phenyleneisophthalamide) [2.5]

อะรามิดแบบ p - isomer ชนิด poly (p - benzamide) ถูกผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1970 เพื่อใช้เป็นไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงใช้สำหรับเสริมความแข็งแรงให้กับยางรถยนต์ หลังจากนั้นไฟเบอร์ชนิดนี้ถูกแทนที่ด้วย poly (p - phenyleneterephthalamide) ในชื่อทางการค้าว่า เคปดาร์ (Kevlar®) ซึ่งเป็นไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงและความแข็งตึงมาก [2.6]



รูปที่ 3.2.12 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - benzamide) [2.6]

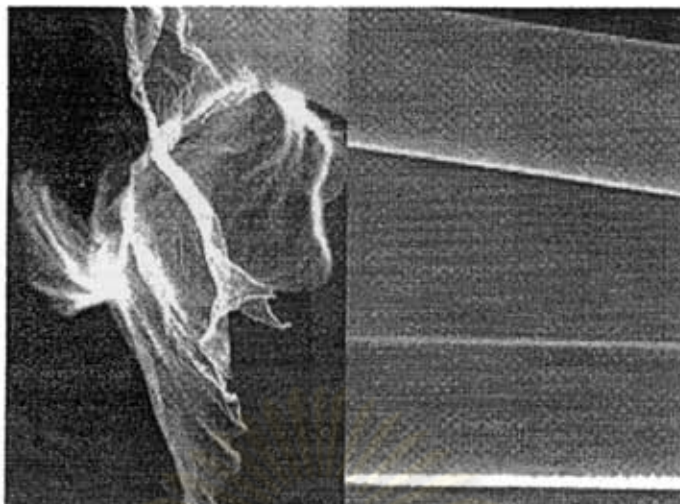


รูปที่ 3.2.13 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - phenyleneterephthalamide) [2.6]

3.2.2.1 การผลิตโนเม็กซ์ [2.7]

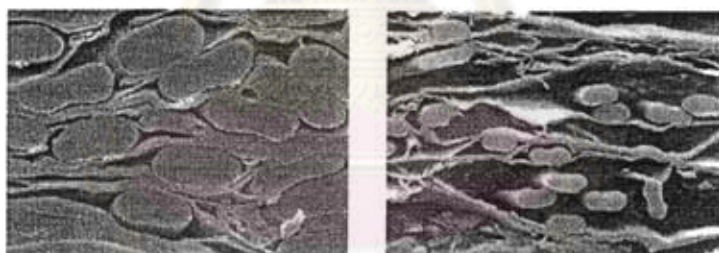
โนเม็กซ์ผลิตจากอะรามิดไฟเบอร์ 2 แบบ คือ แบบไฟบริดส์ (Fibrids) ซึ่งได้จากเส้นใยอะรามิดในสภาวะภายใต้แรงตึงสูง และแบบฟลอก (Floc) เป็นเส้นใยอะรามิดขนาดสั้น เส้นใยทั้ง 2 แบบจะถูกผสมกันในของเหลวที่ประกอบด้วยน้ำ เพื่อเป็นโครงสร้างแผ่นที่ต่อเนื่องกันตลอดในเครื่องสำหรับผลิต ซึ่งคล้ายกับกระบวนการผลิตกระดาษ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2.14 ลักษณะอะรามิดแบบไฟบริดส์ และ ฟลอก [2.7]

ระหว่างกระบวนการผลิต อะรามิดแบบฟลอก ซึ่งมีความยาวมากกว่าแบบไฟบริดส์ จะเรียงตัวในแนวตามทิศทางของแผ่น โนเม็กซ์ที่ถูกผลิตจากเครื่อง ซึ่งทำให้สมบัติของโนเม็กซ์ในทิศทางขวาง และทิศทางตามเครื่องจักรที่ผลิตนั้นมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 3.2.15 ภาพตัดขวางโนเม็กซ์ชนิด 410 และ 411 [2.7]

3.2.2.2 สมบัติของโนเม็กซ์ [2.7]

โนเม็กซ์เป็นวัสดุที่มีความเหนียว มีสมบัติเป็นฉนวนกันไฟฟ้าและความร้อน เมื่อถูกน้ำจะเกิดการอมน้ำน้อยมาก สามารถทนสารละลาย เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน อะซีโตน โทลูอิน และไซลีน เป็นต้น มีค่าดัชนีปริมาณออกซิเจน (Limiting Oxygen Index, LOI) ประมาณ 27 - 32 % ที่อุณหภูมิห้อง โดยขึ้นอยู่กับความหนาและความหนาแน่นของโนเม็กซ์ (วัสดุที่มีค่า LOI มากกว่า 20.8 % เป็นสารที่ไม่ช่วยในการเผาไหม้) โนเม็กซ์สามารถทนความร้อนได้ถึงช่วงอุณหภูมิ 240 - 350 องศาเซลเซียส สมบัติเชิงกลของโนเม็กซ์ที่มีความหนาต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.2.2 [2.7]

ตารางที่ 3.2.2 สมบัติเชิงกลของโพลิเอทิลีน [2.7]

Nominal thickness	(mil)	2	3	10	15	Test method
	(mm)	0.05	0.08	0.25	0.38	
Typical thickness ¹⁾	(mil)	2.2	3.1	10.2	15.2	ASTM D-374
	(mm)	0.06	0.08	0.26	0.39	
Basis weight (g/m ²)		41	63	249	397	ASTM D-646
Density (g/cc)		0.72	0.8	0.96	1.03	
Tensile strength (N/cm)	MD	39	65	285	459	ASTM D-828
	XD	18	32	152	252	
Elongation (%)	MD	9	11	19	19	ASTM D-828
	XD	6	8	15	14	
Elmendorf tear (N)	MD	0.8	1.2	6	9.5	TAPPI-414
	XD	1.6	2.3	10.8	17.2	
Initial tear ²⁾ strength (N)	MD	11	19	71	116	ASTM D-1004
	XD	6	8	42	74	
Shrinkage at 300 c (%)	MD	2.2	1.1	0.4	0.3	
	XD	0.1	0	0.1	0.2	

MD = Machine direction of paper

XD = Cross direction of paper

3.2.3 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

ปริมาณของอีพอกซีเรซินที่ถูกผลิตขึ้นนั้น แม้ว่าจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ เรซินชนิดอื่นๆ เช่น โพลีเอทิลีน หรือโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น แต่ความหลากหลายของเทคโนโลยี และการประยุกต์ใช้อีพอกซีเรซินนั้นมีบทบาทสำคัญมากกว่าเรซินชนิดอื่นๆ อีพอกซีสามารถใช้เป็นกาว สี วานิช สารเคลือบ และอื่นๆ อีกมาก นอกจากนี้ อีพอกซียังสามารถถูกใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น แบบร้อน แบบเย็น สเปรย์ ลูกกิ้ง เป็นต้น เหตุผลที่ทำให้อีพอกซีสามารถถูกประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เนื่องจากสมบัติเด่นๆ ดังนี้ [2.8]

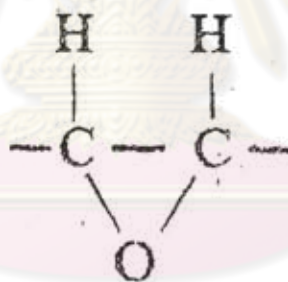
1. ระหว่างอีพอกซีถูกบ่ม ไม่มีสารระเหย หรือผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้น
2. การหดตัวมีน้อยมาก ประมาณ 1 – 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
3. อีพอกซีที่บ่มสมบูรณ์แล้ว มีสมบัติยึดติดกับสารอื่นหลายชนิดได้ดี

4. มีความต้านทานสารเคมี
5. มีความเหนียว
6. มีความแข็งแรงทางกล
7. มีความต้านทานไฟฟ้าสูง

อีพอกซีที่ถูกใช้เป็นกาว ได้รับความนิยมนีเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงเมื่อใช้เชื่อมวัสดุจำพวกโลหะ เทอร์โมพลาสติก สารประกอบแต่งเทอร์โมเซต และเชื่อมโลหะกับพลาสติก ด้วยความก้าวหน้าในการพัฒนาสูตรทางเคมีในปัจจุบัน ทำให้อีพอกซีมีความเหนียว ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับวัสดุประเภทสารประกอบแต่ง พลาสติกที่เสริมความแข็งแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และวัสดุที่นำไปใช้ในสภาวะที่มีการสั่นสะเทือน เป็นต้น ซึ่งอีพอกซีที่มีความเหนียวนี้ทำให้การยึดติดในสภาวะที่รุนแรงมีเวลายาวนานขึ้นด้วย [2.9]

3.2.3.1 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน

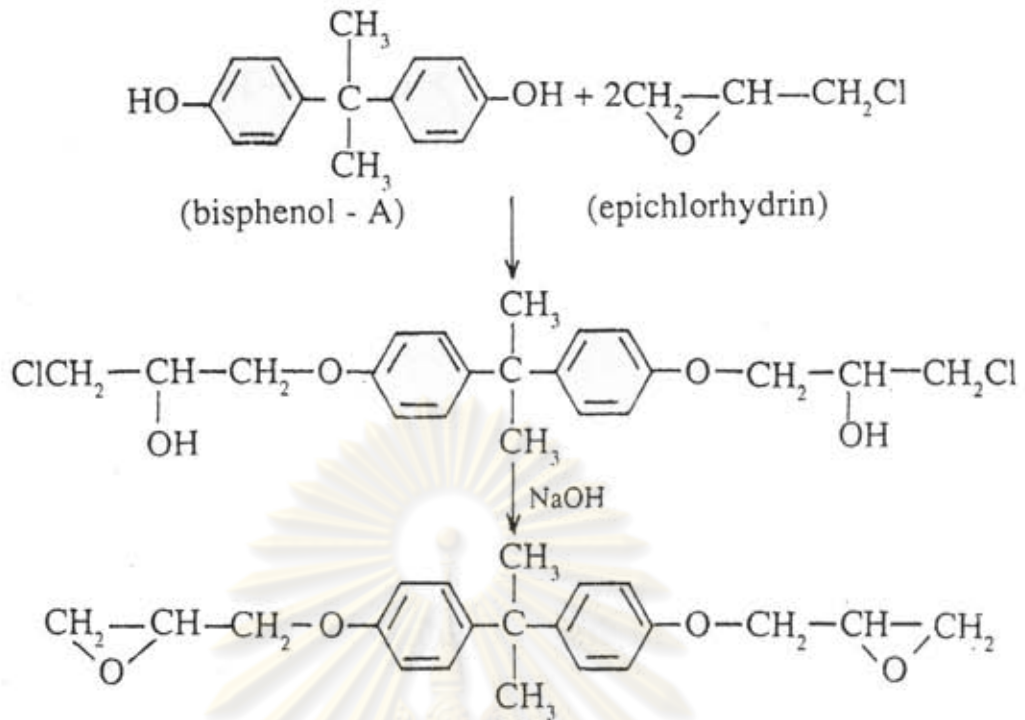
อีพอกซี หรืออีพอกไซด์เรซินมีหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide) หรือออกซิเรน (Oxirane) อยู่ในโครงสร้าง หมู่อีพอกซีว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากเนื่องจากอยู่ภายใต้ความเครียด และเปิดวงแหวนออกได้ง่าย [2.3]



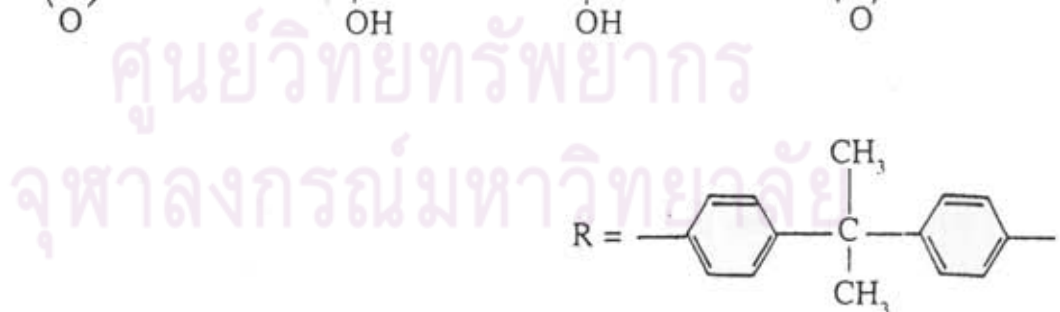
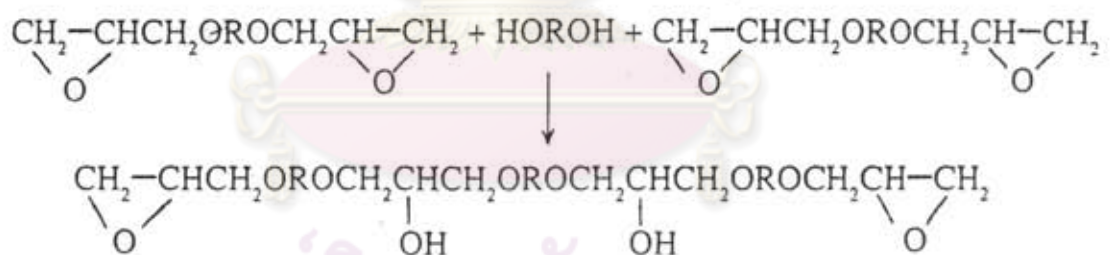
รูปที่ 3.2.16 หมู่อีพอกไซด์ [2.10]

อีพอกซีเรซินเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างได - หรือโพลีไฮดรอลิกฟีนอล และอีพิแฮโลไฮดริน (Epihalohydrin) ซึ่งโพลีไฮดรอลิกฟีนอลที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ บิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) และอีพิแฮโลไฮดรินที่สำคัญในทางการค้า คือ อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin)

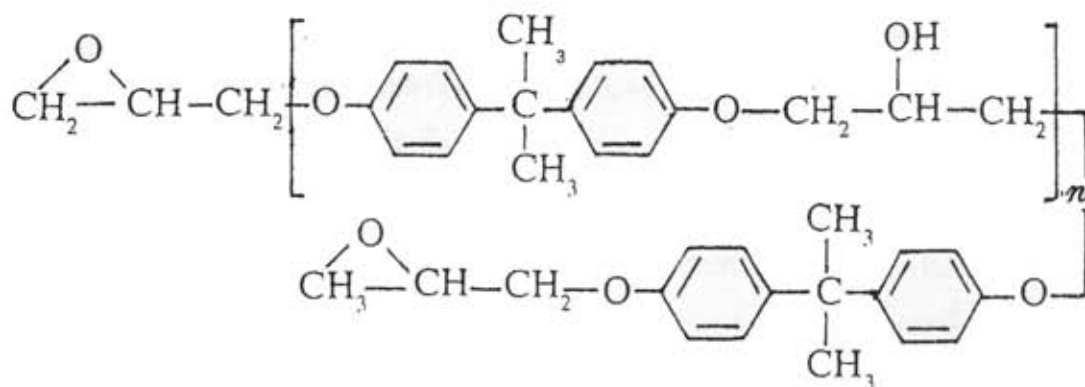
อีพอกซีเรซินเป็นเทอร์โมเซตที่ผลิตใน 2 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาของอีพิคลอโรไฮดริน กับบิสฟีนอล เอ โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในช่วง 50 - 105 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นแรก จะทำปฏิกิริยากับบิสฟีนอล เอ ต่อไป ทำให้วงอีพอกซี (Epoxy ring) เปิดออก



ปฏิกิริยาจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนถึงขั้นของโพลิเมอร์ และเนื่องจากปลายโซ่ทั้ง 2 ข้าง จะสิ้นสุดด้วยหมู่อีพอกซี ดังนั้นปฏิกิริยานี้จะต้องมีอีพอกซีคลอโรไฮดรินเหลือเพื่อ [2.11] โครงสร้างของอีพอกซีเรซินแสดงดังรูปที่ 3.2.17



รูปที่ 3.2.17 โครงสร้างของอีพอกซีเรซิน [2.11]

ถ้าใช้อัตราส่วนอีพอกซีไฮดรอกไซด์สูง n จะเท่ากับ 1 หรือน้อยกว่า 1 ตามสูตรเคมี และผลิตภัณฑ์อีพอกซีที่ได้จะเป็นของเหลวหนืด เมื่อ n มากกว่า 1 เรซินจะเป็นเทอร์โมพลาสติก

บิสฟีนอล เอ นั้นเตรียมได้จากฟีนอลกับอะซิโตน (Acetone) ดังนั้นอักษร A ในคำ Bisphenol A จึงหมายถึงอะซิโตนนั่นเอง อาจใช้เรซอร์ซินอล (Resorcinol) ไฮโดรควิโนน (hydroquinone) ไกลคอล (Glycols) หรือกลีเซอรอล (Glycerol) แทนบิสฟีนอล เอ ก็ได้

อีพอกซีอาจจะถูกบ่มให้เกิดการเชื่อมขวางเป็นเทอร์โมเซตได้ 2 วิธี คือ ใช้เทอเชียรีเอมีน (Tertiary amine) หรือกรดลิวอิส (Lewis acids) เช่น สารเชิงซ้อนของโบรอนไตรฟลูออไรด์ เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาควมน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ ตัวร่วมปฏิกิริยา (Coreactants) อาจเป็นสารพวกเอมีน พอลิเอไมด์ กรดคาร์บอกซิลิก ฟีนอลิกเรซิน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิสูง อาจใช้เมทิลีนไดอะนิลีน (Methylene dianiline) ได้ โดยทั่วไปจะไม่เติมสารบ่มจนกว่าจะถึงเวลาทำปฏิกิริยาสุดท้ายที่ต้องการ

อีพอกซีเรซินไม่ได้ปล่อยผลพลอยได้ (By - products) ออกมาในระหว่างการบ่ม ดังนั้นการหดตัวระหว่างการบ่มจะมีน้อย เรซินชนิดนี้ยึดติดกับวัสดุส่วนมากได้ดี ในสภาพของเหลวจึงใช้เป็นกาว และใช้เป็นสารเคลือบผิว ในรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกมีการนำไปทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสชนิดดี ซึ่งใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์ รถยนต์ เป็นต้น [2.3]

3.2.3.2 สมบัติของอีพอกซีเรซิน [2.11]

1. อีพอกซีเรซินมีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ต่างๆ ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อด่างทั้งหลาย เพราะโมเลกุลไม่มีหมู่เอสเทอร์ที่จะถูกสะพอนิฟายได้ มีแต่พันธะอีเทอร์ และพันธะคาร์บอน - คาร์บอนเท่านั้น

2. อีพอกซีเรซินมีสมบัติยึดกับผิวหน้าต่างๆ ได้ดี เพราะโซ่โพลีเมอร์มีปริมาณของ หมู่ที่มีขั้วสูง นอกจากนี้การมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกันอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุล จะทำให้เกิด พันธะไฮโดรเจนได้ดี เป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโซ่สูง

3. อีพอกซีเรซินมีความแข็งแรง และอ่อนตัว ไม่เปราะ การที่โมเลกุลมีหมู่อะโรมาติกอยู่บนโซ่ ทำให้โซ่แข็ง ดังนั้นจึงทำให้อีพอกซีเรซินทนความร้อนได้ดี ในขณะที่เดียวกัน การที่โซ่มีพันธะเดี่ยว จึงทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการหมุน (Rotation) รอบๆ พันธะเดี่ยวได้ จึงทำให้อีพอกซีเรซินมีความอ่อนตัวดี ไม่เปราะ

4. หมู่อีพอกซีเรซิน และหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุล ทำให้อีพอกซีเรซินสามารถเกิดพอลิเมอร์เชชัน หรือเกิดการบ่มต่อไป ทำให้ได้เป็นโครงสร้าง 3 มิติที่แข็งแรง ทนทานและใช้ประโยชน์ได้ดี

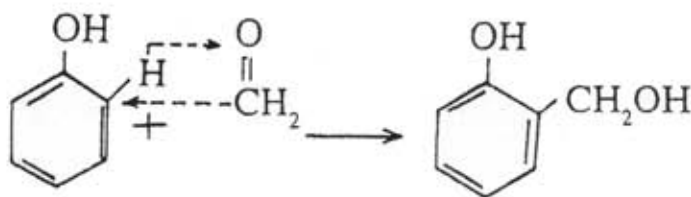
3.2.4 ฟีนอลิกเรซิน

ฟีนอลิกเรซินเป็น โพลีเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์แบบกลั่นตัว (Condensation polymerization) ซึ่งโมเลกุลที่หลุดออกมาจากกระบวนการมักเป็นน้ำ ฟีนอลิกเรซินสามารถผลิตขึ้นได้ทั้งในรูปแบบผง เกล็ด ก้อน และของเหลว สมบัติของฟีนอลิกเรซินสามารถถูกออกแบบได้อย่างกว้างขวาง ตามการประยุกต์ใช้ที่ต้องการ เช่น ค่าปฏิกิริยา (Reactivity) ปริมาณความชื้น น้ำหนักโมเลกุล พีเอช ระดับโมโนเมอร์ ความหนืด การไหล การหล่อลื่น และขนาดอนุภาค เป็นต้น [2.3]

3.2.4.1 การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน [2.11]

ฟีนอลิกเรซินได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล หรือฟีนอลที่ถูกแทนที่ กับแอลดีไฮด์ หรือสารที่จะเกิดเป็นอัลดีไฮด์ได้ ฟีนอลิกเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมักนำมาดัดแปรด้วยชันสน กรดโรซิน หรือกรดไขมัน

