

การพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อการผลิตวัสดุแกนรูปร่างผึ่งเพื่อใช้เป็นโครงสร้าง



นางสาว ลดาวัลย์ สุวรรณรัมย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

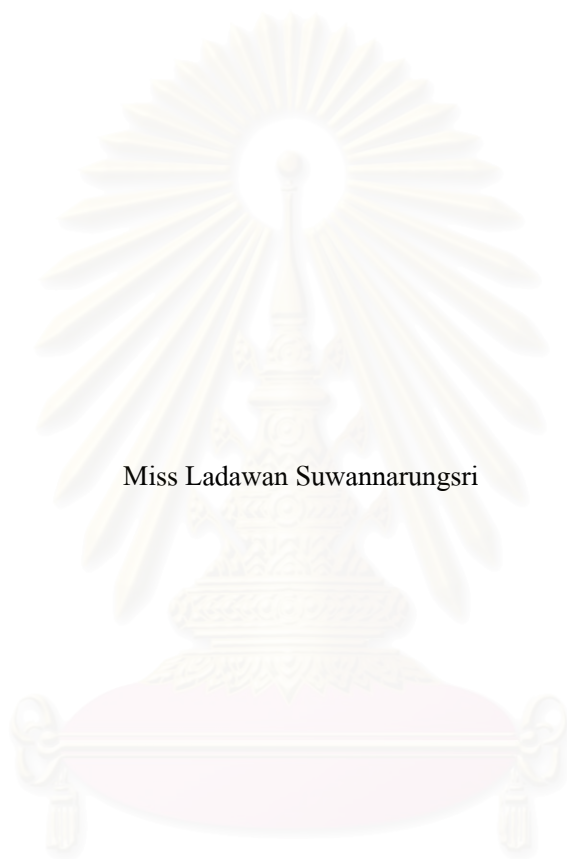
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3530-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROTOTYPE DEVELOPMENT FOR PRODUCING HONEYCOMB CORE MATERIAL FOR  
STRUCTURAL USE



Miss Ladawan Suwannarungsri

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2005

ISBN 974- 17-3530-8



ลดาวัลย์ สุวรรณรังษี : การพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อการผลิตวัสดุแกนรูปร่างผึ้งเพื่อใช้เป็น  
โครงสร้าง. (PROTOTYPE DEVELOPMENT FOR PRODUCING HONEYCOMB CORE  
MATERIAL FOR STRUCTURAL USE) อ.ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัฒชะพานิชกุล,  
115 หน้า. ISBN 974-17-3530-8.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบแบบง่ายและประหยัดสำหรับผลิต โครงสร้างรังผึ้ง  
โครงสร้างรังผึ้งผลิตจากวัสดุประเภทโฟมเม็กซ์ ซึ่งต้องการออกแบบให้มีขนาดเซลล์ 9.9 มิลลิเมตร และมี  
ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 25 - 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วิธีการผลิตแบบเชื่อมติดด้วยกาว  
และกระบวนการผลิตแบบดึงขยาย กาวที่ใช้คืออีพอกซีเรซิน จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของอีพอกซีเรซิน  
ที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบ่ม พบว่าสภาวะการบ่มที่เหมาะสมคือ บ่มที่อุณหภูมิ 160  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายหลังจากโครงสร้างรังผึ้งถูกดึงขยายและบ่มแล้วโครงสร้างรังผึ้ง  
ยังไม่มี ความเสถียร ดังนั้นจึงต้องใช้ฟีนอลิกเรซินสำหรับจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งเพื่อเพิ่มความเสถียรและ  
ยังเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างรังผึ้งด้วย จากนั้นทำการศึกษาสภาวะในการบ่มของฟีนอลิกเรซินที่  
เหมาะสม พบว่าฟีนอลิก เรซินที่ความเข้มข้น 20.23% โดยน้ำหนัก เมื่อจุ่มเคลือบแล้วระเหยตัวทำ  
ละลายตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็น  
เวลา 30 นาที ให้ผลการจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งที่ดี จากการทดสอบสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งที่  
ผลิตได้ โดยโครงสร้างรังผึ้งความหนาแน่นประมาณ 45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรากฏว่าโครงสร้าง  
รังผึ้งมีความทนแรงอัด 1 เมกะปาสคาล และความทนแรงเฉือนในด้านยาวและด้านกว้างมีค่า 0.7 และ  
0.44 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา..วิศวกรรมเคมี.....  
ปีการศึกษา.. 2548.....