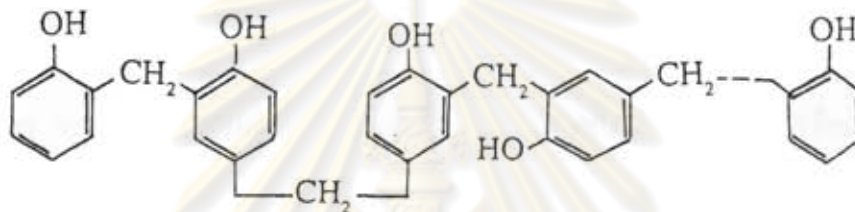
โดยปกติแล้ว ฟีนอลิกเรซิน หมายถึงเรซินที่ได้จากฟีนอลเข้าทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ ได้เป็นเมทิลลอลฟีนอล (Methylol phenol) ดังนี้



ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ จะเกิดเรื่อยๆ ไป โดยไม่มีขอบเขตจำกัด
การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินทำได้ 2 แบบ คือ ทำในภาวะที่ใช้ฟีนอลมากเกินไป
และแบบที่ทำในภาวะที่ใช้ฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป

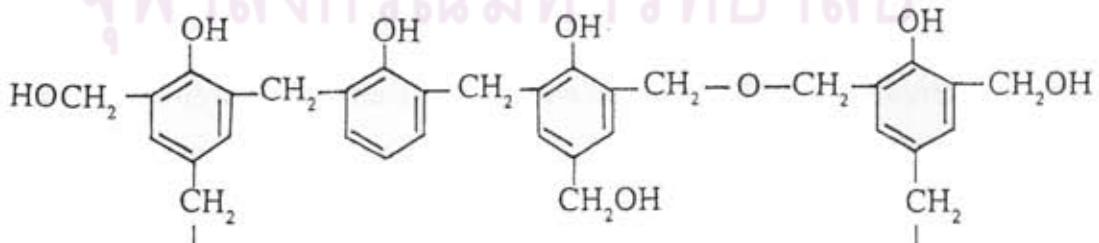
3.2.4.2 ประเภทของฟีนอลิกเรซิน [2.3, 2.11]

1. โนวาแลกฟีนอลิกเรซิน (Novalac phenolic resin) เตรียมขึ้นในภาวะที่ใช้ฟีนอล
มากเกินไป โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเตรียมขึ้นในภาวะที่ขาดฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนั้น
จะมีหมู่เมทิลอล (CH_2OH) เกิดขึ้นน้อย ปฏิกิริยาจึงเกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลอล
ฟีนอล กับไฮโดรเจนของอีกโมเลกุลหนึ่ง เกิดเป็นพันธะเมทิลีน โนวาแลกเรซินมีโครงสร้างดังนี้



โนวาแลก ไม่มีหมู่เมทิลอลเหลืออยู่ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้า
ไม่เติมฟอร์มัลดีไฮด์ หรือสารบ่ม เช่น เฮกซะเมทิลีนเทตระเอมีน (Hexamethylene tetraamine)
ดังนั้น โนวาแลกจึงมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก คือยังละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ และ
หลอมเหลวได้

2. ริซอลฟีนอลิกเรซิน (Resole phenolic resin)) เตรียมขึ้นในภาวะที่ใช้ฟอร์มัลดี
ไฮด์มากเกินไป โดยมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของริซอลมีหมู่เมทิลอลอยู่มาก หมู่
เมทิลอลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นพันธะอีเทอร์ และหมู่เมทิลอลอาจเข้าทำปฏิกิริยากับ
ไฮโดรเจนของอีกโมเลกุลหนึ่ง เกิดเป็นพันธะเมทิลีนด้วย ริซอลเรซินมีโครงสร้างดังนี้



เนื่องจากโมเลกุลของรีซอลมีหมู่เมทิลลอลอยู่มาก ดังนั้นถ้าให้ความร้อนกับรีซอลจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นตาข่าย ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลายทั้งหลาย

3.3.2.3 สมบัติของฟีนอลิกเรซิน [2.11]

1. ความคงทนที่อุณหภูมิสูง สมบัติที่สำคัญของฟีนอลิกเรซินก็คือ ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง และทนต่อแรงทางกลได้โดยมีการผิดรูป (Deformation) หรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Creep) น้อยมาก ฟีนอลิกเรซินที่ผ่านการบ่มแล้วจะมีสภาพแข็งเกร็งเพียงพอที่จะคงสภาพที่สมบูรณ์ของโครงสร้าง และเสถียรภาพของมิติไว้ได้ แม้ในสภาวะที่รุนแรง

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงเสถียรภาพของอุณหภูมิคือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว คือ การอุปมาอุปไมยการหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ของแข็งที่เป็นผลึก เช่น น้ำแข็ง หรือโพลีเอทิลีน จะหลอมเหลว และกลายเป็นของเหลว ของแข็งอสัณฐาน เช่น แก้ว และฟีนอลิกเรซินที่บ่มแล้ว ผ่านช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเคลื่อนที่ของโมเลกุลนี้ทำให้การไหล หรือการเปลี่ยนรูป และเกิดการเปลี่ยนแปลงมิติอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิมากกว่า T_g ฟีนอลิกเรซินยังคงสภาพการเชื่อมโยง (Crosslink) และยังคงมีความแข็งตึงบางส่วนอยู่ ซึ่งในอุดมคติแล้ว อุณหภูมิสุดท้ายในการใช้งานไม่ควรเกินค่า T_g

2. ความแข็งแรงของพันธะ ในเบื้องต้น ฟีนอลิกเรซินใช้เป็นตัวเชื่อมพันธะ ฟีนอลิกเรซินสามารถเข้ากันได้กับสารเติม และสารเพิ่มความแข็งแรง ทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ซึ่งทำให้ฟีนอลิกเรซินมีสมบัติในการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย ฟีนอลิกเรซินแทรกซึมโครงสร้างของสารเหล่านี้ได้อย่างรวดเร็ว สมบัติขั้นสุดท้ายได้เมื่อผ่านความร้อนในช่วงสั้นๆ เพื่อให้กระบวนการเชื่อมโยงสมบูรณ์

3. ความต้านทานสารเคมี การใช้งานฟีนอลิกเรซิน บ่อยครั้งที่ถูกเจาะจงให้ใช้ในสภาวะที่ต้องเผชิญกับสารเคมีอย่างรุนแรง ธรรมชาติของฟีนอลิกเรซินจะเป็นเกราะป้องกันแก่สารต่างๆ จากการกัดกร่อนของสารเคมี การทดสอบในห้องปฏิบัติการยืนยันการเสื่อม (Degradation) ที่เล็กน้อยจากสารเคมีหลายชนิด แม้เผชิญเป็นเวลานานในที่อุณหภูมิสูง โดยสารเคมีที่ทนได้ ได้แก่ น้ำมันเบนซิน แอลกอฮอล์ น้ำมัน โกลลอล น้ำมันเบรค ไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด และกรดและเบสชนิดอ่อน เป็นต้น

4. ควันและสภาพเป็นพิษ (Toxicity) ค่า ฟีนอลิกเรซินสามารถถูกออกแบบให้มีอัตราการติดไฟเฉพาะตามที่ต้องการได้ สำหรับการใช้งานในบริเวณที่จุดติดไฟได้ โดยการเลือกใช้สารเติม และสารเสริมความแข็งแรงชนิดอนินทรีย์ เมื่อเกิดไฟขึ้น ฟีนอลิกเรซินจะให้ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน ไออน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน

อุณหภูมิสลายตัว (Decomposition) ฟีนอลิกเรซินจะผลิตควันในปริมาณที่น้อยมาก และมีระดับสภาพเป็นพิษต่ำ

3.2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

สิทธิบัตรเกี่ยวกับโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุประเภทโลหะ ได้เริ่มมีตั้งแต่ ค. ศ. 1904 Dagobert Budwig จดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากกระดาษ (US Patents No. 765,412) [2.12] เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีลักษณะเป็นลูกกลิ้งส่งกระดาษออกมาอย่างต่อเนื่อง แล้วใช้ลูกกลิ้งซึ่งจุ่มอยู่ในถาดใส่กาว ทากาวบนกระดาษทั้ง 2 ด้าน แล้วหมุนไปติดกับกระดาษที่ส่งมาอย่างต่อเนื่องอีกแผ่นหนึ่ง เพื่อนำไปใช้ผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งต่อไป แต่ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในขั้นตอนต่อไป

Roger C. Steel (1952) บริษัท California Reinforced Plastic Company จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตและเครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No. 2,610,934) [2.13] เพื่อใช้ในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุที่อ่อนตัว และทำให้โค้งตัวได้โดยไม่เสียรูป เช่น กระดาษ แผ่นอลูมิเนียมบาง และเส้นใย เป็นต้น เครื่องจักรในสิทธิบัตรนี้ ผลิตโครงสร้างรังผึ้งโดยเริ่มจากทาแนวกาวบนแผ่นวัสดุ แผ่นวัสดุจะผ่านลูกกลิ้งทากาว ซึ่งเป็นลูกกลิ้งหลายๆ อันเรียงกันบนแกนหมุน และจุ่มอยู่ในถาดใส่กาว แกนหมุนลูกกลิ้งสำหรับทากาวนี้มีทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นวัสดุ ทากาวเป็นแนวขนานกับความยาวของแผ่นวัสดุที่ส่งมาจากม้วนอย่างต่อเนื่อง ความกว้างของลูกกลิ้ง และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแต่ละอันตามแนวขวาง ถูกออกแบบให้สัมพันธ์กับขนาดของเซลล์ที่ต้องการ โดยแนวกาวด้านหน้าและหลังแผ่นวัสดุจะสลับกันตามตำแหน่งของโครงสร้าง เมื่อแผ่นวัสดุผ่านลูกกลิ้งทากาวแล้วจะผ่านไปที่เตาอบเพื่อทำให้กาวแห้ง แผ่นวัสดุตามความยาวที่ต้องการจะถูกวางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ไปด้วยกลไกที่ประกอบด้วยเฟืองจำนวนมาก ก็จะได้โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว

ในปี ค.ศ. 1956 Roger C. Steel ในนามของบริษัท Hexcel Products Inc. California จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.2,734,843) [2.14] ปรับปรุงการผลิตโครงสร้างรังผึ้งในส่วนของโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว โดยเสนอ 3 วิธีการ แต่ละวิธีการประกอบด้วยขั้นตอนหลักเหมือนกัน คือ การทาแนวกาวบนแผ่นวัสดุ การตัดแผ่นวัสดุ และนำไปวางซ้อนติดกัน

ในสิทธิบัตรนี้เสนอวิธีผลิตวิธีที่ 1 ดังนี้ แผ่นวัสดุจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องจากม้วนแผ่นวัสดุไปยังลูกกลิ้งเล็กๆ ที่จุ่มอยู่ในถาดใส่กาว ซึ่งเป็นลูกกลิ้งหลายๆ อันอยู่บนแกนหมุน แกนหมุนลูกกลิ้งสำหรับทากาวนี้มีทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นวัสดุ ทากาวเป็นแนวขนานกับ

ความยาวของแผ่นวัสดุที่ส่งมาจากม้วน โดยทาทัง 2 ด้านตามแนวขนานกับแผ่นวัสดุ (ลักษณะ ลูกกลิ้งทากาวนี้คล้ายกับสิทธิบัตรวิธีการผลิตและเครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง 2,610,934 ที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้) แผ่นวัสดุที่ทากาวแล้วจะผ่านไปยังเตาอบ เพื่อให้กาวแห้งในระดับหนึ่ง ก่อนจะผ่านลูกกลิ้งไปยังลูกกลิ้งที่ติดใบมีด ตัดแผ่นวัสดุตามความยาวที่ต้องการ แล้ววางซ้อนกัน เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว

วิธีที่ 2 แตกต่างจากวิธีที่ 1 คือ เมื่อแผ่นวัสดุผ่านการทากาว และเตาอบแล้ว จะนำไปติดกับแผ่นวัสดุอีกแผ่นหนึ่งที่ไม่ได้ทากาว ก่อนที่จะนำไปตัดแล้วซ้อนเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว ส่วนวิธีที่ 3 แผ่นวัสดุ 2 แผ่นแยกกันผ่านลูกกลิ้งทากาว โดยทาแผ่นละด้าน ผ่านเข้าเตาอบแล้วนำมาติดกันก่อน แล้วจึงนำไปตัดและซ้อนเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว

ต่อมาในปี ค.ศ. 1961 บริษัท Hexcel Products Inc. จดสิทธิบัตรวิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No. 2,983,640) [2.15] โดยอ้างอิงถึงสิทธิบัตร US Patents No.2,610,934 และ US Patents No.2,734,843 ซึ่งในสิทธิบัตรนี้มีความแตกต่างจากเดิมในส่วน ของลักษณะการทากาว เปลี่ยนเป็นแบบตามขวางกับแผ่นวัสดุ เนื่องจากในวิธีการเดิมจะทากาว ขนานกับความยาวของแผ่นวัสดุ ซึ่งทำให้ขนาดของโครงสร้างรังผึ้งถูกจำกัด ด้วยความกว้างของแผ่น วัสดุ การเปลี่ยนแนวในการทากาวเป็นตามขวางนี้ มีผลให้โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีขนาดยาวได้ มากขึ้นไม่จำกัด นอกจากนี้ ในแนวยาวของแผ่นวัสดุนี้จะมีค่าความแข็งแรง ทั้งแบบเฉือนและ แบบโค้ง (Flexural) มากกว่าในแนวขวาง

ในสิทธิบัตรนี้ เสนอวิธีการทาแนวกาวโดยใช้ลูกกลิ้งทรงกระบอก มีความ ยาวเท่ากับความกว้างของแผ่นวัสดุ ลูกกลิ้งจะถูกเขาระ่องยาวไปตามความยาวของทรงกระบอก ความกว้างแต่ละร่องออกแบบให้สัมพันธ์กับระยะห่างของแนวกาว และขนาดเซลล์ที่ก่อการ ลูกกลิ้งนี้จุ่มอยู่ในถาดใส่กาว และหมุนเพื่อทากาวบนแผ่นวัสดุ จากนั้น ผ่านเข้าเตาอบ และตัดด้วย ลูกกลิ้งที่ติดใบมีด แล้วซ้อนติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว ส่วนวิธีในการทาแนวกาว และติดแผ่นวัสดุมี 3 วิธีเหมือนในสิทธิบัตรวิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.2,734,843) ที่ได้กล่าวถึงก่อนนี้

H. Freeman Seebo บริษัท Seeton Technologies จดสิทธิบัตรเครื่องมือและ วิธีสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.5,354,394) [2.16] ในปี ค.ศ. 1994 เครื่องมือใน การผลิตประกอบด้วยแกนให้ความร้อนที่มีเป็นรูปหกเหลี่ยมหลายๆ แท่งเชื่อมต่อกันบนแกนให้ ความร้อนเป็นแถวยาว โดยระหว่างแท่งเหล็กแต่ละอันจะมีระยะห่างเท่ากับด้านของหกเหลี่ยม ซึ่ง แถวของแท่งเหล็กหกเหลี่ยมนี้จะมีหลายๆ แถว เรียงกันเป็นชั้นๆ ในแถวที่ติดกันนั้น รูปหก เหลี่ยมจะถูกเรียงสลับกัน โดยหกเหลี่ยมจะอยู่ที่บริเวณที่ว่างของแถวด้านบน สลับกันไปเรื่อยๆ

ในแต่ละแถว แผ่นวัสดุที่จะผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งจะถูกนำมาใส่กันระหว่างแต่ละแถว จากนั้นแต่ละแถวจะถูกกดให้ติดกัน และให้ความร้อนผ่านแกนให้ความร้อน และไปสู่รูปหกเหลี่ยม แผ่นวัสดุในแต่ละแถวบริเวณที่ใกล้กันจะถูกเชื่อมติดกันด้วยความร้อน จะได้เป็นโครงสร้างรังผึ้ง โดยวัสดุที่ใช้จะต้องทนต่ออุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่น พรีเพล็ก เทอร์โมพลาสติก ไฟเบอร์กลาส และ โนเม็กซ์ เป็นต้น

Doyle G. Dixon (1995) บริษัท Hexcel Corporation จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยการเชื่อมติดด้วยความร้อน (US Patents No.5,421,935) [2.17] โดยเสนอวิธีและเครื่องสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งแผ่นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกแต่ละแผ่นจะถูกเชื่อมติดด้วยความร้อน เฉพาะแนวที่ต้องการเชื่อมติด ทีละชั้นซ้อนทับกันไปเรื่อยๆ เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สามารถผลิตด้วยวิธีนี้ได้แก่ โพลียูรีเทน ไวนิล โพลีพรอพิลีน และโพลิเอทิลีน เป็นต้น

วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ระยะเวลาหลังวิธีการผลิตมุ่งไปในด้านวิธีผลิตโครงสร้างรังผึ้งเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตตามขนาดที่ต้องการ และมีรูปทรงที่แม่นยำมากขึ้น ดังเช่น ในปี ค.ศ. 2003 Richard A. Lewis บริษัท Northrop Grumman Corporation จดสิทธิบัตร วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ประกอบแต่ง ชั้นสูง ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แม่นยำ สำหรับการประยุกต์ใช้กับยานอวกาศ (US Patents No.6,579,404) [2.18] ในสิทธิบัตรนี้ แผ่นวัสดุประกอบแต่งจะถูกใส่ในระหว่างแบบหล่อรูปครึ่งหกเหลี่ยมตัวผู้ และตัวเมีย เพื่อให้แผ่นวัสดุมีรูปทรงครึ่งหกเหลี่ยมที่แม่นยำ ก่อนที่จะนำไปเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้ง

Jean Pierre Maumus (2004) จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.6,830,718) [2.19] เสนอวิธีผลิตโครงสร้างรังผึ้งในสถานการณ์ขยายโครงสร้างรังผึ้งหลังการเชื่อมติดแล้ว โดยใช้หมุดที่ขยายตัวได้หลายๆ อัน ใส่ในแต่ละเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งขนาดของหมุดมีขนาดเล็กกว่าขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง และทำจากวัสดุที่เหมาะสมต่อการขยายตัว เช่น ซิลิโคน และโลหะ เป็นต้น โดยหมุดเหล่านี้จะถูกติดในลักษณะตั้งฉากอยู่บนแผ่นเรียบ เมื่อใส่หมุดเข้าไปในโครงสร้างรังผึ้งแล้ว หมุดจะถูกทำให้ขยายตัวออกด้วยความร้อนจนเต็มเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง และการขยายตัวของหมุดนี้ จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ผิวด้านในเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ทำให้ผิวเซลล์เรียบขึ้นด้วย

John Leslie Cawse บริษัท Hexcel Corporation จดสิทธิบัตรการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้งด้วยการเคลือบอนุภาค (US Patents No.6,117,518) [2.20] ปี ค.ศ. 2000 ปรับปรุงโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุที่ไม่ถักทอ เช่น กระดาษกราฟท์ ไฟเบอร์กลาส และคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น โดยเคลือบด้วยเรซินที่ประกอบด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งดิ่งของโครงสร้างรังผึ้ง โดยไม่ลดสมบัติด้านการอัด และไม่เพิ่มน้ำหนักของโครงสร้างรังผึ้ง

อนุภาคพอลิเมอร์ที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงแก่โครงสร้างรังผึ้งทำจากวัสดุประเภทเทอร์โมเซต และ/หรือ เทอร์โมพลาสติก เช่น โพลีเอเลฟิน โพลีเอไมด์ และโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น อนุภาคจะถูกผสมในเรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งในปริมาณ 0.1 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อนุภาคมีขนาดระหว่าง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร เรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งเป็นเรซินประเภทเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ อีพอกซี เป็นต้น

J.E. Shafizadeh and J.C. Seferis (2000) [2.21] ศึกษาขนาดของความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง หาตัวแปรความสัมพันธ์ขนาดของความทนแรงอัด ระหว่างโนเม็กซ์ที่ทำเป็นวงแหวน และโครงสร้างรังผึ้ง ใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารจุ่มเคลือบ โดยเปรียบเทียบฟีนอลิกเรซินเกรดการค้า ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1600 กรัมต่อโมล และฟีนอลิกเรซินแบบจำลอง ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 350 กรัมต่อโมล ทั้ง 2 ชนิดมีความหนืดประมาณ 2 – 3 เซนติสโตรก (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) สมบัติด้านแรงอัดถูกทดสอบ และพบว่าโครงสร้างที่ใช้ฟีนอลิกเรซินชนิดแบบจำลองมีค่าความทนแรงอัดมากกว่าชนิดการค้า นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งในฟีนอลิกเรซิน ทั้ง 2 ชนิด ความทนแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบ และไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจุ่มเคลือบเกิน 10 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 การพัฒนาพรีเพลกต์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ ข้อ 2.1.1)

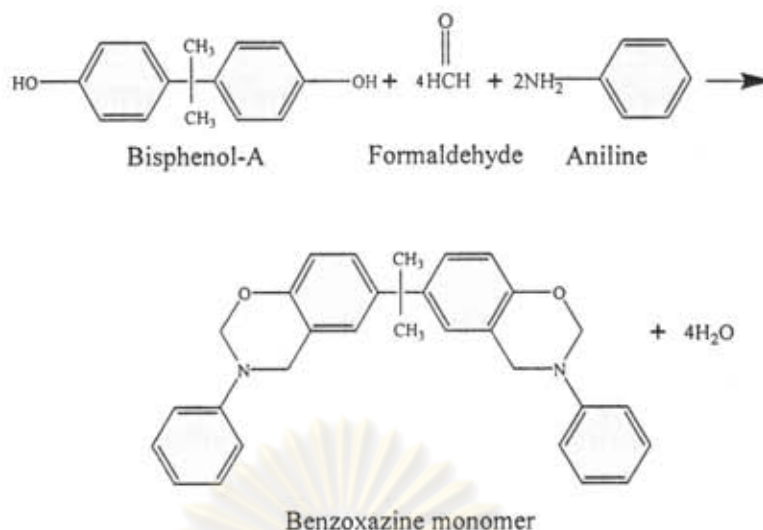
4.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. บิสฟีนอลเอ (Bisphenol-A) ในความอนุเคราะห์ของบริษัท ไทยพอลิคาร์บอเนต จำกัด (Thai Polycarbonate Co., Ltd.)
2. พาราฟอร์มัลดีไฮด์ (Para-formaldehyde) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Merck
3. อะนิลีน (Aniline) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท APS Finechem
4. ฟีนอล (Phenol) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Apec Chemical
5. สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) 37% จากบริษัท Apec Chemical
6. ออกซาลิกแอซิด (Oxalic Acid) จากบริษัท Suchapanpanit
7. อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) EPIKOTE 828-EL จากบริษัท East Asiatic (Thailand)
8. เส้นใยคาร์บอนชนิด Beslon HTA-N-6000 ในความอนุเคราะห์ของ Prof. Takeshi Kitano (retired) of AIST, Tsukuba, Japan
9. เส้นใยคาร์บอนชนิด Besflight HTA-12K-E30 ในความอนุเคราะห์ของบริษัท Cobra International
10. เส้นใยคาร์บอนชนิดผืนผ้า KN 100 จากบริษัท Asia Kangnam Company Limited (Thailand)

4.1.2 วิธีการทดลอง

4.1.2.1 การเตรียมเบนซอกซาซินเรซินชนิดใบฟังก์ชันนอล

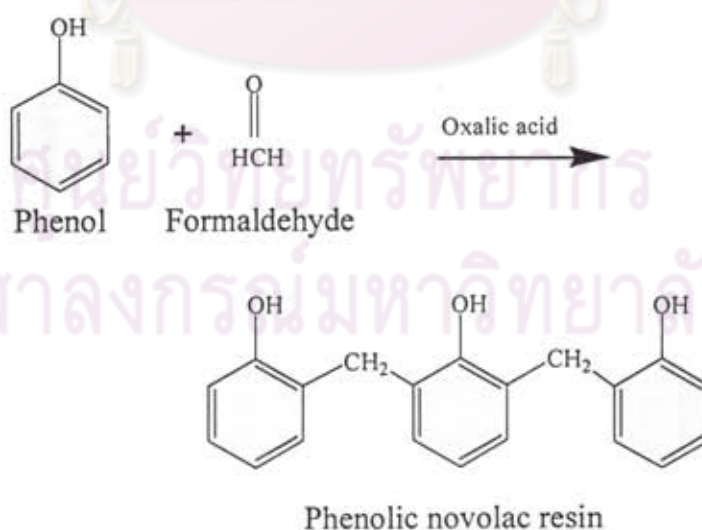
เบนซอกซาซินเรซิน สังเคราะห์จาก สารตั้งต้น บิสฟีนอลเอ พาราฟอร์มัลดีไฮด์ และ อะนิลีน ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยมวล โดยมีวิธีการสังเคราะห์ ตาม US Patent หมายเลข 5,543,516 โดยมีปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.1.1 เรซินที่ได้มีสีเหลืองใส มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการบดเรซินจนละเอียด นำไปเก็บใส่ขวดสะอาด และใส่ตู้เย็นเพื่อใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.1.1 ปฏิริยาการเตรียมเบนซอกซาซีนเรซินชนิดไบฟังก์ชันนอล (BA-a)

4.1.2.2 การเตรียมฟีนอลิกโนโวแลคเรซิน

ฟีนอลิกโนโวแลคเรซิน สังเคราะห์ได้จาก ปฏิริยาระหว่าง ฟีนอล และ ฟอรัลดีไฮด์ ในอัตราส่วน 1:12:1 โดยโมล โดยมี ออกซาลิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิริยามีสมการปฏิริยาดังรูปที่ 4.1.2 โดยมีวิธีการสังเคราะห์คือ นำสารตั้งต้นทั้งหมดควนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจะให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในเตาอบสูญญากาศ ลักษณะของฟีนอลิกเรซินที่ได้จะมีสีเหลืองอมส้ม มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.1.2 ปฏิริยาการเตรียมฟีนอลิกโนโวแลคเรซิน

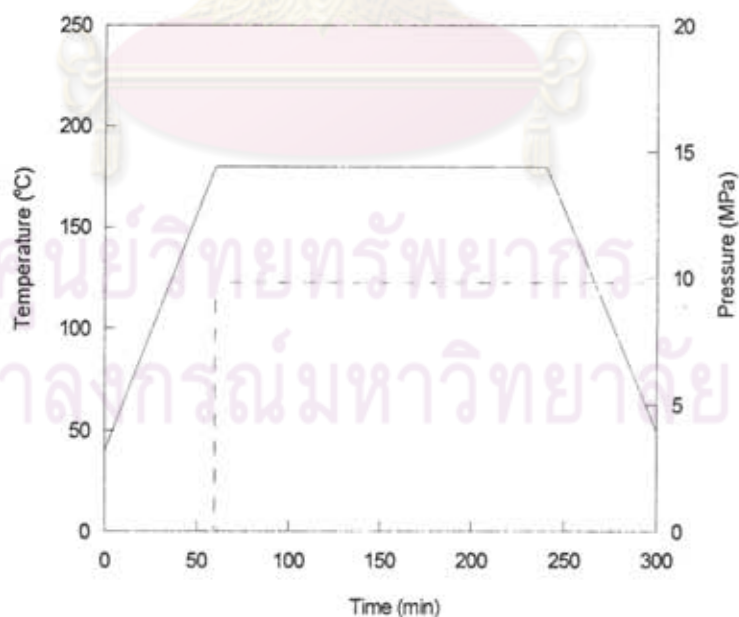
4.1.2.3 การเตรียมเรซินผสมระหว่าง เบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก (BEP เรซิน)

เรซินผสมสามารถเตรียมได้โดย ชั่งน้ำหนักของเรซินในแต่ละส่วนตามสัดส่วนที่ต้องการ จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียสจนจะกระทั่งเข้ากันเป็นเนื้อเดียว เรซินผสมสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้อง

4.1.2.4 การเตรียมวัสดุคอมโพสิต (Composite) เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตนั้นจะต้องนำเส้นใยคาร์บอนและเมตริกซ์เรซิน (BEP) ขึ้นรูปเป็นพรีเพลกส์ก่อน โดยสำหรับเส้นใยคาร์บอนที่ยังไม่ได้ทอนั้นจะนำมาขึ้นรูปโดยนำพันบนท่อทรงกระบอก หลังจากนั้นจะนำสารละลายเรซิน (50% ในเตตระไฮโดรฟูแรน, THF) อาบเส้นใยด้วยวิธีการทา เมื่อตัดเส้นใยออกจากท่อทรงกระบอก จะได้พรีเพลกส์ชนิดทางเดียว (Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Prepreg Tape) จากนั้นนำพรีเพลกส์ที่ได้ไปอบในเตาอบสุญญากาศ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายออก

วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการขึ้นรูปพรีเพลกส์ด้วยเครื่องขึ้นรูปขึ้นงาน (Hot Pressed in a Hydraulic Press) โดยตัดพรีเพลกส์ตามขนาดที่ต้องการ นำไปเรียงในทิศทาง $0^{\circ}/90^{\circ}$ สลับกันไปเรื่อยๆ จำนวนทั้งหมด 8 ชั้น นำไปให้ความร้อนและความดันที่ 180 องศาเซลเซียส และ 9.8 เมกะปาสกาล ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยลักษณะการขึ้นรูปขึ้นงานแสดงดังรูป



รูปที่ 4.1.3 การขึ้นรูปขึ้นงานวัสดุคอมโพสิต

4.1.2.5 การวัดความสามารถในการขึ้นรูปด้านการไหล

ความหนืดของเรซินผสมสามารถทดสอบด้วยเครื่อง Rheometer ของบริษัท Physica Parr รุ่น MCR300 โดยใช้หัววัดที่มีลักษณะเป็นแผ่นขนาน (Parallel Plate Geometry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 0.5 มม. เมื่อจะทำการวัดจะนำเรซินผสมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนมีลักษณะเป็นของเหลวใสและไม่มีฟองอากาศ จากนั้นเทเรซินผสมลงบนหัววัดด้านล่าง ทำการประกบหัววัดและเว้นให้มีระยะห่าง 0.5 มม. ทิ้งให้เรซินผสมมีอุณหภูมิตรงตามต้องการเป็นเวลา 1 นาที จึงเริ่มทำการทดลอง โดยทำการวัดความหนืดของเรซินผสมที่ 100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเฉือนที่ 1-1000 วินาที⁻¹

ช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปของเรซินผสมหาได้ด้วยการใช้ Oscillatory Shear Mode ทำการ Superposition ความถี่ โดยใช้ความถี่ ต่างๆ กัน เช่น 1, 3 และ 10 เรเดียน/วินาที โดยให้มีค่าแอมพลิจูดของความเครียดคงที่ (2.5%) อุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียส/นาที จากอุณหภูมิห้อง จนถึง จุดเจลของเรซินผสม

ระยะเวลาการเจลของเรซินผสมที่ไม่ขึ้นกับความถี่หาได้ด้วยเทคนิค $\tan \delta$ ด้วยเครื่อง Rheometer ของบริษัท Thermo Haake รุ่น RS600 โดยใช้หัววัดลักษณะเป็นแผ่นขนาน (Parallel Plate Geometry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60ม. ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 0.5 มม. ทำการ Superposition ความถี่ ด้วยความถี่แตกต่างกัน 5 ความถี่ ซึ่งแต่ละความถี่จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 เรเดียน/วินาที ด้วยอัตราความเค้นคงที่ (20 ปาสคาล) ระยะเวลาการเจลของเรซินผสมคือจุดตัดของ Loss Tangent ของแต่ละความถี่

4.1.2.6 การทดสอบด้วยเครื่อง DSC

อุณหภูมิการขึ้นรูปของเรซินผสมทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของบริษัท TA Instruments รุ่น 2910 ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบคือระหว่าง 30-300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่ม 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ปริมาณตัวอย่างในแต่ละการทดลองประมาณ 5-10 มิลลิกรัม อุณหภูมิการขึ้นรูป ระยะเวลาการขึ้นรูป และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วหาได้จากกราฟ

4.1.2.7 การทดสอบด้วยเครื่อง TGA

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม (Degradation temperature, T_d) และปริมาณเถ้าถ่าน (Char Yield) ของพอลิเมอร์ผสมทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท Mettler-Toledo ประเทศไทยจำกัด รุ่น TGA/SDTA 851° โดยสแกนอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 850 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่ละตัวอย่างจะมีน้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 15-20 มิลลิกรัม อุณหภูมิที่ทำให้

มวลหายไป 5 % จากเริ่มต้นจะเป็นอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และสำหรับน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่เหลืออยู่ที่ 800 องศาเซลเซียสจะเป็นปริมาณเด็ถ่านของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนนั้นๆ

4.1.2.8 การทดสอบค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีการแทนที่น้ำตามมาตรฐาน ASTM D 792-91 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นได้ตามสมการดังนี้

$$\rho = \left(\frac{A}{A - B} \right) \times \rho_0 \quad (1)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง (กรัม/ลบ.ซม.)
 A = น้ำหนักของตัวอย่างเมื่อชั่งในอากาศ (กรัม)
 B = น้ำหนักของตัวอย่างเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)
 ρ_0 = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (กรัม/ลบ.ซม.)

4.1.2.9 การหาค่าปริมาณเส้นใยที่มีอยู่ในตัวอย่าง

ตัวอย่างคอมโพสิตที่จะทำการทดลองจะต้องทำการหาค่าปริมาณเส้นใยคาร์บอน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการกฎการผสมดังนี้

$$V_f = (\rho_c - \rho_{resin}) / (\rho_{fiber} - \rho_{resin}) \quad (2)$$

เมื่อ V_f = ปริมาณเส้นใยที่มีอยู่ในวัสดุคอมโพสิต
 ρ_{fiber} = ความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอน = 1.76 กรัม/ลบ.ซม.
 ρ_{resin} = ความหนาแน่นของเมตริกซ์เรซิน
 ρ_c = ความหนาแน่นของตัวอย่างคอมโพสิต

4.1.2.10 การทดสอบสมบัติทางกล (ความสามารถในการดัดโค้ง)

โมดูลัสในการดัดโค้ง (Flexural Modulus) และ ความแข็งแรงในการดัดโค้งของวัสดุ (Flexural Strength) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล (Universal Testing Machine) จากบริษัท Instron Instrument รุ่น 5567 ใช้วิธีการทดสอบแบบ Three-point Bending ตามมาตรฐาน ASTM D 790M-93 โดยมีขนาดชิ้นงานคือ 50 มม. X 25 มม. X 1 มม. และสามารถคำนวณค่าได้ตามสมการดังนี้

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3)$$

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

- เมื่อ E_b = โมดูลัสในการดัดโค้ง, Flexural modulus (MPa)
 S = ความแข็งแรงในการดัดโค้ง, Flexural strength (MPa)
 P = แรงกระทำสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถรับได้ (N)
 L = ระยะของ Support span (mm)
 b = ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (mm)
 d = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm)
 m = ความชันของกราฟเมื่อ plot ระหว่าง แรงกับระยะ โค้งงอ (N/mm)

4.1.2.11 การตรวจสอบความสามารถในการยึดเกาะ

ความสามารถในการยึดเกาะของตัวอย่างทดสอบได้ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น ISM-5400 เพื่อตรวจสอบความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยคาร์บอนและเมตริกซ์เรซิน

4.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)

4.2.1 วัสดุและสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ โครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ประมาณ 10 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่นน้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะถูกผลิตโดยวิธีเชื่อมแบบใช้กาว และวิธีการผลิตแบบดึงขยาย ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งคือ โนเม็กซ์ และกาวที่ใช้คือ อีพอกซี เนื่องจากวัสดุที่ใช้ผลิตคือ โนเม็กซ์นั้นเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัว ดังนั้นจึงต้องเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ ด้วยการเคลือบฟีนอลิกเรซิน รายละเอียดของวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลองวิจัยมีดังนี้

1. โนเม็กซ์ ชนิด 410 ซึ่งผลิตโดยบริษัท DuPont® ความหนาของโนเม็กซ์ที่ใช้เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร น้ำหนัก 41 กรัมต่อตารางเมตร และความหนาแน่น 0.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [2.7]
2. อีพอกซีเรซิน ใช้แบบ 2 ส่วนผสมกัน เรซิน ชนิด YD582 และตัวทำแข็ง ชนิด TH7278 ทั้ง 2 ส่วนซื้อจากบริษัท ไทยอีพอกซี แอนด์ อัลทราดส์ โปรดักส์ จำกัด YD582 มีความหนืดต่ำ (1500 ± 200 cPs) เป็นอีพอกซีชนิดบิสฟีนอลเอที่ปรับปรุงแล้ว

(Modified bisphenol – A) TH7278 ได้จากเอมีนที่ปรับปรุงแล้ว (Modified amine) มีความหนืด 80 – 150 cPs อัตราส่วนผสมเรซินต่อตัวทำแข็งเท่ากับ 100 ต่อ 27 (โดยน้ำหนัก) [2.22]

3. ฟีนอลิกเรซิน แบบของเหลว ชนิด PL – 2211 ซึ่งจากบริษัท ไทยจีซีไอ จำกัด เป็นฟีนอลิกเรซินชนิดรีซอล มีปริมาณเรซิน (Resin contents) 58.99 % และความหนืด 161 เซนติพอยส์ [2.23]

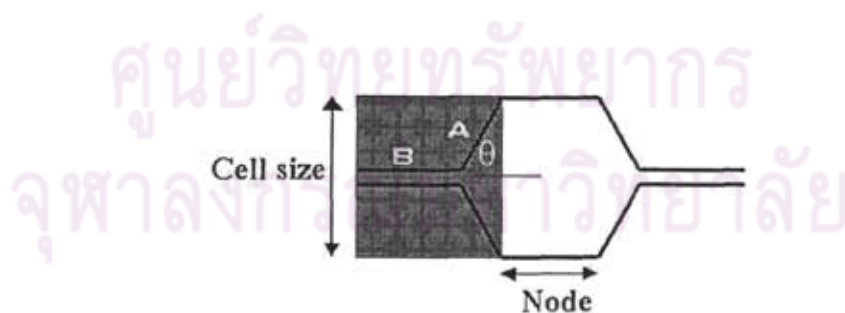
4. เอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ (99%) ใช้เป็นตัวทำละลายเพื่อปรับความหนืดของฟีนอลิกเรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้ง

4.2.2 วิธีการทดลอง

4.2.2.1 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว)

การออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องสำหรับทาแนวทากาวอีพ็อกซีลงบนแผ่นโนเม็กซ์สำหรับส่วนที่จะเชื่อมติด เพื่อผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การทาแนวทากาวในแนวขวางกับแผ่นโนเม็กซ์ เพื่อขจัดข้อจำกัดในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งขนาดต่างๆ การทาแนวทากาวบนโนเม็กซ์นั้นจะต้องมีระยะแนวทากาว สลับกับพื้นที่ว่าง ซึ่งจะกลายเป็นส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันในโครงสร้างรังผึ้ง แนวทากาวและพื้นที่ว่างจะสลับกันไปเรื่อยๆ ตามความยาวของแผ่นโนเม็กซ์

เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวประกอบด้วยลูกกลิ้ง 3 อัน ลูกกลิ้งอันกลางเป็นลูกกลิ้งเซาะร่อง ลูกกลิ้งเซาะร่องเป็นส่วนที่จะทำการทาแนวทากาวลงบนโนเม็กซ์ โดยลูกกลิ้งส่วนที่ไม่ถูกเซาะร่องจะเป็นส่วนที่ทาแนวทากาวลงบนโนเม็กซ์ และส่วนที่ไม่ถูกเซาะร่องคือ พื้นที่ว่างระหว่างแนวทากาว เนื่องจากขนาดของแนวทากาวสำหรับส่วนที่เชื่อมติดโครงสร้างรังผึ้ง มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ดังรูปที่ 4.2.1



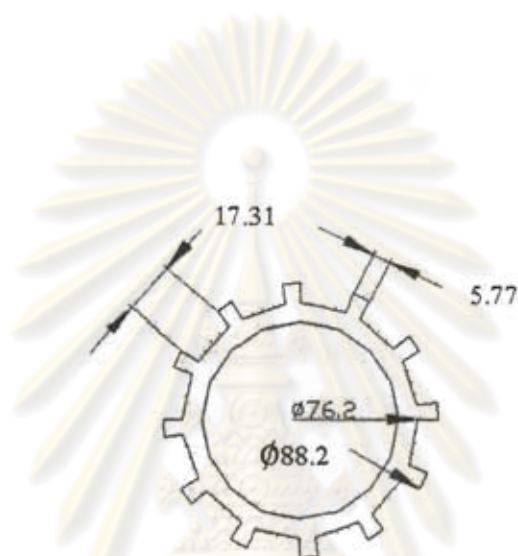
รูปที่ 4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่างๆ ของเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง

เมื่อกำหนดให้ ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมที่โค้ง ขยาย (θ) เท่ากับ 60 องศา ซึ่งทำให้ $A = B$ จะได้

$$2 A (\sin 60) = 10 \text{ มิลลิเมตร}$$

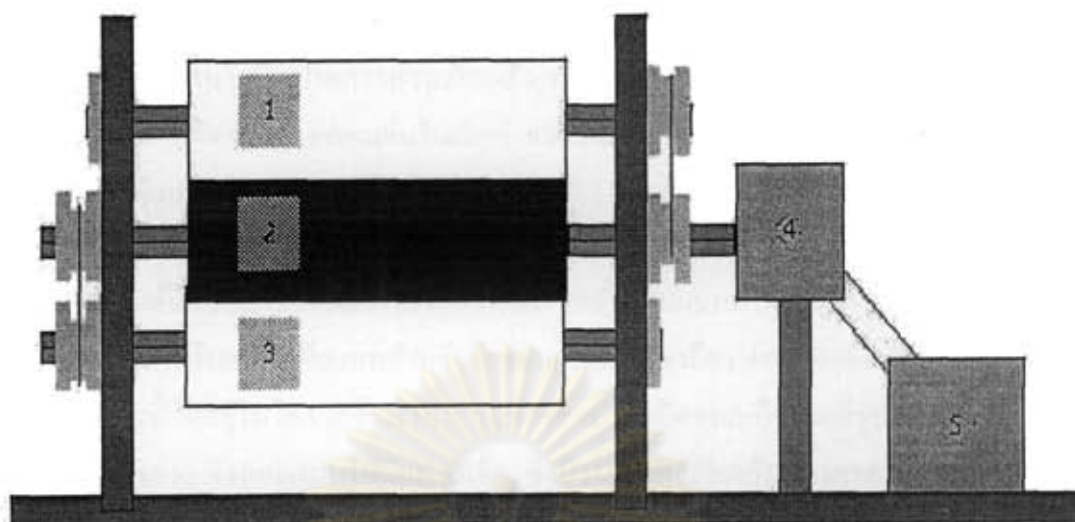
$$A = B = 5.77 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น แนวการมีความกว้าง เท่ากับ 5.77 มิลลิเมตร และส่วนที่เป็นพื้นที่ว่างมีค่าเป็น 3 เท่าของ แนวการ ซึ่งเท่ากับ 17.31 มิลลิเมตร ภาพตัดขวางของลูกกลิ้งเซาะร่องและค่าออกแบบแสดงดัง รูปที่ 4.2.2