ลายมือชื่อนิสิต..... ลดาวัลย์ สุวรรณรังษี  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ตัฒชะพานิชกุล

## 4570507021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING  
 KEY WORD : HONEYCOMB/ STRUCTURAL MATERIAL/ PRODUCTION EQUIPMENT  
 LADAWAN SUWANNARUNGSRI : PROTOTYPE DEVELOPMENT FOR  
 PRODUCING HONEYCOMB CORE MATERIAL FOR STRUCTURAL USE.  
 THESIS ADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D.,  
 115 pp. ISBN 974-17-3530-8.

The aim of this study was to develop simple device for producing honeycomb structures. Nomex<sup>®</sup> honeycomb structures with cell size of 9.9 mm and final density of 25 – 50 kg/m<sup>3</sup> were produced by adhesive bonding and subsequent expansion process. Epoxy resin was used to bond nodes of the honeycomb structure. Suitable curing conditions of the epoxy resin were investigated. The completion of curing reaction took 3 hours at 160<sup>o</sup>C. After the honeycomb structures were expanded and cured, they were not yet fully stable. To enhance their structural strength and stability, a suitable liquid phenolic resin was used to dip – coat the honeycomb structures and the suitable curing conditions of the phenolic resin were investigated. It was found that 20.23% wt phenolic resin yielded good dip - coated honeycomb structures after 24 hours natural evaporation at room temperature and the suitable curing condition was at 140<sup>o</sup>C for 30 min. Finally, the mechanical properties of honeycomb structures were tested. For honeycomb density of 45 kg/m<sup>3</sup>, its compressive strength was 1 MPa, whereas the shear strengths were 0.7 and 0.44 MPa in the L and W directions, respectively.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Chemical Engineering.....  
 Field of study ...Chemical Engineering.....  
 Academic year ...2005.....

Student's signature.....*Ladawan S.*.....  
 Advisor's signature.....*W. Tanthapanichakoon*.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำปรึกษา และชี้แนะความเข้าใจต่างๆ มากมายตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวิษชัย ชรินพานิชกุล ประธานกรรมการ อ.ดร. วรัญญู แต่ไพสิฐพงษ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ – เอกชน ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2547

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง DSC และเครื่องวัดความหนืด รวมถึงบุคลากรใน ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณศูนย์วิจัย ทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Universal Testing Machine และบุคลากรที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ เป็น อย่างมาก

ขอขอบคุณ คุณสมบูรณ์ และพี่ๆ บริษัท สกุน โมลด์ สำหรับคำแนะนำในการ สร้างเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ บริษัท เบสเทรค จำกัด ให้ความช่วยเหลือในการจัดหา โนเม็กซ์สำหรับการทดลอง บริษัท ไทยอีพอกซี แอนด์อัลลายด์ จำกัด สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับ อีพอกซีเรซินในการทดลอง

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีอนาคตและกระบวนการวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในยามมีปัญหา และให้คำปรึกษาเสมอมาในระหว่างที่ทำการศึกษานี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความรัก ดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจตลอดมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มूलเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้ง.....	4
2.2 การเสริมความแข็งแรงของ โครงสร้างรังผึ้ง.....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 โครงสร้างรังผึ้ง.....	12
3.1.1 ความเป็นมาของโครงสร้างรังผึ้ง.....	15
3.1.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างรังผึ้ง และคำจำกัดความ.....	16
3.1.3 วัสดุที่ใช้ผลิต โครงสร้างรังผึ้ง.....	17
3.1.4 วิธีการผลิต โครงสร้างรังผึ้งในอุตสาหกรรม.....	18
3.1.4.1 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามลักษณะการเชื่อมติดกัน ของวัสดุ.....	18
3.1.4.2 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงวัสดุเป็น โครงสร้างรังผึ้ง.....	18
3.1.5 รูปแบบเซลล์.....	21