รูปที่ 4.2.2 ภาพตัดขวางของลูกกลิ้งเซาะร่องและค่าออกแบบ (หน่วยมิลลิเมตร)

ส่วนลูกกลิ้งอันบนและล่าง ทำจากยางสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนลูกกลิ้งอันกลาง โดยผ่านเฟืองทดเพื่อลดความเร็วรอบ ลูกกลิ้งอันกลางขับเคลื่อนลูกกลิ้งอันบนและอันล่าง ผ่านสายพาน โดยลูกกลิ้งอันบนและอันล่างหมุนสลับทิศกับลูกกลิ้งอันกลาง แผนภาพแสดงลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว แสดงดังรูปที่ 4.2.3 และภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงในรูปที่ 4.2.4



รูปที่ 4.2.3 แผนภาพลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว (1.ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์อันบน 2. ลูกกลิ้งเซาะร่อง (ลูกกลิ้งอันกลาง) 3.ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์อันล่าง 4.เฟืองทด 5.มอเตอร์)



รูปที่ 4.2.4 ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

ในการใช้งานเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว แผ่นโนเม็กซ์จะถูกใส่ระหว่างลูกกลิ้งอันบน และลูกกลิ้งอันกลาง ส่วนลูกกลิ้งอันล่างจะจุ่มอยู่ในถาดใส่กาว เมื่อกาวถูกหมุนขึ้นมากับลูกกลิ้งอันล่าง ผ่านใบมีดปาดกาวส่วนเกินแล้ว กาวจะไปติดลูกกลิ้งอันกลาง เฉพาะส่วนที่ไม่ถูกเขาระรอง และไปติดด้านล่างของแผ่นโนเม็กซ์ จากนั้นแผ่นโนเม็กซ์จะถูกพลิกกลับด้านด้วยลูกกลิ้งอันบน ทำให้แนวกาวพลิกมาอยู่ด้านบน

4.2.2.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (เครื่องต้นแบบสำหรับดิ่งขยาย)

สำหรับเครื่องต้นแบบสำหรับดิ่งขยาย เป็นเครื่องมือง่ายๆ โดยมีหลักการคือ เพื่อที่จะขยายช่องว่างที่ปิดอยู่ในโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยาย ให้เปิดออกเป็นเซลล์รูปหกเหลี่ยม ดังนั้นวิธีการดิ่งขยาย จึงออกแบบให้มีแท่งเหล็ก ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแนวกาว ใส่อยู่ในช่องว่างระหว่างแนวกาวที่ด้านบนสุดทั้ง 2 ด้านของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยาย โดยแท่งเหล็กนี้จะถูกใส่ทุกๆ ช่องว่างด้านบน จากนั้นจะนำโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยายที่มีแท่งเหล็กใส่อยู่ ไปใส่ในเครื่องต้นแบบสำหรับดิ่งขยาย ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนเหล็ก 2 อัน เชื่อมติดกันด้วยสกรู ซึ่งทำให้แกนเหล็กทั้ง 2 อันนี้เคลื่อนที่เข้าและออกจากกันได้ ที่แกนเหล็กแต่ละอันจะมีเสาที่ปลายทั้ง 2 ด้านเชื่อมตั้งฉากกับแกนเหล็ก เสาที่ปลายทั้ง 2 ด้านนี้จะเป็นที่สำหรับยึดโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยายที่มีแท่งเหล็กใส่อยู่ ดังที่กล่าวถึงในตอนต้น เสาและโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้าน จะถูกยึดติดกันด้วยแท่งเหล็กอีกด้านละ 2 อัน ซึ่งวางในแนวตั้งฉากกับเสา (ขนานกับแกนเหล็กที่เชื่อมกับสกรู) เมื่อหมุนสกรูให้แกนเหล็กแยกออกจากกัน เสาและแท่งเหล็กที่ยึดโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้านอยู่ จะช่วยให้ช่องว่างในโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยายเปิดออก เป็นโครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม และดิ่งค้างไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงถอดแท่งเหล็กที่ใส่ในโครงสร้างรังผึ้งออก

4.2.2.3 การผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยาย

โครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยายถูกผลิตโดยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น แผ่นโนเม็กซ์ถูกตัดให้มีความกว้างเท่ากับ 11.43 เซนติเมตร ยาว 12 เมตร และอีพอกซีในส่วนของเรซิน 100 กรัม ผสมกับตัวทำแข็ง 27 กรัม ถูกใส่ในเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

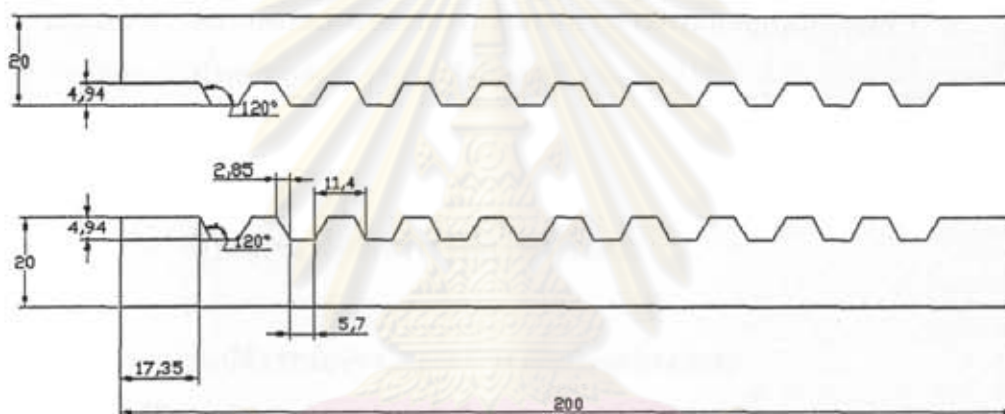
หลังจากทาแนวกาวด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว โนเม็กซ์ที่ทาแนวกาวแล้วถูกปล่อยให้ตัวทำละลายส่วนเกินระเหย ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นตัดแบ่งตามความยาว 20 15 และ 30 เซนติเมตร สำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิ่งขยาย 20 40 และ 14 ชั้น ตามลำดับ แผ่นโนเม็กซ์ที่ตัดแบ่งแล้วถูกวางซ้อนกัน โดยชั้นที่ติดกันแนวกาวจะถูกวางสลับกันห่างกัน 5.7 มิลลิเมตร แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว

4.2.2.4 การดัดขยายโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยายจะถูกตัดแบ่งตามความกว้าง ให้มีขนาด 12.7 มิลลิเมตร และถูกดัดขยายโดยใช้เครื่องดัดแบบสำหรับดัดขยาย ตามวิธีการที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.2.2

4.2.2.5 การเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการดัดขยายแล้ว พบว่าไม่มีความเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป จึงต้องอาศัยแบบหล่อและแท่งเหล็กหกเหลี่ยม เพื่อเพิ่มความเสถียรโดยวิธีการอบอ่อน (Annealing) ลักษณะแบบหล่อหกเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.2.5



รูปที่ 4.2.5 ลักษณะแบบหล่อหกเหลี่ยม

โครงสร้างรังผึ้งถูกใส่ในแบบหล่อและแท่งเหล็กหกเหลี่ยม และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงถอดแบบหล่อและแท่งเหล็กหกเหลี่ยมออก

4.2.2.6 การเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการอบอ่อนในแบบหล่อแล้ว จะถูกนำมาจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซิน ที่มีความเข้มข้น 25.28 % โดยน้ำหนัก และวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส 30 นาที การจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินนี้ทำ 1 2 และ 3 ครั้ง

4.2.2.7 การวัดขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง

ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งถูกวัดโดยใช้เวอร์เนีย วัดตามด้านกว้างของโครงสร้างรังผึ้งเป็นระยะเซลล์จำนวน 5 เซลล์ โดยการสุ่ม และหาค่าเฉลี่ย ขนาดเซลล์ได้จากการหารระยะเฉลี่ยที่วัดได้ด้วย 5

4.2.2.8 การวัดความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง

ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้หาได้จาก

$$HD = \frac{W_t \times 10^6}{L \times W \times T}$$

เมื่อ HD = ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

W_t = น้ำหนักของโครงสร้างรังผึ้ง (กรัม)

L = ด้านยาวของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

W = ด้านกว้างของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

T = ด้านสูงของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

4.2.2.9 การทดสอบสมบัติการบ่มของโครงสร้างรังผึ้งด้วยเครื่อง DSC

สมบัติการบ่มของโครงสร้างรังผึ้งถูกทดสอบโดย Differential scanning calorimeter รุ่น 2910 ด้วยโปรแกรม TA Instruments โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 30–300 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 5–10 กรัม ถูกทดสอบโดยวางในถาดอลูมิเนียมที่มีฝาปิด อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

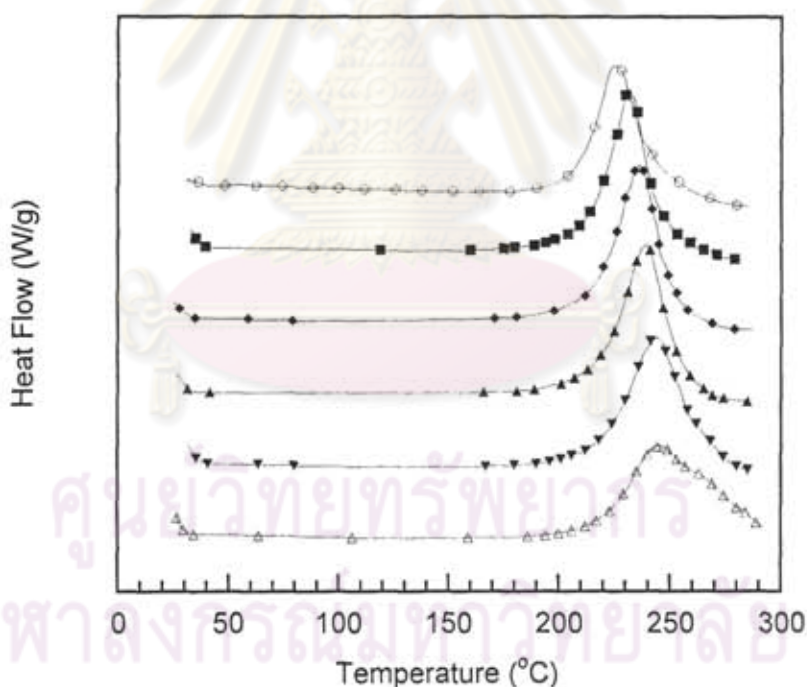
5. ผลการทดลอง

5.1 การพัฒนาพรีเพลกส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ ข้อ 2.1.1)

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของเมตริกซ์เรซิน

5.1.1.1 ความสามารถในการขึ้นรูปของเมตริกซ์เรซิน

ความสามารถด้านการขึ้นรูปของมอนอเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย เบนซอกซาซีน อีพอกซี และ ฟีนอลิกโนโวแลค สามารถพิจารณาได้จาก อุณหภูมิในการขึ้นรูป และความหนืดก่อนการขึ้นรูป เช่น ช่วงอุณหภูมิที่สามารถขึ้นรูปได้ ทั้งนี้ในการทดลองจึงเริ่มจากการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของมอนอเมอร์ผสมเพื่อนำมาใช้งานเป็นเมตริกซ์เรซิน โดยเริ่มทำการศึกษาจากสถานะการขึ้นรูปของเบนซอกซาซีนเรซิน (BA-a) และ มอนอเมอร์ผสมระหว่าง เบนซอกซาซีนและอีพอกซีเรซิน (B/E) ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซีที่ 9/1, 8/2, 7/3, 6/4, 5/5 โดยมวล ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.1 ซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง DSC ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-300 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

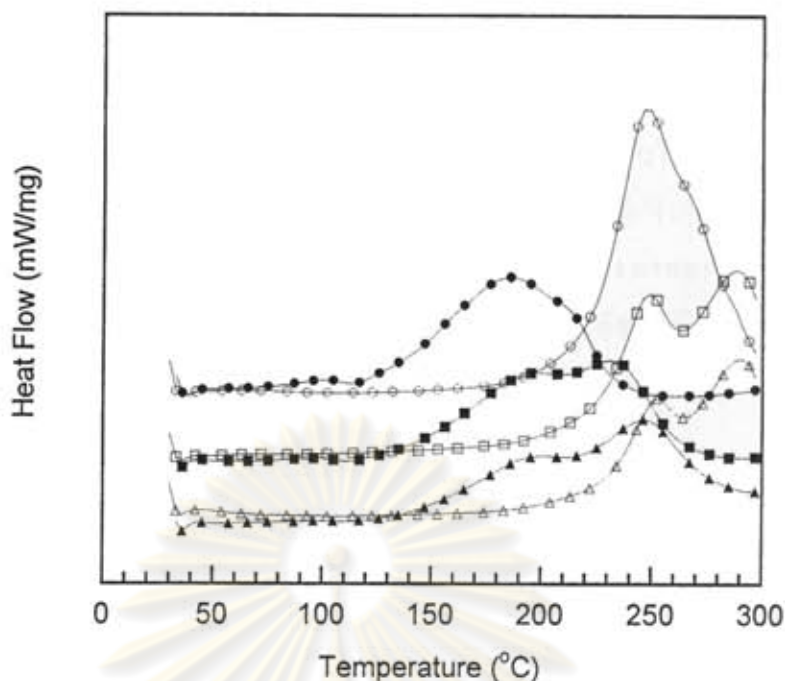


รูปที่ 5.1.1: DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซีที่อัตราส่วน ดังนี้: (O) BA-a, (■) B/E 9/1, (◆) B/E 8/2, (▲) B/E 7/3, (▼) B/E 6/4, (△) B/E 5/5

จากกราฟ เบนซอกซาซีนเรซินและมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซีเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลได้ด้วยความร้อนโดยไม่ต้องใช้

ตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นกราฟแสดงการคายความร้อนจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Curing Exotherm) ของทุกอัตราส่วนของมอนอเมอร์ผสม นอกจากนี้เมื่อปริมาณของอีพอกซีเพิ่มขึ้นจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของจุดสูงสุดของกราฟจากเบนซอกซาซีนเดิมไปยังอุณหภูมิมากขึ้น ตัวอย่างเช่น เบนซอกซาซีนเรซินมีจุดสูงสุดของกราฟอยู่ที่ 225 องศาเซลเซียส ในขณะที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี 5/5 มีจุดสูงสุดของกราฟอยู่ที่ 247 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณากราฟเรซินผสมจะเห็นถึงการแยกกันออกเป็นสองพีก (Peak) ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงน่าจะมีอย่างน้อยสองปฏิกิริยาคู่ด้วยกัน ปฏิกิริยาแรกเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งคาดว่าเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของเบนซอกซาซีนมอนอเมอร์ ปฏิกิริยาที่สองเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าซึ่งคาดว่าเป็นปฏิกิริยาระหว่างเบนซอกซาซีนเรซินและอีพอกซีเรซิน สมมุติฐานนี้สามารถสังเกตได้เมื่อปริมาณของอีพอกซีเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแยกของพีกชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี 5/5 มีอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาแรกอยู่ที่ 247 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาที่สองอยู่ที่ 270 องศาเซลเซียส ผลการทดลองนี้เป็นไปในทางเดียวกันจากงานวิจัยที่ผ่านมาของริมคูสิตและอิชิคะ [1.28-1.30] อย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นว่าจุดเริ่มต้นของพีกของมอนอเมอร์ผสมมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเริ่มต้นของพีกของเบนซอกซาซีนมอนอเมอร์ซึ่งหมายถึงมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซีเรซินจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่สูงกว่าเบนซอกซาซีนมอนอเมอร์ ดังนั้นมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีนและอีพอกซีเรซินอาจไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปของพรีเพลกต์ เนื่องจากพรีเพลกต์ที่ดีจะต้องสามารถเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลบางส่วน ("B-staging" step) ได้ที่อุณหภูมิระหว่าง 90-120 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1-15 นาที [1.33].

ในงานวิจัยที่ผ่านมาของริมคูสิตและอิชิคะ[1.28-1.30] การเติมฟีนอลิก โนโวแลคกลงไปในมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีนเรซินและอีพอกซีเรซิน จะสามารถลดอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลลงได้เนื่องจากฟีนอลิก โนโวแลคจะเป็นตัวช่วยเริ่มปฏิกิริยาการเปิดวงของเบนซอกซาซีนเรซิน ดังผลการทดลองที่แสดงในกราฟรูปที่ 5.1.2 โดยในการทดลองได้กำหนดให้อัตราส่วนเรซินผสมระหว่างเบนซอกซาซีนเรซินและอีพอกซีเรซิน มีอัตราส่วนโดยมวลเบนซอกซาซีน/อีพอกซี 1/1, 1/2, และ 1/3 จากนั้นเติมฟีนอลิก โนโวแลค ลงไปในมอนอเมอร์ผสมให้อัตราส่วนของเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค ที่อัตราส่วนโดยมวล 1/1/1, 1/2/1 และ 1/3/1 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1.2: DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี และเรซินผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลคที่อัตราส่วนดังนี้: (O) B/E 1/1, (●) B/E/P 1/1/1, (□) B/E 1/2, (■) B/E/P 1/2/1, (△) B/E 1/3, (▲) B/E/P 1/3/1.

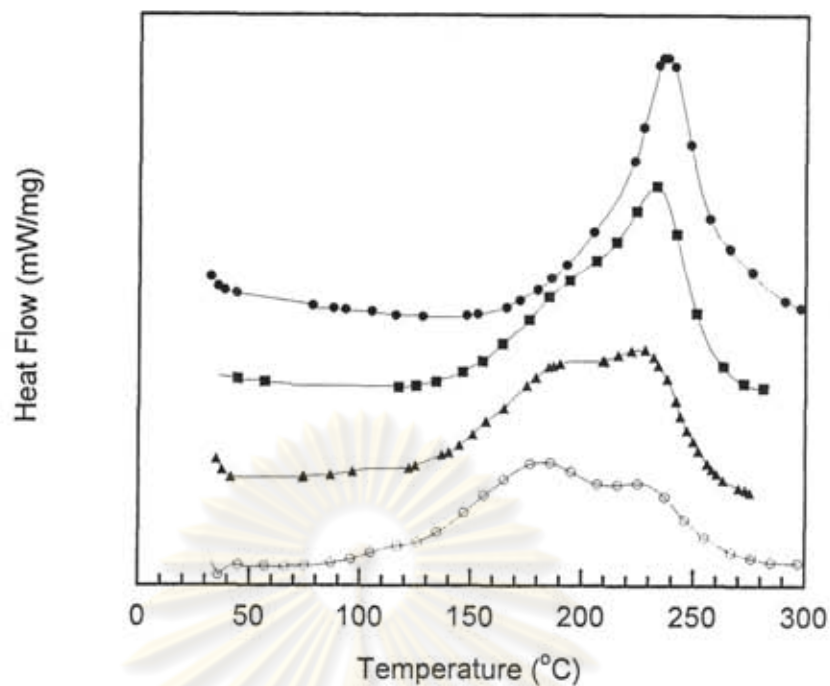
จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเติมฟีนอลิกโนโวแลคลงไป ในมอนอเมอร์ผสม มอนอเมอร์ผสมที่ได้จะมีอุณหภูมิของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลลดลง ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี 1/3 มีอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาแรกอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาที่สองอยู่ที่ 295 องศาเซลเซียส เมื่อเติมฟีนอลิกโนโวแลคให้มีอัตราส่วนเป็นเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค เป็น 1/3/1 มอนอเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาแรกอยู่ที่ 195 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาที่สองอยู่ที่ 245 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณากราฟของมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 1/1/1 เทียบกับอัตราส่วน 1/2/1 จะเห็นว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ใกล้ 100 องศาเซลเซียส) แสดงว่ามอนอเมอร์ผสมของเบนซอกซาซีน อีพอกซี และฟีนอลิกโนโวแลค สามารถเกิดปฏิกิริยาการบ่มได้ง่ายกว่าอัตราส่วนที่ทำการทดลองในกราฟรูปที่ 5.1.1

ทั้งนี้ในงานวิจัยของริมคูสิตและอิซิดะ ได้แสดงค่าความหนืดของมอนอเมอร์ผสมของเบนซอกซาซีน อีพอกซี และ ฟีนอลิกโนโวแลค ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Rheometer จากงานวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณของอีพอกซีเรซิน ในมอนอเมอร์ผสมมีค่า

มากกว่า 50 % โดยมวลจะช่วยลดความหนืดของมอนอเมอร์ผสมลงได้มาก (0.3 Pa.s ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 1/2/1) และมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 1/2/1 นี้ยังมีค่าความหนืดที่คงที่เมื่อเวลาผ่านไปถึง 1000 วินาที ในขณะที่ความหนืดของมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 1/1/1 มีความหนืดมากกว่า (7 Pa.s) และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ทำการทดลอง แต่ถ้ามีปริมาณของอีพอกซีมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสูงขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของอีพอกซีที่เหมาะสมคืออยู่ในช่วงระหว่าง 30%-60% โดยมวล

เมื่อคำนึงถึงความสามารถในการขึ้นรูปของเมตริกซ์เรซินเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำมาเป็นเมตริกซ์เรซินสำหรับพรีเพลกต์แล้ว เมตริกซ์เรซินจะต้องสามารถอบเส้นใยและแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้อย่างทั่วถึง เมตริกซ์เรซินที่สามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึงจะให้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ดี ซึ่งความสามารถในด้านการอบเส้นใยของเมตริกซ์เรซินนี้ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของเมตริกซ์เรซิน ในกระบวนการขึ้นรูปของพรีเพลกต์เป็นอย่างมาก เมตริกซ์เรซินที่มีความหนืดต่ำระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะสามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึงมากกว่าเมตริกซ์เรซินที่มีความหนืดสูง ดังนั้นเพื่อให้เมตริกซ์เรซินมีความหนืดที่เหมาะสมและสามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึง กระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนจึงจะต้องเพิ่มอุณหภูมิให้มากขึ้นเพื่อให้เมตริกซ์เรซินมีความหนืดต่ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความหนืดและอุณหภูมิในการขึ้นรูปแล้วจากทั้งการทดลองที่ผ่านมาและจากงานวิจัยของวิมคูตติและอิชิคะ เมตริกซ์เรซินที่สนใจศึกษาจึงเป็นเมตริกซ์เรซินที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ผสม เบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 1/2/1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซินต่ออีพอกซีเรซินที่ 1:2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

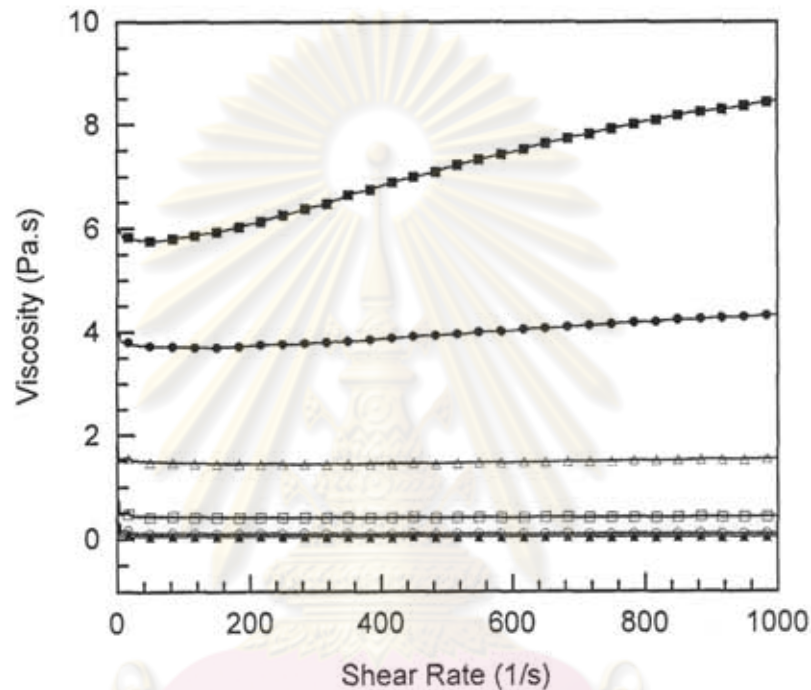


รูปที่ 5.1.3: DSC thermograms ของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนไวด์ที่อัตราส่วนดังนี้: (●) B/E/P 3/6/1, (■) B/E/P 3/6/2, (▲) B/E/P 3/6/3 (○) B/E/P 3/6/4.

กราฟรูปที่ 5.1.3 แสดงพฤติกรรมของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ผสม โดยในการทดลองจะทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีนต่ออีพอกซีเรซินที่ 1:2 ในขณะที่ปริมาณของอัตราส่วนของฟีนอลิกโนไวด์ในระบบเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนไวด์เป็น 3/6/1, 3/6/2, 3/6/3, และ 3/6/4 ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ 5.1.3 จะเห็นว่า เมื่อปริมาณของฟีนอลิกโนไวด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลจะมีอุณหภูมิลดลง เช่น ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนไวด์ 3/6/1 มีจุดสูงสุดของกราฟอยู่ที่ 240 องศาเซลเซียส ลดลงเป็น 222 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนไวด์ 3/6/4 นอกจากนี้จากกราฟจะเห็นว่าที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนไวด์ 3/6/3 และ 3/6/4 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งในวัสดุคอมโพสิตบางระบบเมตริกซ์เรซินจะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลบางส่วนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ได้วัสดุที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี พร้อมทั้งจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงต่อไป [1.7]

นอกจากอุณหภูมิต่ำแล้วความสามารถด้านการขึ้นรูปยังขึ้นอยู่กับความหนืดของเรซิน เช่น ในกระบวนการขึ้นรูปรีเพลกต์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแก่เมตริกซ์เรซิน เมตริกซ์เรซิน

จะต้องมีค่าความหนืดที่ต่ำและมีความหนืดที่ค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการ เพื่อให้อบเส้นใยได้อย่างทั่วถึง ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีไม่มีฟองอากาศในชิ้นงาน สามารถให้พรีเพล็กส์ที่มีอัตราส่วนระหว่างเมตริกซ์เรซินและเส้นใยสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น [1.7]. เมื่อทำการศึกษาค่าความหนืดของมอนอเมอร์ผสมในอัตราส่วนที่สนใจเปรียบเทียบกับค่าความหนืดของเบนซอกซาซินเรซิน โดยใช้เครื่อง Rheometer โดยวิธีการเพิ่มอัตราการให้แรงเฉือนตั้งแต่ 0.001-1000 1/s ในระยะเวลา 600 วินาที จะได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.1.4



รูปที่ 5.1.4 : ความหนืดของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวลแลคที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส: (O) B/E/P 3/6/0, (□) B/E/P 3/6/1, (Δ) B/E/P 3/6/2, (●) B/E/P 3/6/3, (■) B/E/P 3/6/4, (▲) EPOXY828.

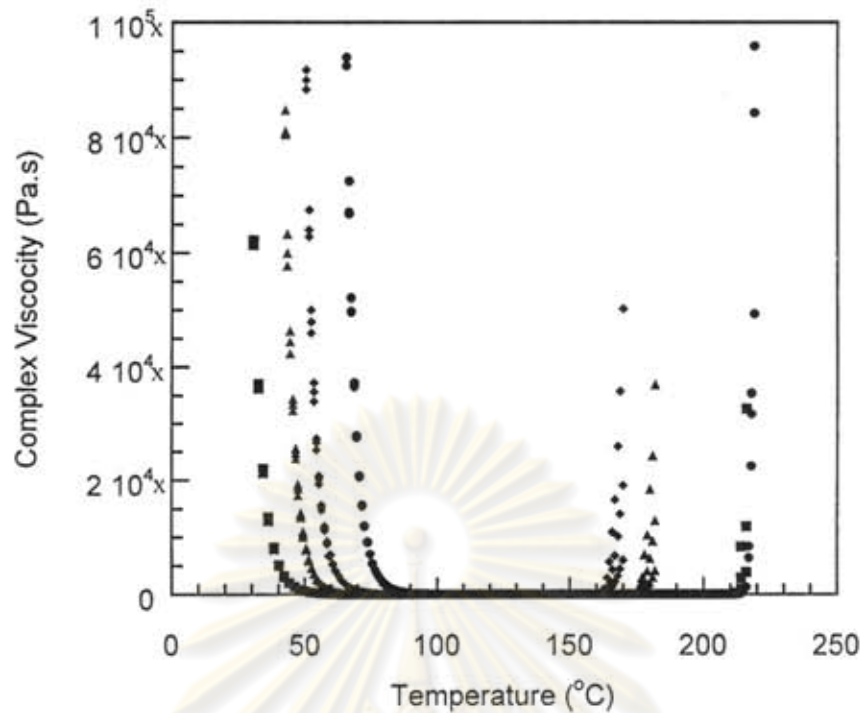
จากกราฟแสดงให้เห็นพฤติกรรมการไหลของมอนอเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มอนอเมอร์ผสมเกือบทุกอัตราส่วนจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของเหลวโมเลกุลต่ำ ทำให้สามารถสรุปได้ว่ามอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนที่แสดงพฤติกรรมการไหลเช่นนี้สามารถคงความเป็นมอนอเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำได้คือยังไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล แต่สำหรับมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวลแลค 3/6/4 จะมีพฤติกรรมการไหลที่ต่างออกไปจากอัตราส่วนอื่น โดยมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนนี้จะมีค่าความหนืดมากขึ้นเมื่อมีการให้อัตราการเฉือนที่มากขึ้นใน

ระหว่างการทดลอง แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาถึงค่าความหนืดของเมตริกซ์เรซินในแต่ละอัตราส่วนพบว่า เมื่อปริมาณของฟีนอลิก โนวาแลคมากขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณของอีพอกซีน้อยลงจะมีค่าความหนืดสูงขึ้น เช่น ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนวาแลค 3/6/1 จะมีค่าความหนืดอยู่ที่ 0.4 Pa.s และที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนวาแลค 3/6/3 มีค่าความหนืดอยู่ที่ 3.8 Pa.s

ในระหว่างการให้ความร้อนแก่เมตริกซ์เรซินจะมีสองพฤติกรรมที่แตกต่างกันเกิดขึ้น กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนืดของเมตริกซ์เรซินจะลดลงในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลไปพร้อมๆกัน ซึ่งจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลนี้จะมีผลทำให้ค่าความหนืดของเมตริกซ์เรซินสูงขึ้นทำให้เมตริกซ์เรซินแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่จำกัด ดังนั้นเมตริกซ์เรซินแต่ละชนิดจึงมีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความสำคัญมากที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของเมตริกซ์เรซินแต่ละชนิด เพื่อให้สามารถเลือกใช้อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปพรีเพลกต์ หรือขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตได้อย่างเหมาะสม ซึ่งช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบกับเบนซอกซาซินเรซินแสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



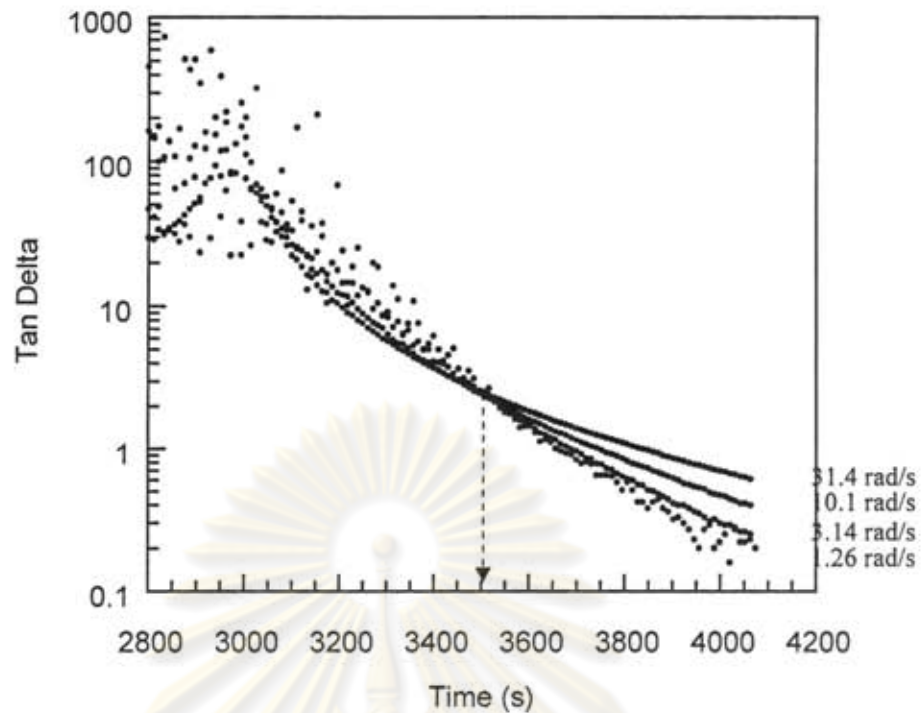
รูปที่ 5.1.5 : ช่วงการหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโว แลคที่อัตราการใช้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที: (●) BA-a, (■) B/E/P 3/6/1, (▲) B/E/P 3/6/2, (○) B/E/P 3/6/3

ในการทดลองมอนอเมอร์ผสมมีลักษณะตั้งแต่กึ่งของแข็งที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/1 จนเป็นของแข็งที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/3 ค่าความหนืด ไคนามิกและอุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณฟีนอลิกโนโวแลคมากขึ้น อุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของแต่ละอัตราส่วนคือ 35 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/1 3/6/2 และ 3/6/3 ตามลำดับ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมที่สนใจยังมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของเบนซอกซาซีนเรซิน (80 องศาเซลเซียส) ทั้งนี้การที่อุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมมีค่าน้อยกว่าเบนซอกซาซีนเรซินนั้นเนื่องมาจากอิทธิพลของอีพอกซีที่มีอยู่ในมอนอเมอร์ผสม ซึ่งอีพอกซีนีมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องในขณะที่เบนซอกซาซีนและฟีนอลิกโนโวแลคมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ในทางกลับกัน อุณหภูมิที่เกิดเจลของเรซินผสมมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อปริมาณของฟีนอลิกโนโวแลคมากขึ้น โดย เบนซอกซาซีนเรซินและมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/1 มีอุณหภูมิที่เกิดเจลใกล้เคียงกันที่ประมาณ 210 องศาเซลเซียส ในขณะที่มอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค

3/6/2 และ 3/6/3 มีอุณหภูมิที่เกิดเจลที่ประมาณ 180 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองให้การสนับสนุนกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง DSC คือเมื่อปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลคมากขึ้นจะช่วยลดอุณหภูมิการบ่มของมอนอเมอร์ผสมลง และจากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/4 และ 3/6/3 มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ค่อนข้างแคบเนื่องจากมีปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลคค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนที่มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่น่าจะเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพรีเพลกต์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนแล้ว อัตราส่วนที่เหมาะสม จึงน่าจะเป็นอัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลคที่ 3/6/1 และ 3/6/2

โดยทั่วไปขั้นตอนการ B-staging ของพรีเพลกต์ มีลักษณะที่สำคัญ คือ พรีเพลกต์จะต้องสามารถ B-stag ได้ภายในระยะเวลา 1 ถึง 15 นาที ซึ่งหมายความว่าเมตริกซ์เรซินที่เหมาะสมจะต้องสามารถเกิดเจลได้ในช่วงระยะเวลานั้นๆ ทั้งนี้โดยทั่วไปการศึกษาหาเวลาในการเกิดเจลของเมตริกซ์เรซินนิยมใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM D4473 ซึ่งเวลาในการเกิดเจลจะได้จากระยะเวลาที่เส้นกราฟของ Loss Modulus (G'') และ Storage Modulus (G') ตัดกัน ซึ่งก็คือเวลาที่ค่า Loss Modulus มีค่าเท่ากับ Storage Modulus อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการเจลที่หาได้จากวิธีการนี้เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ ทำให้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่ได้ไม่ใช่ค่าที่แท้จริง [1.32]. Holly et al. (1988) จึงได้นำเสนอวิธีการที่จะหาระยะเวลาในการเกิดเจลที่ไม่ขึ้นกับค่าความถี่ โดยเสนอวิธีการที่ใช้ค่าที่ได้จากการตัดกันของเส้นกราฟ $\tan\delta$ ที่หลายๆความถี่ ซึ่งจะได้ระยะเวลาในการเกิดเจลที่แท้จริง ทั้งนี้ลักษณะการตัดกันของเส้นกราฟ $\tan\delta$ ของความถี่ต่างๆของเรซินผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสแสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.6

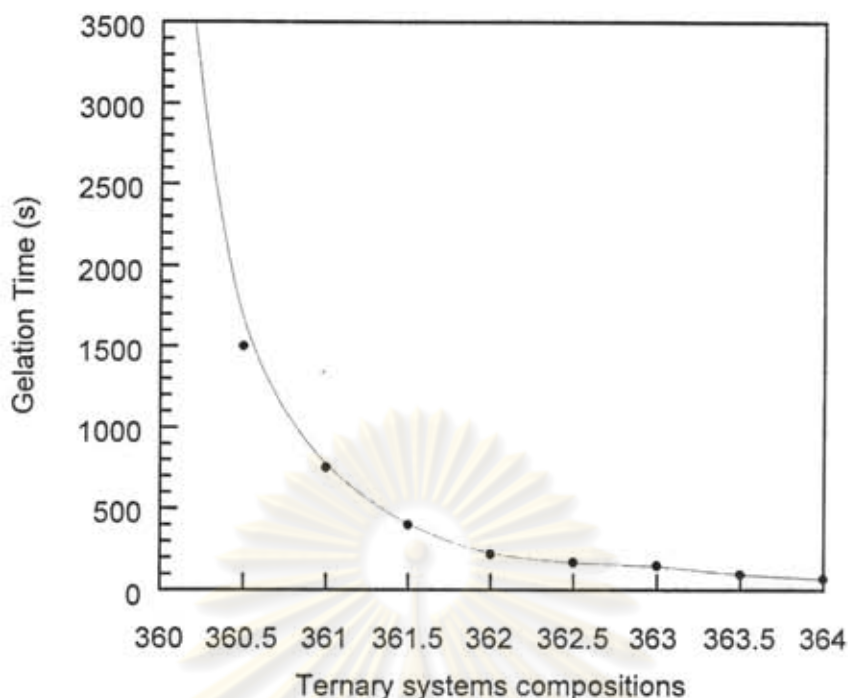
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1.6 : ระยะเวลาในการเจลมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโว
แลคที่อัตราส่วน 3/6/2 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

และเมื่อใช้วิธีการนี้ทดลองหาระยะเวลาในการเกิดเจลของมอนอเมอร์ผสมในแต่ละ
อัตราส่วน จะได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.1.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1.7 : ระยะเวลาในการเจลของมอนอเมอร์ผสมระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโว แลคที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

กราฟรูปที่ 5.1.7 แสดง ผลของปริมาณฟีนอลิก โนโวแลคที่มีต่อระยะเวลาในการเกิดเจล เพื่อความละเอียดของผลการทดลอง ในการทดลองจึงเพิ่มอัตราส่วนของฟีนอลิกทีละน้อย ดังนั้นอัตราส่วนของมอนอเมอร์ผสมที่ทำการทดลองจึงเป็นเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลคที่ 3/6/0, 3/6/0.5, 3/6/1, 3/6/1.5, 3/6/2, 3/6/2.5, 3/6/3, 3/6/3.5, และ 3/6/4 ตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลองคือ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จะใช้ในการขึ้นรูปพรีเพลกต์เป็นวัสดุคอมโพสิตต่อไป จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลคเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการเกิดเจลจะลดลง การลดลงของระยะเวลาในการเกิดเจลนี้จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล และมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/0 ไม่มีลักษณะการเกิดเจลที่อุณหภูมินี้ในระยะเวลาที่ทำการทดลอง

จากผลการทดลองที่เกี่ยวกับความสามารถในการขึ้นรูป สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลคที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเมตริกซ์เรซินของพรีเพลกต์ คือ มอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 ซึ่งมีอุณหภูมิการบ่มที่ไม่สูงมาก ให้ค่าความหนืดต่ำ สามารถคงความหนืดต่ำได้เป็นเวลานาน มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ค่อนข้างกว้าง (50 - 200 องศาเซลเซียส) และมีเปอร์เซ็นต์การ

เปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ที่จุดเจลเท่ากับ 35% ซึ่งอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ของอีพอกซี (22-35% [1.30])

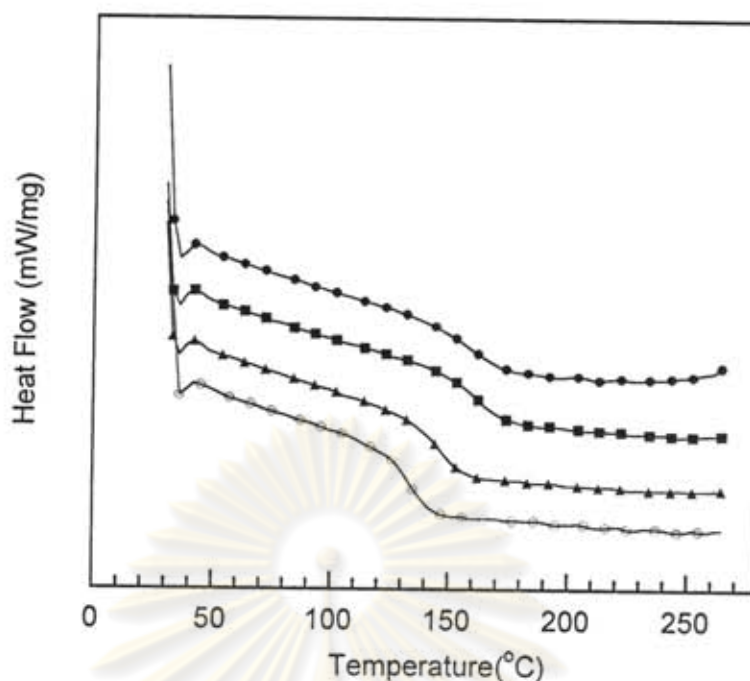
5.1.2 สมบัติหลังการขึ้นรูปของพอลิเมอร์อัลลอยด์