3.1.6	ราคาของโครงสร้างรังผึ้ง.....	23
3.1.7	ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งทางทฤษฎี.....	24
3.2	วัสดุเริ่มต้นในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง.....	25
3.2.1	เส้นใย (Fiber).....	25
3.2.1.1	โนเม็กซ์ (Nomex®).....	28
3.2.1.2	การผลิตโนเม็กซ์.....	29
3.2.1.3	สมบัติของโนเม็กซ์.....	30
3.2.2	กาว (Adhesive).....	32
3.2.2.1	อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin).....	32
3.2.2.2	การสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน.....	33
3.2.2.3	สมบัติของอีพอกซีเรซิน.....	36
3.3	วิธีการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินในอุตสาหกรรม.....	37
3.3.1	การเคลือบผิว.....	37
3.3.1.1	วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว.....	37
3.3.1.2	ประเภทของสารเคลือบผิว.....	37
3.3.1.3	การเกิดฟิล์ม.....	38
3.3.1.4	การแห้งของสารเคลือบผิว.....	38
3.3.2	ฟีนอลิกเรซิน.....	39
3.3.2.1	การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน.....	39
3.3.2.2	ประเภทของฟีนอลิกเรซิน.....	40
3.3.2.3	สมบัติของฟีนอลิกเรซิน.....	41
บทที่ 4	วิธีดำเนินการทดลองวิจัย.....	43
4.1	วัสดุและสารเคมี.....	43
4.1.1	โนเม็กซ์.....	43
4.1.2	อีพอกซีเรซิน.....	44
4.1.3	ฟีนอลิกเรซิน.....	45
4.1.4	เอทิลแอลกอฮอล์.....	45
4.2	การพัฒนาและออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง.....	45



4.2.1	เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	46
4.2.1.1	การออกแบบลูกกลิ้งเซาะร่อง.....	46
4.2.1.2	การออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	48
4.2.2	เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย.....	50
4.3	การวัดสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ทาบน โนเม็กซ์.....	51
4.3.1	การระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน.....	52
4.3.2	การทดสอบสมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซินและ โนเม็กซ์โดยใช้ DSC.....	52
4.4	ขั้นตอนการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง.....	53
4.4.1	การผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย.....	53
4.4.2	การดึงขยายโครงสร้างรังผึ้ง.....	54
4.5	วิธีการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างรังผึ้งที่ใส่ใน โมลด์โดยการอบอ่อน.....	55
4.6	การวัดสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่ใส่เคลือบโครงสร้างรังผึ้ง.....	58
4.6.1	การเคลือบ โนเม็กซ์ด้วยฟีนอลิกเรซิน.....	58
4.6.2	การทดสอบสมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินและ โนเม็กซ์โดยใช้ DSC.....	60
4.7	วิธีการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน.....	61
4.8	การวัดขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง.....	62
4.9	การวัดความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง.....	63
4.10	วิธีการทดสอบสมบัติทางกลของ โครงสร้างรังผึ้ง.....	64
4.10.1	ความทนแรงอัด.....	64
4.10.2	ความทนแรงเฉือน.....	65
4.11	การสังเกตลักษณะพื้นผิวโครงสร้างรังผึ้งก่อนและหลังการทดสอบทางกล.....	68
บทที่ 5	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	69
5.1	เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่สร้างขึ้น.....	69
5.1.1	เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	69
5.1.2	เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย.....	74
5.2	ผลการวัดสมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซินที่ทาบน โนเม็กซ์.....	76
5.3	ผลการวัดสมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินที่เคลือบ โครงสร้างรังผึ้ง.....	77
5.4	ขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้.....	79