จากงานวิจัยของริมดุสิตและอิชิเดะ [1.28-1.30] ซึ่งทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณอีพอกซีและฟีนอลิก โนโวแลคที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์ โดยใช้อีพอกซีเรซินชนิด EPON825 จากการศึกษาพบว่าเมื่ออีพอกซีเรซินมีปริมาณน้อยกว่า 60% โดยน้ำหนัก ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างเรซินทั้งสามชนิด และการที่พอลิเมอร์อัลลอยด์ มีปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลคมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงเนื่องจากปริมาณของสายโซ่ที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงมีปริมาณมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน การที่พอลิเมอร์อัลลอยด์ มีปริมาณของอีพอกซีมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณของอีพอกซีที่ไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์อัลลอยด์ ที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน ดังตารางที่ 5.1.1 และกราฟรูปที่ 5.1.8

ตารางที่ 5.1.1: อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่สภาวะการบ่มต่างๆ

Resins	DSC $T_{g,s}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Air-cured $T_{g,s}$ at curing condition	
		180 $^{\circ}\text{C}$ 3 hour	180 $^{\circ}\text{C}$ 3 hour + 200 $^{\circ}\text{C}$ 2 hour
BA-a	139	-	-
BEP361	130	143	160
BEP362	136	157	165
BEP363	123	136	147
BEP364	126	129	135

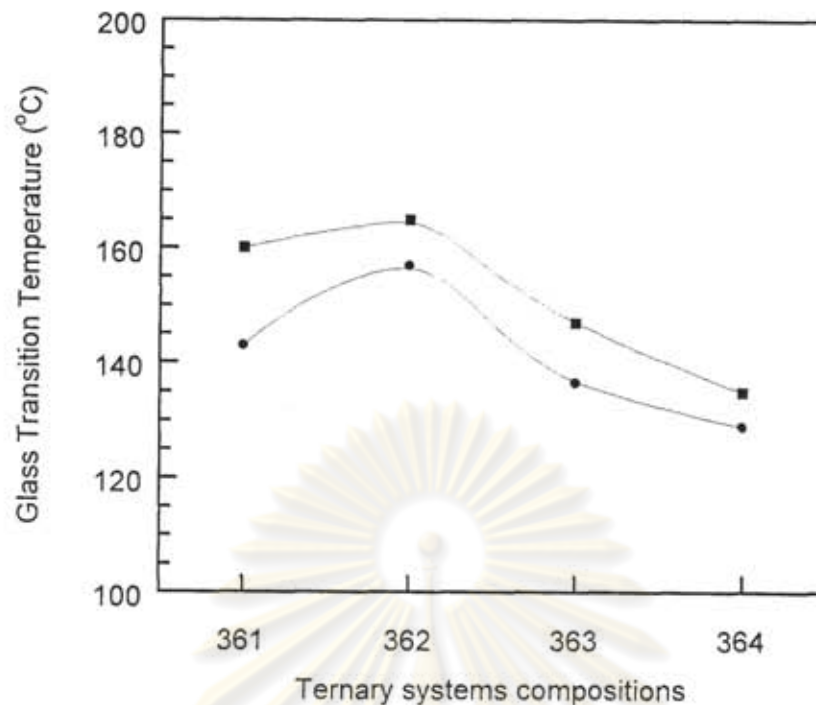
* Ref.: Rimdusit S. and Ishida H. Synergism and multiple mechanical relaxation observed in ternary systems based on benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 38 (2000): 1687.



รูปที่ 5.1.8: อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อีพอกซีที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค: (●) B/E/P 3/6/1, (■) B/E/P 3/6/2, (▲) B/E/P 3/6/3 (○) B/E/P 3/6/4

จากตารางและกราฟจะเห็นว่าที่อัตราส่วนเรซินที่ทำการทดลองพอลิเมอร์อีพอกซีที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 เนื่องจากอัตราส่วนของพอลิเมอร์อีพอกซีนี้มีปริมาณของอีพอกซีและฟีนอลิกโนโวแลคที่เหมาะสมซึ่งให้ปริมาณการเชื่อมโยงที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น และจากกราฟรูปที่ 8 จะเห็นว่ากราฟจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของเรซินทั้งสามชนิด และเมื่อพิจารณาผลของสภาวะการบ่มที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วดังกราฟรูปที่ 5.1.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1.9: อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่สภาวะการบ่ม: (●) 180 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง, (■) 180 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง + 200 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง

จากกราฟจะเห็นว่าที่สภาวะการบ่มที่ทำการทดลองพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 ให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่มากที่สุด

นอกจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแล้วค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน Degradation temperature (T_d) ยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับวัสดุคอมโพสิตที่จะนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนนี้สามารถหาได้ด้วยเครื่อง Thermogravimetry (TGA) ซึ่งจะเป็นการวัดน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่สนใจนี้ เป็นอุณหภูมิที่น้ำหนักของตัวอย่างหายไป 5% จากน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งกราฟแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นกราฟ TGA ที่ได้จากพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงนำมาทดลองด้วยเครื่อง TGA โดยมีอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์อัลลอยด์ในระบบที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นแสดงดังตารางที่ 5.1.2

ตารางที่ 5.1.2 : การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเบนซอกซาซีน พอลิเมอร์อัลลอยด์ เปรียบเทียบกับอีพอกซี และฟีนอลิกทั่วไป

Resins	Degradation Temperature (°C)		Char Yield (%)
	5% weight loss	10% weight loss	
BEP361	382	393	24.8
BEP362	378	389	29.6
BEP363	373	388	32.1
BEP364	372	385	34.0
BA-a ¹	334	355	25.0
BA-35X ²	352	-	30.0
Epoxy ¹	-	-	10.5
Phenolic ¹	-	-	55.0

¹ Ref.: Kampangsaeree N. Development of Fire resistant Wood-substituted Composites from Polybenzoxazine Alloys, Master's degree. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2004.

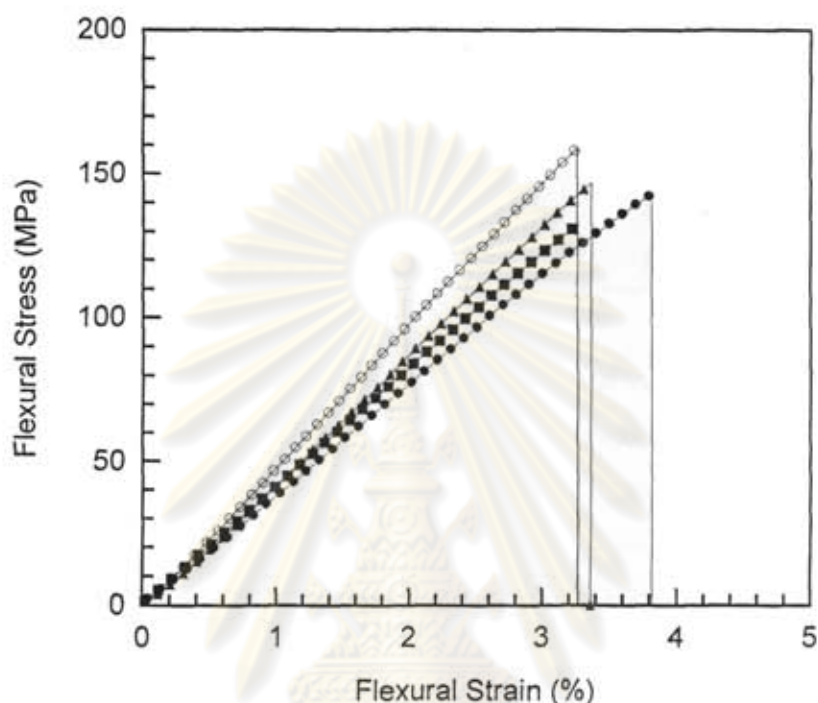
² Ref.: Ishida H. and Chaisuwan T. Mechanical property improvement of Carbon fiber reinforce polybenzoxazine by rubber interlayer. Polym. Compos. 24 (2003): 597-607.

³ Ref.: Rimdusit S. and Ishida H. Synergism and multiple mechanical relaxation observed in ternary systems based on benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. J. Polym. Sci. Pol. Phy. 38 (2000): 1687.

จากตารางพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่ทุกอัตราส่วนที่สนใจศึกษามีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ประมาณ 370-380 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเบนซอกซาซีนเรซินชนิด BA-a (334 องศาเซลเซียส) และเบนซอกซาซีนเรซินชนิด BA-35X (352 องศาเซลเซียส) [1.13] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลที่มากขึ้นเมื่อมีอีพอกซีเรซินในระบบนอกจากนี้จะเห็นว่าปริมาณของเถ้าถ่าน(Char Yield (%)) ของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะไนโตรเจนมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณของฟีนอลิกโนโวแลคเพิ่มขึ้นเนื่องจากฟีนอลิกโนโวแลคมีปริมาณความเป็นเถ้าถ่านมากกว่า (55%) ในขณะที่เบนซอกซาซีนเรซิน และฟีนอลิกโนโวแลคเรซินมีปริมาณความเป็นเถ้าถ่านที่น้อยกว่า คือ 25-30 %

และ 10 % ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของพีนอลิกโนโวแลคมีวงเบนซีน
น้อยมาก

ความสามารถในการดัดโค้งของพอลิเมอร์อัลลอยด์แสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.10
และ ตารางที่ 5.1.3



รูปที่ 5.1.10: Flexural stress & strain ของพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีน/
อีพอกซี/พีนอลิกโนโวแลค: (●) B/E/P 3/6/1, (■) B/E/P 3/6/2, (▲) B/E/P 3/6/3 ,
(○) B/E/P 3/6/4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1.3: ความสามารถในการดัดโค้งของพอลิเมอร์อัลลอยด์

Composition	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)
BA-a ¹	117	4.27
BEP361	141.5± 2.2	3.8±0.2
BEP362	134.7± 3.3	4.2±0.0
BEP363	145.0± 2.7	4.5± 0.1
BEP364	158.6± 0.1	5.0± 0.1
Epoxy828 ²	145	3.86
Phenolic ³	-	3.8

¹ Ref.: Rimdusit S., Pirstpindvong S., Tanthapanichakoon W., and Damrongsakkul S. Toughening of polybenzoxazine by alloying with urethane prepolymer and flexible epoxy: a comparative study. *Polym. Eng. and Sci.* 45 (2005): 288-297.

² Ref.: www.resins.com, 2001 Resolution Performance Products.

³ Ref.: Ishida H. and Allen D.J. Physical and mechanical characterization of near-zero shrinkage polybenzoxazines. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 34 (1996) 1019-1030.

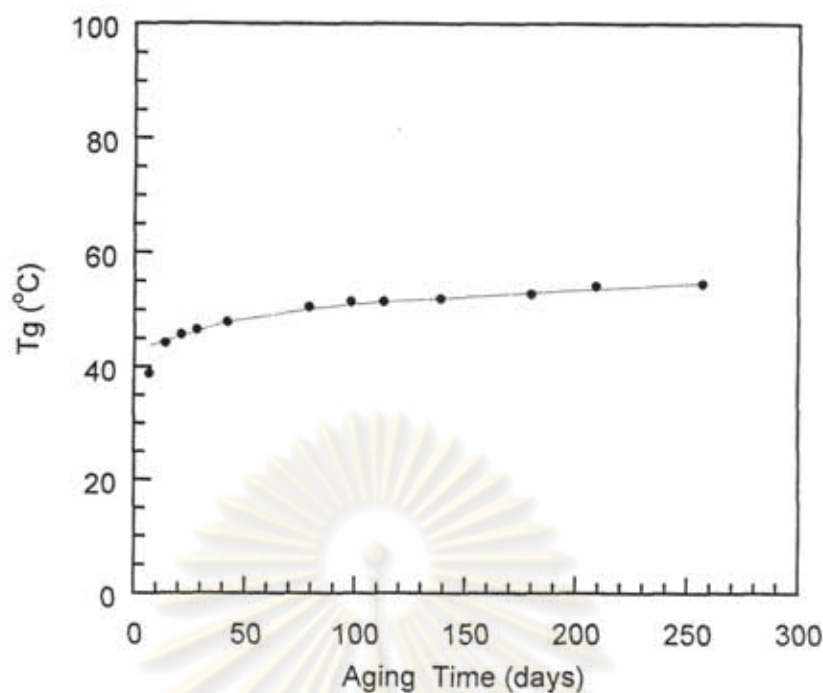
จากตารางจะเห็นว่าค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งของพอลิเมอร์อัลลอยด์มีค่ามากกว่าพอลิเบนซอกซาซีนและอีพอกซีเรซินทุกๆ ไป ซึ่งอีพอกซีโดยทั่วไปจะให้ค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งที่ประมาณ 110 ถึง 145 เมกกะปาสกาล ขึ้นอยู่กับชนิดของสารบ่ม จากกราฟการเพิ่มปริมาณของอีพอกซีเรซินจะทำให้พอลิเมอร์อัลลอยด์มีระยะของการดัดโค้งที่มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน มีความยืดหยุ่นมากกว่าเรซินอีกสองชนิดที่เหลือ สำหรับมอดูลัสในการดัดโค้งนั้น เมื่อปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลกเพิ่มขึ้น มอดูลัสในการดัดโค้งของพอลิเมอร์อัลลอยด์ก็มีค่ามากขึ้น ทั้งที่เมื่อปริมาณของฟีนอลิก โนโวแลกมากขึ้นทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลลดลง ซึ่งในความเป็นจริงปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลไม่ได้เป็นเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์อัลลอยด์ ดังนั้นถึงแม้ว่าพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลก 3/6/3 และ 3/6/4 จะมีปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลต่ำกว่าพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนอื่น แต่ให้ค่ามอดูลัสของการดัดโค้งที่สูงเนื่องจากฟีนอลิกที่เหลือจะอยู่ในพอลิเมอร์อัลลอยด์จะมีแรงระหว่างขั้วของไฮโดรเจนซึ่งทำให้พอลิเมอร์อัลลอยด์มีความแข็งแรงมากขึ้นได้[1.22]

5.1.3 ความสามารถในการเก็บรักษาของเมตริกซ์เรซิน

การเก็บรักษามอนอเมอร์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้น พฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า การเกิดการบ่มทางเคมี (Chemical Aging) การบ่มทางเคมีนี้จะทำให้มอนอเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอย่างถาวรและจะทำให้เกิดผลกระทบบางอย่างต่อสมบัติของมอนอเมอร์ เช่น ความหนืดสูงขึ้น ลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา และ ลดความสามารถในการขึ้นรูป ดังนั้นในการเก็บรักษาพรีเพลกส์จึงจะต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า -20 องศาเซลเซียส) เพื่อให้มั่นใจว่าเมื่อนำพรีเพลกส์มาใช้งานพรีเพลกส์จะยังคงมีความสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Frigione และ Kenny [1.5] แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาพรีเพลกส์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานแม้จะลดความสามารถในการขึ้นรูปและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของพรีเพลกส์ลง แต่พรีเพลกส์ยังคงมีความสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ได้

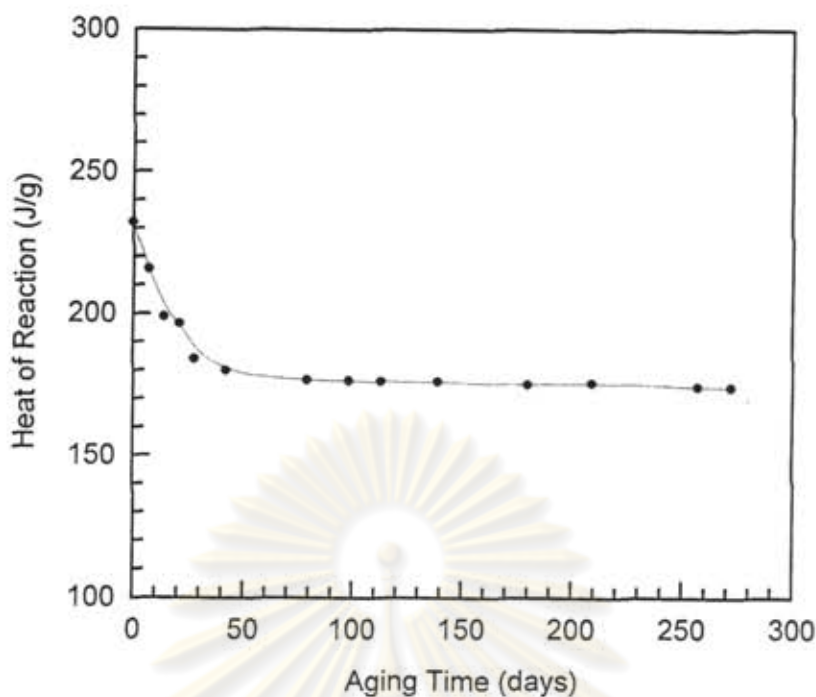
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสามารถในการเก็บรักษาของมอนอเมอร์ผสมที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมอนอเมอร์ผสมที่สนใจที่จะทำการศึกษาคือมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 เนื่องจากมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนนี้ได้แสดงความสามารถในด้านต่างๆ เช่น มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี มีความหนืดที่ต่ำและคงที่เป็นระยะเวลาาน ทำให้สามารถอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึง มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่เหมาะสม มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงกว่าเรซินผสมชนิดอื่น ให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และปริมาณเถ้าถ่านที่ดี

การทดลองทำโดยนำมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (Desiccators) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งตัวอย่างของมอนอเมอร์ผสมจะถูกเก็บมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ที่เวลาต่างๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ผสม ผลการทดลองแสดงแสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.11 และรูปที่ 5.1.12 โดยกราฟรูปที่ 5.1.11 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์ เมื่อทำการเก็บรักษามอนอเมอร์ผสมไว้ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.1.11: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2

เมื่อทำการเก็บรักษามอนอเมอร์ผสมไว้ที่อุณหภูมิห้องมอนอเมอร์ผสมจะแข็งขึ้นเรื่อยๆ พฤติกรรมนี้แสดงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์ที่มีสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์นี้จะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการขึ้นรูปของเมตริกซ์เรซิน โดยในกระบวนการขึ้นรูปจะต้องให้ความร้อน จนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์จึงจะสามารถหลอมมอนอเมอร์ให้สามารถใช้งานได้ จากกราฟจะเห็นว่า ในระยะแรกอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเก็บรักษา แต่เมื่อผ่านไปเป็นเวลา 1 เดือนอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย พฤติกรรมเช่นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกราฟรูปที่ 5.1.12 ซึ่งแสดงความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ในขั้นตอนการพอลิเมอไรเซชัน



รูปที่ 5.1.12: การเปลี่ยนแปลงของความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลจะลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก การบ่มทางเคมีที่เกิดขึ้นจะทำให้มอนอเมอร์เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลมีปริมาณลดลง และการที่มอนอเมอร์เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลไปนี้จะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์สูงขึ้นกว่ามอนอเมอร์เดิมด้วย อย่างไรก็ตามการเก็บรักษามอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 ไว้ที่อุณหภูมิห้องนั้นจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของทั้งความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์เพียงเล็กน้อย โดยมอนอเมอร์ผสมที่เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 9 เดือนสามารถคำนวณความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลได้ประมาณ 175 จูล/กรัม ในขณะที่มอนอเมอร์ผสมเดิมมีค่าความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลประมาณ 232 จูล/กรัม ซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์แล้วจะอยู่ที่ 24 เปอร์เซ็นต์ มีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ที่จุดเจล (35 เปอร์เซ็นต์) และน้อยกว่าระบบอีพอกซีที่ศึกษาโดย Frigione และ Kenny (35 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลา 5 เดือน) ดังนั้นจะเห็นว่ามอนอเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 ยังคงสามารถรักษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา และความสามารถในการขึ้นรูปเอาไว้ได้แม้จะเก็บรักษาไว้ที่

อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน นอกจากนี้การใช้งานของมอนอเมอร์ผสมที่เก็บรักษาไว้ยังสามารถนำมาใช้งานได้เพียงแค่นี้ให้ความร้อนให้มีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอนอเมอร์

5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต

Jang และคณะ [1.18] ใช้วิธีปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยให้เหมาะสมเพื่อพัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงและมีเบนซอกซาซีนเรซินชนิด BA-a เป็นเมตริกซ์เรซิน การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยทำได้ด้วย 2 วิธีด้วยกัน คือ ออกซิเจนพลาสมา และการออกซิเดชันด้วยกรดไนตริก จากการศึกษา ทั้ง 2 วิธีสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตได้เนื่องจากทำให้เส้นใยและเมตริกซ์เรซินสามารถยึดเกาะกัน ได้มากขึ้น นอกจากนี้อิซิดะ และซึสุวระณ [1.13] ได้เสนอวิธีที่จะพัฒนาสมบัติทางกลวิธีใหม่โดยการเคลือบยางไว้บนพื้นผิวของเส้นใยเพื่อเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์เรซิน โดยศึกษาการพัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงและมีเบนซอกซาซีนเรซินชนิด BA 35X เป็นเมตริกซ์เรซิน จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของยาง ATBN ที่เหมาะสมจะให้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ใช้อีพอกซีชนิดดัดแปร ฟีนอลิกชนิดดัดแปร และเบนซอกซาซีนชนิด BA-a ดัดแปร เป็นเมตริกซ์เรซิน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาเรซินผสมในอัตราส่วนที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แสดงสมบัติที่ดี ทั้งความสามารถ ด้านการขึ้นรูปของมอนอเมอร์ เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษา สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เมตริกซ์เรซินที่ศึกษาเป็นเมตริกซ์เรซิน ซึ่งผลการทดลองด้านสมบัติด้านการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงและมีเรซินผสมเป็นเมตริกซ์เรซินแสดงในตารางที่ 5.1.4 โดยใช้เส้นใยคาร์บอน 2 ชนิดด้วยกัน คือ beslon HTA-N-6000 และ besfight HTA-12K-E30 ซึ่งนำมาใช้งาน โดยไม่ได้มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยแต่อย่างใด ทั้งนี้ระบบการเรียงตัวของเส้นใยแต่ละชั้นจะเรียงตัวแบบ 90 องศาหรือที่เรียกว่า การเรียงเส้นใยแบบ cross-ply เนื่องจากการนำมาใช้งานขึ้นรูปเป็นโครงสร้างรังผึ้งอาจจัดเรียงเส้นใยเช่นนี้ อย่างไรก็ตามปริมาณของเส้นใยในระบบคอมโพสิตที่ศึกษาตามการจัดเรียงเส้นใยแบบ cross-ply จะมีปริมาณเส้นใย 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาระบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยอีกชนิดคือ การจัดเรียงตัวแบบสาน จะใช้เส้นใยคาร์บอนชนิดผืนผ้า โดยใช้เส้นใยชนิด KN 100 ที่มีลายของการสานแบบ plain wave จะมีปริมาณเส้นใย 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตารางที่ 5.1.4 : สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากเมตริกซ์เรซินที่ศึกษาเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตในระบบอื่น.

Resins	Fiber Types	Treatment Method	Fiber Volume fraction (%)	Flexural properties	
				Strength (MPa)	Modulus (GPa)
BEP361	HTA-N-6000	-	50	940	69
	HTA-12K-E30	-	50	921	57
	KN 100	-	60	706	68
BEP362	HTA-N-6000	-	50	809	59
	HTA-12K-E30	-	50	1,072	68
	KN 100	-	60	1,011	71
BEP363	HTA-N-6000	-	50	850	58
	HTA-12K-E30	-	50	996	54
	KN 100	-	60	734	69
BA-a ¹	Woven T-300	-	N/A	400	N/A
BA-a ¹	Woven T-300	Plasma 3min	N/A	600	N/A
BA-a ²	Woven T-300	Acid 60min	N/A	850	N/A
BA-35X ³	Woven T-300	Rubber layer	60	820	58
EPOXY ⁴ (TGBAP/BEP)	Woven T-300	PEI Coating	60	800	N/A
PMR-15 ⁵	T-650/42-6K	-	69	1,800	60
EPOXY828 ⁶	Morganite II	-	69	1,655	N/A
	Calanese GY-70	-	-	696	N/A

¹ Ref.: Jang J. and Yang H. Toughness improvement of carbon-fibre/polybenzoxazine composites by rubber modification. *Compos. Sci. and Tech.* 60 (2000): 457-463.

² Ref.: Jang J. and Yang H. The effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites. *J. of Mater. Sci.* 35(2000): 2297.

³ Ref.: Ishida H. and Chaisuwan T. Mechanical property improvement of Carbon fiber reinforce polybenzoxazine by rubber interlayer. *Polym. Compos.* 24 (2003): 597-607.

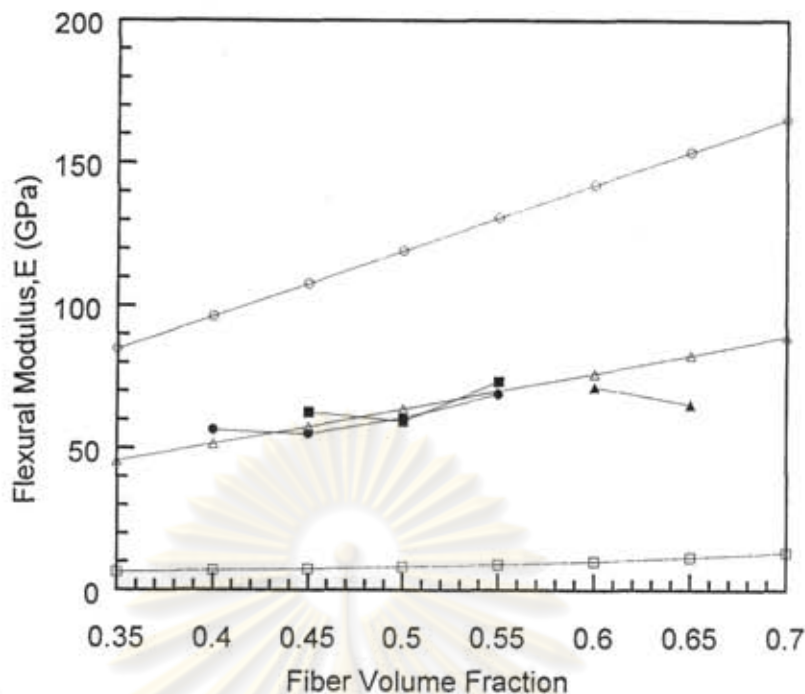
- ⁴ Ref.: Shin S., Jang J. The effect of thermoplastic coating on the mechanical properties of woven fabric carbon/epoxy composite. *J. of Polym. Sci.* 35 (2000): 2047-2054.
- ⁵ Ref.: Shen S. and Ishida H. Development and characterization of high-performance polybenzoxazine composites. *Polym. Compos.* 17 (1996): 710.
- ⁶ Ref.: www.resins.com, 2001 Resin Performance Products

จากตาราง ค่าความแข็งแรงในการดัดโค้ง และค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์ผสมเป็นเมทริกซ์เรซิน มีค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงที่มีเมทริกซ์เรซินชนิดอื่น เช่น ค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนชนิด HTA-12K-E30 และมีพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 เป็นเมทริกซ์เรซิน มีค่าอยู่ที่ 69 จิกะปาสคาล ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนชนิด T-650/35 และมีพอลิไอไมด์ชนิด PMR-15 เป็นเมทริกซ์เรซิน มีค่ามอดูลัสในการดัดโค้งอยู่ที่ 60 จิกะปาสคาล อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นได้จากการคำนวณเพื่อให้อยู่ในระบบที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบ cross-ply ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$E_{x,ult}^+ = E_x^0 t \quad (1)$$

เมื่อ t = อัตราส่วนของการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทางเดียวกันกับแรงที่รับในวัสดุคอมโพสิต
 E_x^0 = ค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวแบบทางเดียวทั้งหมด
 $E_{x,ult}^+$ = ค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงเส้นใยแบบ cross-ply

ผลของปริมาณเส้นใยที่มีต่อค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเบนซอกซาซิน/อีพอกซี/ฟีนอลิก โนโวแลค 3/6/2 แสดงดังกราฟรูปที่ 5.1.13 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมอดูลัสในการดัดโค้งที่คำนวณได้ตามกฎการผสมตามสมการของ Voigt และ Reuss models ซึ่งเป็นค่ามอดูลัสในแนวขนานแกนที่รับแรง และมอดูลัสในแนวตั้งฉากแกนที่รับแรง จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีเป็นอย่างดี และมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามสมการที่ 1 เช่นที่ปริมาณเส้นใย 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีค่ามอดูลัสที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าอยู่ที่ 70 จิกะปาสคาล ในขณะที่ค่ามอดูลัสที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 73 จิกะปาสคาล



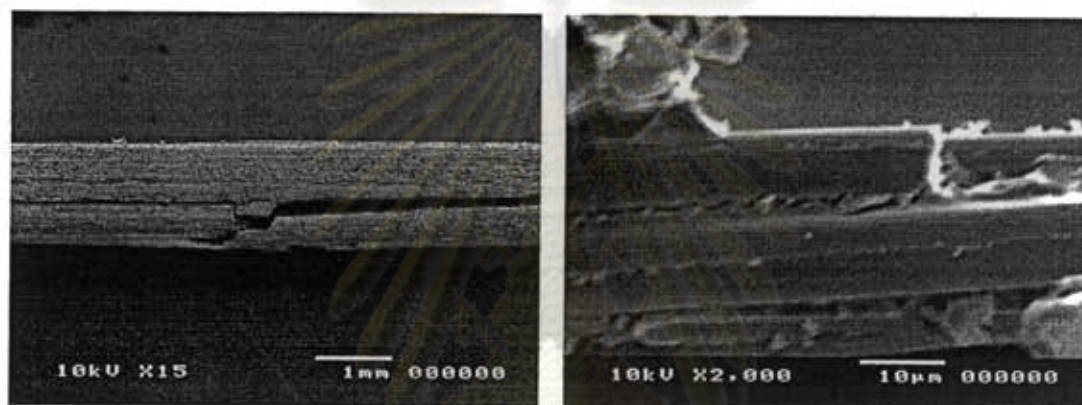
รูปที่ 5.1.13: ผลของปริมาณเส้นใยที่มีต่อมอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่มีเมตริกซ์เรซินที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 เป็นเมตริกซ์เรซิน: (O) Voigt Model, (□) Reuss Model, (Δ) Cross-ply Calculation, (●) HTA-12K-E30, (■) HTA-N-6000, (▲) KN 100.

นอกจากนี้จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่ามอดูลัสในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตจะมากขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยชนิดผืนผ้าเป็นเส้นใยเสริมแรงจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของการสারণกันของเส้นใยเช่นการเกิด fiber netting ขึ้นเป็นต้น

จากตารางที่ 5.1.4 จะเห็นว่าระบบคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 มีค่ามอดูลัสที่มากกว่าระบบที่ได้จากงานวิจัยอื่นทั้งที่ระบบคอมโพสิตที่มีพอลิเบนซอกซาซีนเป็นเมตริกซ์เรซิน และระบบที่ดัดแปรสมบัติต่างๆเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดี เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนชนิดผืนผ้าที่มีพอลิเมอร์อัลลอยด์ที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน/อีพอกซี/ฟีนอลิกโนโวแลค 3/6/2 เป็นเมตริกซ์เรซิน มีค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งเท่ากับ 1,011.06 เมกกะปาสคาล และมีค่ามอดูลัสในการดัดโค้งเท่ากับ 71 จิกะปาสคาล ในขณะที่ระบบของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนชนิดผืนผ้าที่มีการดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยด้วยกรดไนตริกและมีพอลิเบนซอกซาซีนชนิด BA-a เป็นเมตริกซ์เรซิน มีค่าค่าความแข็งแรงในการดัดโค้งเท่ากับ 850 เมกกะ

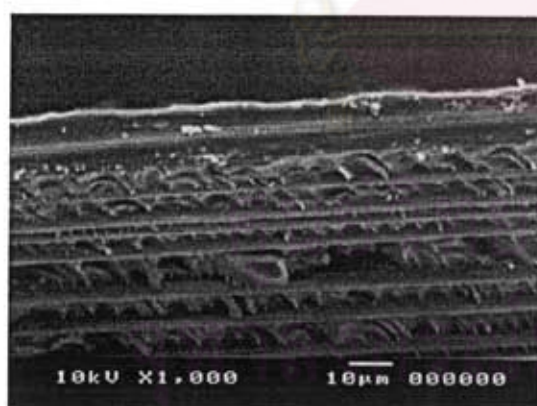
ปราศกาล นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนชนิดเส้นฝ้ายที่มีการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยการเคลือบเส้นใยด้วยยาง ATBN มีค่ามอดูลัสในการดัดโค้งเท่ากับ 58 จิกะปราศกาล [1.13]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความเสียหายในการดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตเมื่อได้ทำการทดลองแล้วพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเป็นความเสียหายในลักษณะของเส้นใย และการแยกระหว่างชั้นของแต่ละชั้น ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานที่เกิดความเสียหายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออิเล็กตรอนส่องกราด Scanning electron microscope ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะดังปรากฏในรูปที่ 5.1.14 ก ข และ ค ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นถึงพอลิเมอร์ที่ยังสามารถยึดเกาะเส้นใยอยู่ได้ และความเสียหายที่เกิดกับเมตริกซ์เรซิน cohesive failure เป็นการแสดงถึงความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์เรซินที่ดี



(ก)

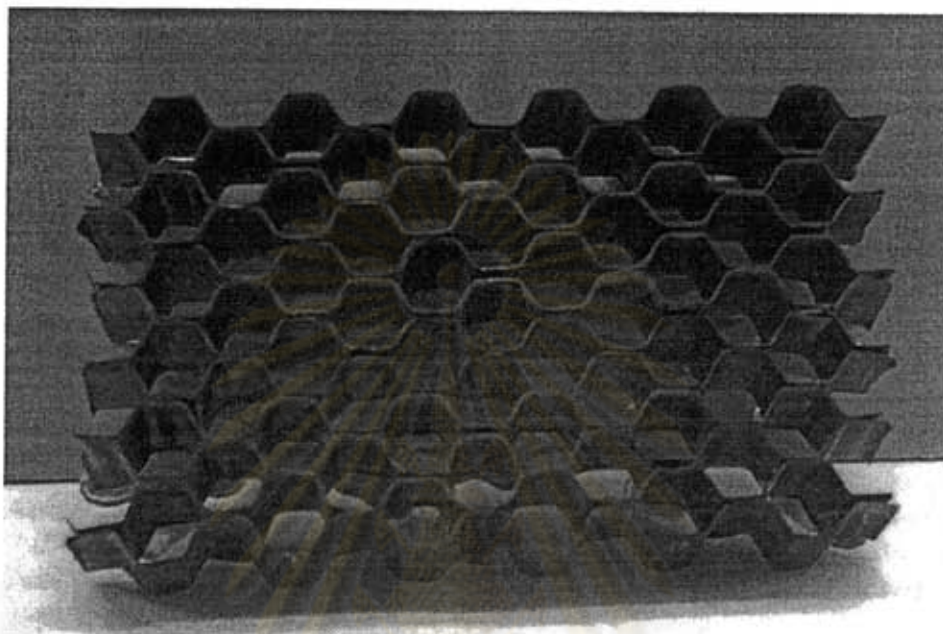
(ข)



(ค)

รูปที่ 5.1.14: SEM micrographs ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดลองแล้ว: (ก) การเสียหายของการเรียงเส้นใยในระบบ cross-ply BEP362/HTA-12K-E30 , (ข) การเสียหายของการเรียงเส้นใยในระบบ cross-ply BEP362/HTA-12K-E30, และ (ค) การเสียหายของการเรียงเส้นใยแบบสาน

นอกจากนี้เมื่อนำพรีเพลทส์ที่มีเรซินผสมที่อัตราส่วน 3/6/2 มาขึ้นรูปเป็น โครงสร้างรังผึ้งด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบ Corrugation ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสจะได้ลักษณะของ โครงสร้างรังผึ้งดังรูปที่ 5.1.15 ซึ่งจะเห็นว่าพรีเพลทส์ที่ได้สามารถนำมาขึ้นรูปเป็น โครงสร้างรังผึ้ง ได้



รูปที่ 5.1.15: โครงสร้างรังผึ้งจากพรีเพลทส์เส้นใยคาร์บอนที่อัตราส่วน 3/6/2 เป็นเมตริกซ์

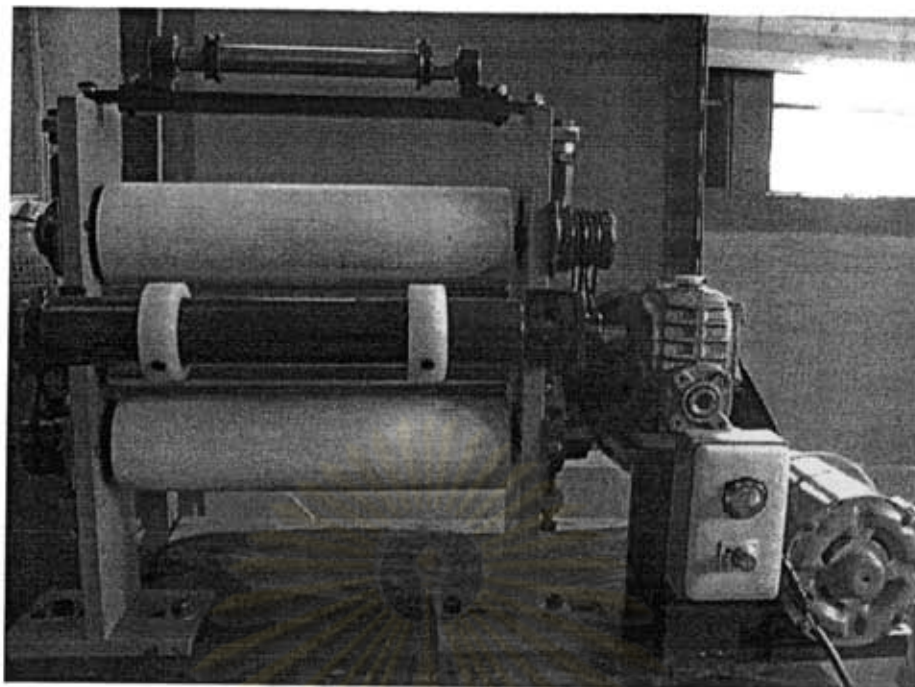
5.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)

5.2.1 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

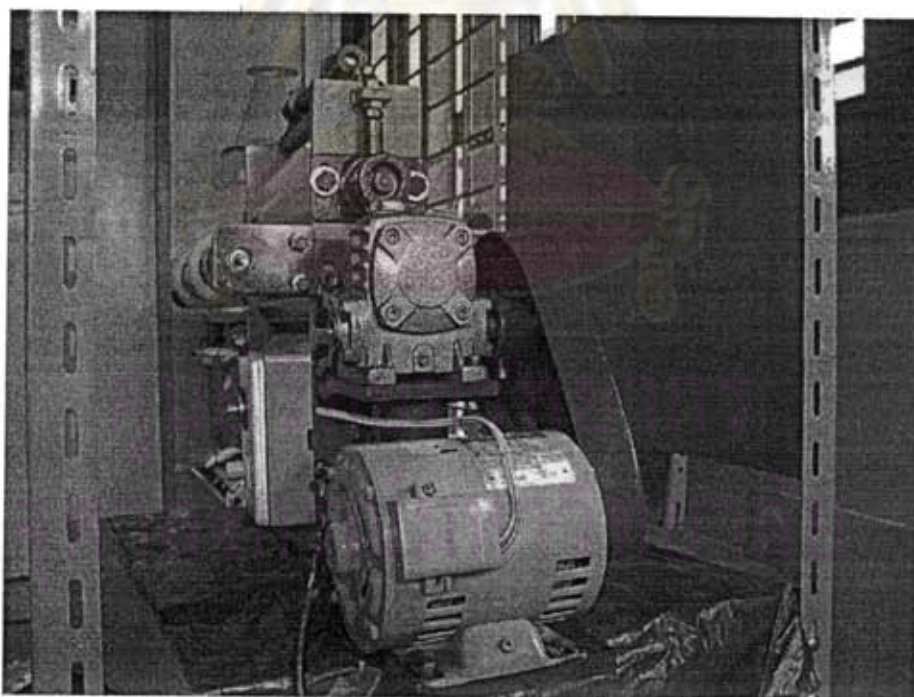
5.2.1.1 เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวประกอบด้วยลูกกลิ้ง 3 อัน ลูกกลิ้งอันกลางเป็นลูกกลิ้ง เซาะร่อง ซึ่งทำจากสแตนเลส ลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 88.2 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร เซาะร่องตามความยาวของทรงกระบอก ร่องลึก 5 มิลลิเมตร กว้าง 5.7 มิลลิเมตร จำนวน 12 ร่อง แต่ละร่องห่างกัน 17.1 มิลลิเมตร

ส่วนลูกกลิ้งอันบนและล่าง ทำจากยางสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 83.3 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ใช้มอเตอร์ขนาด 200 วัตต์ เป็นตัวขับ ลูกกลิ้งอันกลาง โดยผ่านเฟืองทดเพื่อลดความเร็วรอบ ลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว แสดงดังรูปที่ 5.2.1 และภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงในรูปที่ 5.2.2



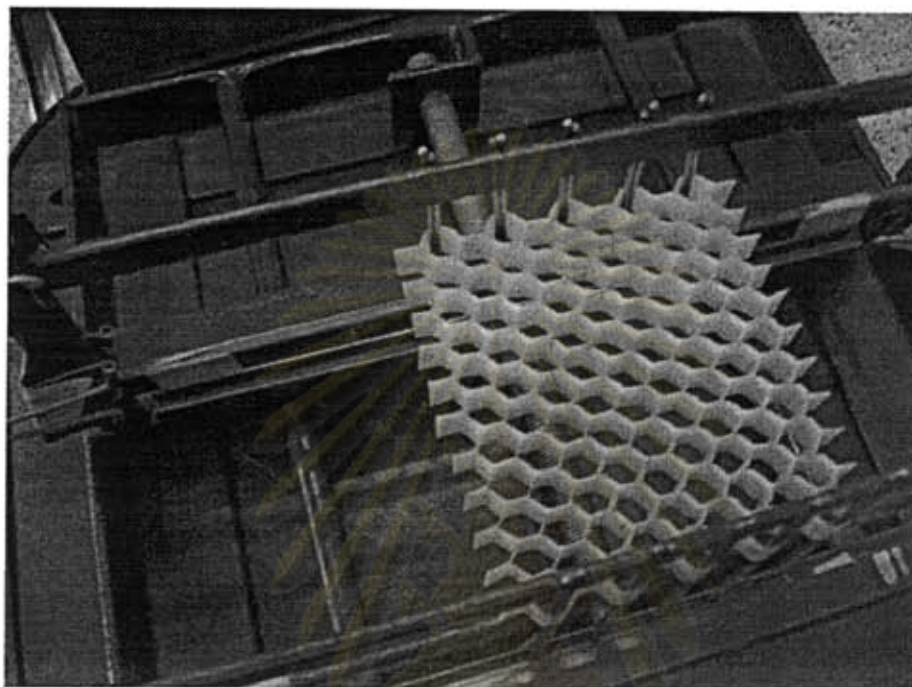
รูปที่ 5.2.1 เครื่องดันแบบสำหรับทากาว



รูปที่ 5.2.2 ภาพด้านข้างของเครื่องดันแบบสำหรับทากาว

5.2.1.2 เครื่องดันแบบสำหรับคิงขยาย

เครื่องดันแบบสำหรับคิงขยายมีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สกรูที่ใช้เชื่อมระหว่างแกนเหล็ก มีขนาดพิทช์ 1 มิลลิเมตร ภาพเครื่องดันแบบสำหรับคิงขยาย ขณะคิงขยายโครงสร้างรังผึ้งแสดงดังรูปที่ 5.2.3