5.5 ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้.....	82
5.6 สมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้.....	84
5.6.1 ความทนแรงอัด.....	84
5.6.2 ความทนแรงเฉือน.....	87
5.7 ผลการสังเกตลักษณะพื้นผิวโครงสร้างรังผึ้งก่อนและหลังการทดสอบทางกล.....	89
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ.....	92
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	92
6.2 ปัญหา และข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก. ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง.....	97
ภาคผนวก ข. สมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้ง.....	98
ภาคผนวก ค. การหาค่าหน้าตัดของพื้นที่ ASTM D 899 – 94 [28].....	99
ภาคผนวก ง. การหาระยะเวลาที่เรซินเทอร์โมเซตเปลี่ยนสภาพเป็นเจล และ ระยะเวลา Pot – life ASTM D 2471 – 94 [29].....	100
ภาคผนวก จ. การระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน .....	101
ภาคผนวก ฉ. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟีนอลิกเรซินที่เคลือบบน โนเม็กซ์.....	103
ภาคผนวก ช. การคำนวณหาค่าความทนแรงอัด .....	106
ภาคผนวก ซ. บทความการนำเสนองานวิจัยในงาน Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT) ครั้งที่ 4 .....	107
ภาคผนวก ฅ. ต้นฉบับบทความวิจัยที่เสนอต่อวารสาร ScienceAsia.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

ตาราง	หน้า
1.1	เปรียบเทียบความแข็งแรงและความแข็งดิ่งของโครงสร้างที่เป็นวัสดุแกน [1].....2
3.1	สมบัติเชิงกลของโนเม็กซ์ [17].....31
ก.1	ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้.....97
ข.1	ค่าความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ .....98
ข.2	ค่าความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ .....98
ฉ.1	ผลการจุ่มเคลือบโนเม็กซ์ในฟีนอลิกเรซินและบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ .....105



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 โครงสร้างรังผึ้ง.....	1
2.1 เครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No. 2,610,934 [3].....	5
2.2 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 1 [4].....	6
2.3 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 2 [4].....	7
2.4 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 3 [4].....	7
2.5 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,983,640 [5].....	8
2.6 เครื่องมือและวิธีสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.5,354,394 [6].....	10
3.1 วัสดุแกนที่ถูกกลามิเนต ภายใต้โหลด (Load) [12].....	13
3.2 ความทนแรงอัดของวัสดุแกนประเภทต่างๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน [12].....	14
3.3 ความทนแรงเฉือนของวัสดุแกนประเภทต่างๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน [12].....	14
3.4 โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า [1].....	14
3.5 โครงสร้างแซนวิช [13].....	16
3.6 ส่วนประกอบของโครงสร้างรังผึ้ง และคำจำกัดความ [1].....	17
3.7 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบบดิ่งขยาย [14].....	19
3.8 การทาแนวทาบบนแผ่นวัสดุ แบบตามขวางแผ่นวัสดุ และตามยาวแผ่นวัสดุ [1].....	20
3.9 วิธีการผลิตโครงสร้างรูปร่างแบบทำให้เป็นรอยย่น [1].....	20
3.10 รูปแบบเซลล์ชนิดต่างๆ [1].....	22
3.11 แสดงส่วนต่างๆ ของโครงสร้างรังผึ้ง [1].....	24
3.12 เปรียบเทียบความต้านแรงดิ่งและมอดูลัสแบบดิ่งของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ [16].....	26
3.13 เปรียบเทียบน้ำหนักต่อพื้นที่ของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ [16].....	27
3.14 เปรียบเทียบราคาของไฟเบอร์ชนิดต่างๆ [16].....	27
3.15 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (m - phenyleneisophthalamide) [17].....	28
3.16 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - benzamide) [18].....	29
3.17 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p - phenyleneterephthalamide) [18].....	29
3.18 ลักษณะอะรามิดแบบไฟบริดส์ และ ฟลอก[17].....	30
3.19 ภาพตัดขวางโนเม็กซ์ชนิด 410 และ 411 [17].....	33
3.20 หมู่อีพอกไซค์ [21].....	35
3.21 โครงสร้างของอีพอกซีเรซิน [22].....	35

4.1	โนเม็กซ์ชนิด 410 หนา 0.05 มิลลิเมตร [24].....	43
4.2	อีพอกซีเรซิน YD582/TH7278.....	44
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่างๆ ของเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง.....	46
4.4	ลูกกลิ้งเซาะร่องและค่าออกเบบ (หน่วยมิลลิเมตร).....	47
4.5	แผนภาพลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	49
4.6	ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	49
4.7	ลักษณะการทำงานของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว .....	50
4.8	ลักษณะการวางแนวทาบสลับกันในแต่ละชั้นที่ติดกัน.....	54
4.9	ภาพตัดขวางและขนาดของแบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยม (หน่วยมิลลิเมตร).....	55
4.10	ลักษณะและขนาดของแท่งหกเหลี่ยม และภาพตัดขวาง (หน่วยมิลลิเมตร).....	56
4.11	แบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยม.....	57
4.12	การเพิ่มขนาดแท่งหกเหลี่ยม.....	57
4.13	ลักษณะผิวของโนเม็กซ์ที่เคลือบฟีนอลิกเรซินที่ความเข้มข้น 33.7%.....	59
4.14	ลักษณะผิวของโนเม็กซ์ที่เคลือบฟีนอลิกเรซินที่ความเข้มข้น 25.28%.....	59
4.15	แผนภาพแสดงสภาวะในการทดลอง.....	60
4.16	โครงไม้สำหรับจุ่มเคลือบ โครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน.....	62
4.17	การวัดขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง.....	63
4.18	การทดสอบความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง.....	65
4.19	แผนภาพแสดงแนวแรงที่กดผ่าน โครงสร้างรังผึ้ง.....	67
4.20	ลักษณะการทดสอบความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้ง.....	68
5.1	ลูกกลิ้งเซาะร่อง.....	69
5.2	เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	70
5.3	ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว.....	71
5.4	โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย.....	73
5.5	ภาพขอบด้านบนของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย.....	73
5.6	เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย (ภาพด้านบน).....	74
5.7	โครงสร้างรังผึ้งขณะถูกดึงขยายด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย (ก่อนและหลัง).....	75
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน.....	76



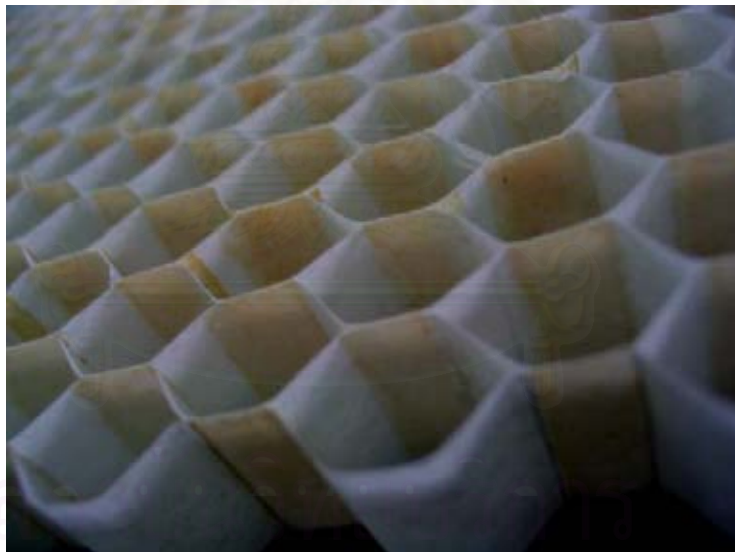
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของชิ้นงานตัวอย่างพีนอลิกเรซินที่ทาบน โนเม็กซ์จากการทดสอบด้วย DSC.....	78
5.10	โครงสร้างรังผึ้งหลังจากคิงขยายด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับคิงขยายแล้วปล่อยให้ไว้เป็นเวลาประมาณ 3 วัน.....	80
5.11	โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการอบอ่อนในโมลด์และแท่งหกเหลี่ยม.....	80
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งและจำนวนครั้งที่เคลือบพีนอลิกเรซิน.....	83
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดเฉลี่ยของโครงสร้างรังผึ้งและจำนวนครั้งที่เคลือบพีนอลิกเรซิน.....	85
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดและความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง.....	86
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงเฉือน และความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง.....	88
5.16	โครงสร้างรังผึ้งหลังจากทดสอบความทนแรงอัด.....	90
5.17	โครงสร้างรังผึ้งหลังจากทดสอบความทนแรงเฉือน.....	91
ง.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของอีพอกซีเรซิน YD582/TH7278 .....	100
ฉ.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของ โนเม็กซ์ที่เคลือบด้วยพีนอลิกเรซินกับจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบ .....	104
ช.1	ตัวอย่าง Load – deformation curve ของโครงสร้างรังผึ้งที่ทดสอบความทนแรงอัด.....	106

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 มวลเหตุจูงใจ

การพัฒนาทางด้านวัสดุ เพื่อให้ได้วัสดุสำหรับใช้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา มีมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน และเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมการยานพาหนะ เช่น เครื่องบิน รถยนต์ เรือ หรือแม้กระทั่งยานอวกาศ และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น หนึ่งในวัสดุโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา คือ วัสดุแกนรูปร่างรังผึ้ง (Honeycomb core material) หรือโครงสร้างรังผึ้ง (Honeycomb structure) ดังแสดงในรูปที่ 1.1





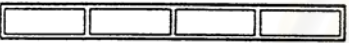

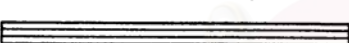
รูปที่ 1.1 โครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดหลาย ๆ เซลล์เชื่อมติดกัน ทำจากแผ่นวัสดุบาง ๆ นำมาเชื่อมติดกันบางส่วน ส่วนมากเซลล์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า สามารถผลิตได้จากวัสดุที่เป็น

แผ่นได้มากกว่า 500 ชนิด โครงสร้างรังผึ้งถูกนำมาใช้เป็นวัสดุแกน (Core material) ในโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure)

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ของโครงสร้างแซนวิชที่ใช้โครงสร้างรังผึ้งประกอบเป็นแกน กับวัสดุแกนชนิดอื่น ๆ ที่มีความหนาและน้ำหนักเท่ากัน จากตารางพบว่า โครงสร้างรังผึ้งทำให้โครงสร้างแซนวิชมีทั้งค่าความแข็งแรงและความแข็งตึงมากกว่าวัสดุแกนชนิดอื่น ๆ [1]

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบความแข็งแรงและความแข็งตึงของโครงสร้างที่เป็นวัสดุแกนชนิดต่าง ๆ กัน [1]

<i>Design</i>	<i>Relative strength</i>	<i>Relative stiffness</i>
 Honeycomb sandwich	100%	100%
 Foam sandwich	26%	68%
 Structural extrusion	62%	99%
 Sheet and stringer	64%	86%
 Plywood	3%	17%

อุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยยังต้องนำเข้าโครงสร้างรังผึ้งจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการโครงสร้างรังผึ้ง โดยพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากแผ่นวัสดุประเภทโนเม็กซ์ (Nomex®) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ โครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ประมาณ 10 มิลลิเมตร และความหนาแน่นน้อยกว่า 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะถูกผลิตโดยวิธีเชื่อมแบบใช้กาว (Adhesive bonding) โดยกาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) สำหรับการทากาวจะทาในแนวขวางกับแผ่นโนเม็กซ์ เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ และวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งใช้วิธีการผลิตแบบดิงขยาย (Expansion process) โดยศึกษาสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ใช้

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบ่มโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย (Honeycomb before expansion) และคุณสมบัติของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ ซึ่งก็คือ ความหนาแน่น ความทนแรงอัด (Compressive strength) และความทนแรงเฉือน (Shear strength)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวเพื่อผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย
2. เพื่อทดลองผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบาโดยมีความหนาแน่นน้อยกว่า 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งเพื่อออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวเพื่อผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายจะใช้แผ่นวัสดุประเภทโพลีเอทิลีน หนา 0.05 มิลลิเมตร (50  $\mu\text{m}$ ) โดยวิธีการผลิตแบบดึงขยาย
2. ชนิดของกาวที่ศึกษาคือ กาวประเภทอีพอกซี
3. ศึกษาอุณหภูมิและเวลาการบ่มที่เหมาะสมของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย
4. คุณสมบัติของโครงสร้างรังผึ้งที่จะศึกษา คือ ความหนาแน่น ความทนแรงอัด และความทนแรงเฉือน

## บทที่ 2

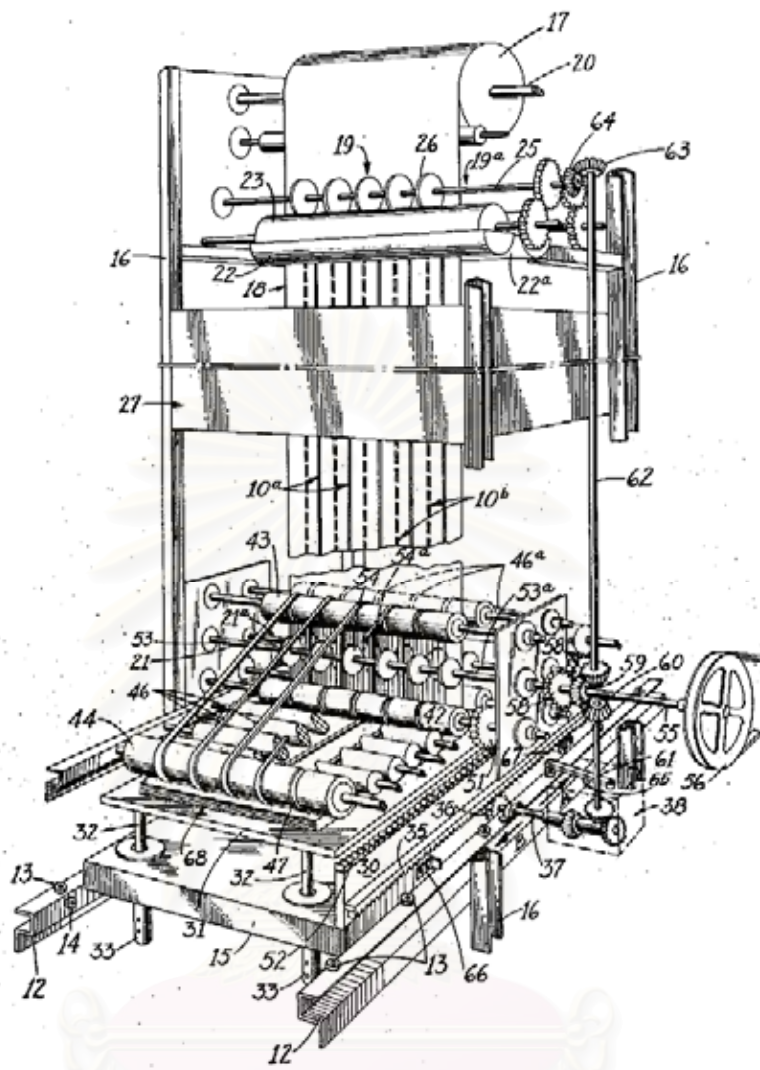
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

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

Roger C. Steel (1952) บริษัท California Reinforced Plastic Company ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตและเครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No. 2,610,934) [3] เพื่อใช้ในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุเนื้ออ่อน และทำให้โค้งตัวได้โดยไม่เสียรูป เช่น กระดาษ แผ่นอลูมิเนียมบาง และเส้นใย เป็นต้น เครื่องจักรในสิทธิบัตรนี้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งโดยเริ่มจากทาแนวกาวบนแผ่นวัสดุ แผ่นวัสดุจะผ่านลูกกลิ้งทากาว ซึ่งเป็นลูกกลิ้งหลายๆ อันเรียงกันบนแกนหมุน และจุ่มอยู่ในถาดใส่กาว แกนหมุนลูกกลิ้งสำหรับทากาวนี้มีทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นวัสดุ ทากาวเป็นแนวนานกับความยาวของแผ่นวัสดุที่ส่งมาจากม้วนอย่างต่อเนื่อง ความกว้างของลูกกลิ้ง และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแต่ละอันตามแนวขวาง ถูกออกแบบให้สัมพันธ์กับขนาดของเซลล์ที่ต้องการ โดยแนวกาวด้านหน้าและหลังแผ่นวัสดุจะสลับกันตามตำแหน่งของโครงสร้าง เมื่อแผ่นวัสดุผ่านลูกกลิ้งทากาวแล้วจะผ่านไปใต้ตาอบเพื่อทำให้กาวแห้ง แผ่นวัสดุตามความยาวที่ต้องการจะถูกวางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ไปเรื่อยๆ ด้วยกลไกที่ประกอบด้วยเฟืองจำนวนมาก ก็จะได้โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว