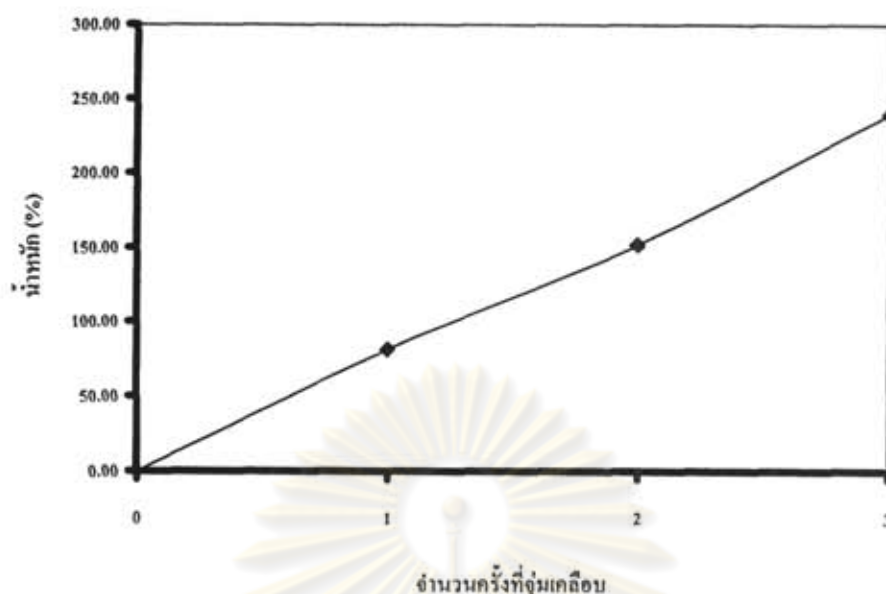


รูปที่ 5.2.3 เครื่องดันแบบสำหรับคิงขยาย ขณะคิงขยายโครงสร้างรังผึ้ง

5.2.2 ผลการเคลือบโนเม็กซ์ด้วยฟีนอลิกเรซิน

โนเม็กซ์ถูกเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินที่มีความเข้มข้น 25.28 % โดยน้ำหนัก และวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส 30 นาที โดยกระบวนการนี้ทำซ้ำ 1 2 และ 3 ครั้ง น้ำหนักก่อนและหลังการจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซิน แต่ละครั้งถูกบันทึกเพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองพบว่า หลังจากผ่านการจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินแล้ว น้ำหนักโนเม็กซ์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 81.23 % 151.76% และ 239.67 % สำหรับการจุ่มเคลือบ 1 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบและน้ำหนักของโนเม็กซ์แสดงในรูปที่ 5.2.4



รูปที่ 5.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบและน้ำหนักของโณเม็กซ์

5.2.3 ขนาดเซลล์ ลักษณะเซลล์ และความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งหลังจากผ่านกระบวนการอบอ่อนแล้ว มีขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย 9.21 มิลลิเมตร ส่วนที่เชื่อมติดกัน 5.58 มิลลิเมตร และส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน 6.20 มิลลิเมตร ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยมีค่า 15.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ และค่าออกแบบเริ่มต้น พบว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีขนาดเซลล์เล็กกว่า ด้านต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์มีค่าไม่เท่ากัน (ไม่เป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า) และมุมค้ำขาขยมีค่าไม่ถึง 60 องศา จึงได้ปรับปรุงค่าที่ออกแบบใหม่ให้มีมุมค้ำขาขยใกล้เคียงกับมุมที่ผลิตได้ ส่งผลให้ขนาดเซลล์ และด้านต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของหกเหลี่ยมมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มากกว่า ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้เปรียบเทียบให้เห็นในตารางที่ 5.2.1

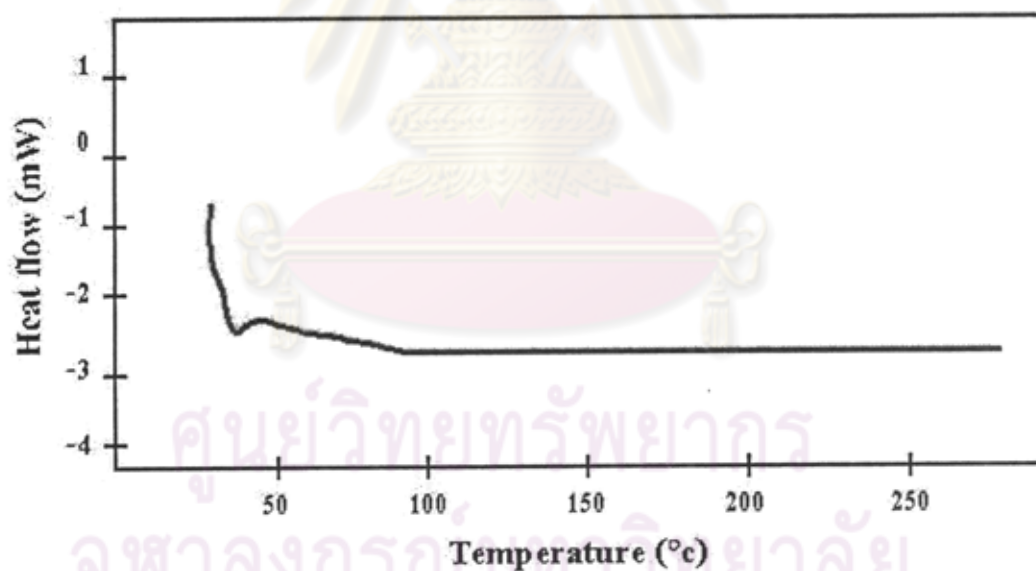
นอกจากนี้ เมื่อผ่านไป 3 วัน พบว่าโครงสร้างรังผึ้งมีการหดตัวลง ทำให้ขนาดเซลล์เล็กลงเหลือ 7.67 มิลลิเมตร และความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งเพิ่มขึ้นเป็น 16.97 มิลลิเมตร ทำให้จำเป็นต้องเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินเพื่อเพิ่มความเสถียร

ตารางที่ 5.2.1 ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้ง	ความหนาแน่น	มุมขยายตัว	ขนาดเซลล์	ส่วนที่เชื่อมติดกัน	ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน
	kg/m ³	องศา	mm	mm	mm
ค่าออกแบบเริ่มต้น	14.60	60.00	9.87	5.70	5.70
ค่าออกแบบที่ปรับปรุง	15.08	50.00	9.50	5.50	6.20
ค่าที่ผลิตได้จริง	15.57	49.50	9.21	5.58	6.20
ค่าที่ได้หลังจากวันผ่านไป	16.97	41.95	7.67	5.58	6.20

5.2.4 สมบัติการบ่มของโครงสร้างรังผึ้ง

สมบัติการบ่มของโครงสร้างรังผึ้งถูกทดสอบโดย Differential scanning calorimeter (DSC) พบว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีสภาวะการบ่มที่สมบูรณ์ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของสารตัวอย่างจากการทดสอบด้วย DSC แสดงในรูปที่ 5.2.5



รูปที่ 5.2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของโครงสร้างรังผึ้ง ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

6. สรุปผลการทดลอง

6.1 การพัฒนาพรีเฟลกซ์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงคข้อ 2.1.1)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาอัตราส่วนของเรซินผสม ระหว่าง เบนซอกซาซิน อีพอกซี และฟีนอลิกเรซินเพื่อนำมาใช้เป็นเมตริกซ์ของเส้นใยคาร์บอนพรีเฟลกซ์ โดยพิจารณาถึงความสามารถในการขึ้นรูป เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติทางกลเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความสามารถในการเก็บรักษาเรซินผสมอีกด้วย จากการทดลองพบว่าเรซินผสมที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 3/6/2 ซึ่งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพรีเฟลกซ์ได้ทั้งกระบวนการทางความร้อน และกระบวนการขึ้นรูปแบบสารละลาย และมีความสามารถในการอบเส้นใยได้อย่างทั่วถึงเนื่องจากมีความหนืดที่ต่ำ (1.2 Pa.s ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) และให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปที่นาน นอกจากนี้ยังให้ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่กว้าง (50-200 องศาเซลเซียส) ทำให้สามารถเลือกอุณหภูมิที่จะทำการขึ้นรูปได้อย่างหลากหลาย ทั้งยังสามารถเก็บรักษาไว้ได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยยังมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นพรีเฟลกซ์ได้ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ Post Cure ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ Fully Cure ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ ภายหลังการบ่มเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้เรซินผสมที่อัตราส่วน 3/6/2 ยังให้เสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติทางกลที่ดี คือมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่สูง ค่าความเป็นเถ้าถ่านที่สูง และให้สมบัติทางกลที่สูงกว่าเรซินผสมชนิดอื่นที่ทำการศึกษา เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้เรซินทั้งสามชนิดมีอัตราส่วนที่พอเหมาะที่จะแสดงสมบัติที่ดีในด้านต่างๆ กล่าวคือ เบนซอกซาซินจะให้ความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุล ทำให้เรซินสามารถเกิดการบ่มได้โดยให้เพียงแค่ความร้อน ในขณะที่ อีพอกซีจะช่วยลดความหนืด ทำให้ผสมได้ง่ายขึ้น และฟีนอลิก โนโวแลคจะช่วยให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการบ่มได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เมื่อนำพรีเฟลกซ์ที่มีเรซินผสมที่อัตราส่วน 3/6/2 มาขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตแล้วยังให้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ดี โดยไม่ต้องมีการคิดแปรเส้นใยหรือมดริกซ์เรซินแต่อย่างใด

6.2 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงคข้อ 2.1.2)

ในงานวิจัยวัตถุประสงคข้อ 2.1.2 นี้ เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งได้ถูกทำการพัฒนาขึ้น โดยประกอบด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว และเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย โครงสร้างรังผึ้งจากโนเม็กซ์ถูกผลิตขึ้นโดยเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง โดยวิธีการเชื่อมติดด้วยกาว และกระบวนการผลิตแบบดึงขยาย ซึ่งกาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตขึ้น มีขนาดเซลล์เล็กลงกว่าที่ได้ออกแบบไว้ และมีลักษณะไม่เป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า เนื่องจากส่วนที่เชื่อมติดกันด้วยอีพอกซีเรซินมีขนาดเล็กกว่าที่ออกแบบไว้ ทำให้ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันของเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น เซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้จึงมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านไม่เท่า (อัตราส่วนระหว่างด้านที่ยาวสุดและสั้นสุด ต่อความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 : 1.05) และมีมุมค้ำขาเซลล์เล็กกว่า 60 องศา คือประมาณ 49.5 องศา

นอกจากนี้ เมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างรังผึ้งมีการหดตัวเล็กน้อย จึงจำเป็นต้องเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินเพื่อเพิ่มความเสถียร โดยใช้วิธีจุ่มเคลือบ 1 2 และ 3 ครั้ง จากนั้นสมบัติทางกล ซึ่งคือ ความทนแรงกด และความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งจะถูกทดสอบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. การพัฒนาพรีเพล็กส์จากเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้ทำวัสดุแกนแบบรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.1)
 - 1.1 Bitzer T. Honeycomb Technology. London: Chapman & Hall, 1997.
 - 1.2 Buehler F.U. and Seferis J.C. Effect of reinforce and solvent content on moisture absorption in epoxy composite materials. *Composites*. 31(2000): 741-748.
 - 1.3 Chand S. Review carbon fiber for composites. *J. of materials science*. 35 (2000): 1303-1313
 - 1.4 Delmonte J. *Technology of Carbon and Graphite Fiber Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
 - 1.5 Frigione M. and Kenny J.M. Thermokinetic effects of the aging of epoxy matrix prepregs of high performance composites. *Polym Comp*. 23 (2002): 530-537.
 - 1.6 Gan et al. Flame retardant phosphorus element-containing epoxy resin compositions. U.S. Patent 6,645,631 (2003).
 - 1.7 Goto et al. Epoxy resin composition and prepreg made with the epoxy resin composition. U.S. Patent 6,838,176 (2005).
 - 1.8 Hall D. *An Introduction to Composites Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981
 - 1.9 Harper C.A. *Handbook of plastic elastomer and composites*. New York: McGraw-Hill, 1996.
 - 1.10 Ishida H., Tech Paper June 1198,121
 - 1.11 Ishida H. and Allen D.J. Physical and mechanical characterization of near-zero shrinkage polybenzoxazines. *J. Polym. Sci. Pol. Phys*. 34 (1996) 1019-1030.
 - 1.12 Ishida H. and Allen D.J. Mechanical characterisation of copolymers based on benzoxazine and epoxy. *Polymer*. 37(1996): 4487-4495.
 - 1.13 Ishida H. and Chaisuwan T. Mechanical property improvement of Carbon fiber reinforce polybenzoxazine by rubber interlayer. *Polym. Compos*. 24 (2003): 597-607.
 - 1.14 Ishida H. et al. Process of benzoxazine compounds in solventless systems. U.S. Patent 5,543,516 (1996).

- 1.15 Ishida H. et al. Ternary systems of benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. U.S. Patent 6,207,786 (2001).
- 1.16 Ishida H. and Sanders D. Regioselectivity of the ring-opening polymerization of monofunctional alkyl-substituted aromatic amine-based benzoxazines. *Polymer*. 42(2001): 3115–25.
- 1.17 Jang J. and Yang H. Toughness improvement of carbon-fibre/polybenzoxazine composites by rubber modification. *Compos. Sci. and Tech.* 60 (2000): 457-463.
- 1.18 Jang J. and Yang H. The effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites. *J. of Mater. Sci.* 35(2000): 2297.
- 1.19 Jones R.M. *Mechanics of Composite Material*. New York: McGraw-Hill, 1975.
- 1.20 Kampangsaeree N. Development of Fire resistant Wood-substituted Composites from Polybenzoxazine Alloys. Master's degree. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2004.
- 1.21 Kamponpan B. Effects of Physical Aging on Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Epoxy Composites for Structural Repair and Strengthening of Concrete Structure. Master's degree. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2002.
- 1.22 Lin-Gibson S., Barauska V., Riffle J.S., Sorathia U. Crerol novolac-epoxy network: properties and processability. *Polymer*. 43 (2002): 7389-7398.
- 1.23 Leonard Hollaway, *Handbook of Polymer Composites for engineering*, Woodhead Publishing limited, 1994
- 1.24 Markovitz M. Low viscosity epoxy resin compositions. U.S. Patent 4,656,090 (1987).
- 1.25 Ning X., and H. Ishida, *J. Polym. Sci. Phys. Ed.*, 32, 921 (1994)
- 1.26 Ning X., and H. Ishida, *J. Polym. Sci. Chem. Ed.*, 32, 1121 (1994)
- 1.27 Pirstprindwong S. The flexibility enhancement of polybenzoxazine using flexible epoxy and urethane prepolymer. Master's degree. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2003.
- 1.28 Rimdusit S. and Ishida H. Development of new class of electronic packaging materials based on ternary systems of benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. *Polymer*. 41(2000): 7941.

- 1.29 Rimdusit S. and Ishida H. Synergism and multiple mechanical relaxation observed in ternary systems based on benzoxazine, epoxy, and phenolic resins. *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 38 (2000): 1687.
- 1.30 Rimdusit S. and H Ishida. Gelation study of high processability and high reliability ternary systems based on benzoxazine, epoxy, and phenolic resins for an application as electronic packaging materials. *Rheol. Acta.* 41 (2002): 1-9.
- 1.31 Rimdusit S., Pirstpindvong S., Tanthapanichakoon W., and Damrongsakkul S. Toughening of polybenzoxazine by alloying with urethane prepolymer and flexible epoxy: a comparative study. *Polym. Eng. and Sci.* 45 (2005): 288-297.
- 1.32 Sahimi M. Application of Percolation Theory. London: Taylor&Francis, 1994.
- 1.33 Saitou et al. Method for producing prepreg, prepreg, metal clad laminate and printed wiring board. U.S. Patent 6,749,899 (2004).
- 1.34 Sandler K. Polymer Synthesis Volume II. New York: Academic Press, 1994.
- 1.35 Schwartz M. M. Composite material. New Jersey: Prentice-Hall, 1997.
- 1.36 Shalin R.E. et al. Polymer Matrix Composites. London: Chapman&Hall, 1995.
- 1.37 Shen S. and Ishida H. Development and characterization of high-performance polybenzoxazine composites. *Polym. Compos.* 17 (1996): 710.
- 1.38 Shin S., Jang J. The effect of thermoplastic coating on the mechanical properties of woven fabric carbon/epoxy composite. *J. of Polym. Sci.* 35 (2000): 2047-2054.
- 1.39 Shin E.E. et al. Studies on hot-melt prepregging of PMR-II-50 polyimide resin with graphite fibers. NASA Glenn Research Center. Cleveland, OH 44135.
- 1.40 Sperling L. H. Introduction to physical polymer science. John Wiley & Sons, 2001.
- 1.41 Whorlow R.W. Rheological Techniques. England: ELLIS HORWOOD, 1992.
- 1.42 Winter H.H. and Mours M. Rheology of Polymers Near Liquid-Solid Transitions. *Adv. in Polym. Sci.* 134 (1997): 167-234.
- 1.43 www.resins.com
- 1.44 www.Prepregs.com
- 1.45 www.sglcarbon.com

- 1.46 Zhang et al. Manufacture of prepregs and laminates with relatively low dielectric constant for printed circuit boards. U.S. Patent 6,632,511 (2003).
- 1.47 Encyclopedia of polymer science and engineering Wiley Interscience (1985).
- 1.48 ชาตรี หลักทอง, วารสาร โลหะ วัสดุ และแร่ 3,1 ศ.ก. 34 ,5-16
- 1.49 Tyberg C.S. et al. Structure-property relationship of void-free phenolic-epoxy matrix material. Polymer. 41 (2000): 5053-5062

2. เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (วัตถุประสงค์ข้อ 2.1.2)

- 2.1 Tom Bitzer, Honeycomb Technology, Chapman & Hall, London UK (1997).
- 2.2 Ani Ural, Fracture mechanics approach to facesheet delamination in honeycomb: measurement of energy release rate of the adhesive bond, Engineering Fracture Mechanics (2003).
- 2.3 นิต์ศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์ เล่ม 1. หน่วยพิมพ์เอกสารและตำรา ภาควิชาเคมี อุดสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- 2.4 www.users.globalnet.co.uk
- 2.5 www.Nomex.com
- 2.6 Encyclopedia of polymer science and engineering Vol.6, Wiley Interscience (1985).
- 2.7 DuPont, Nomex Datasheet.
- 2.8 WG Potter, Uses of epoxy resins
- 2.9 www.vantico.com
- 2.10 Swaraj Paul. Surface Coating. John Wiley & Sons, 1996.
- 2.11 อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- 2.12 Dagobert Budwig, Process of Manufacturing Honeycomb Paper, US.Patent No. 765,412 (1904).
- 2.13 Roger C. Steel, Method of Apparatus for Making Honeycomb Material, US. Patent No. 2,610,934 (1952).
- 2.14 Roger C. Steel, Method of Producing Honeycomb, US. Patent No. 2,734,843 (1956).
- 2.15 Henry L. Knoll, Method of Making Honeycomb, US. Patent No. 2,983,640 (1961).
- 2.16 H. Freeman Seebo, Apparatus and Method for Forming Honeycomb Core, US. Patent No. 5,354,394 (1994).

2.17 Doyle G. Dixon, Method for Making Thermally Fused Thermoplastic Honeycomb Structures, US. Patent No. 5,421,935 (1995).

2.18 Lewis , et al., Method of making precision geometry advanced composite honeycomb material for spacecraft applications and honeycomb material made thereby, US Patent No. 6,579,404.

2.18 Maumus , et al. , Method of manufacturing honeycomb structures , US Patent No. 6,830,718.

2.20 Cawse , et al., Particulate reinforcement for honeycomb core materials, US Patent No. 6,117,518.

2.21 J.E. Shafizadeh and J.C. Seferis, Scaling of honeycomb compressive yield stresses, Composites Part A : applied science and manufacturing (2000).

2.22 Thai epoxy and allied products Co., Ltd., Technical Data Sheet: EPOTEC YD582 / TH7278 (2003).

2.23 Thai GCI Resitop Co., Ltd., Data Sheet PL2211.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย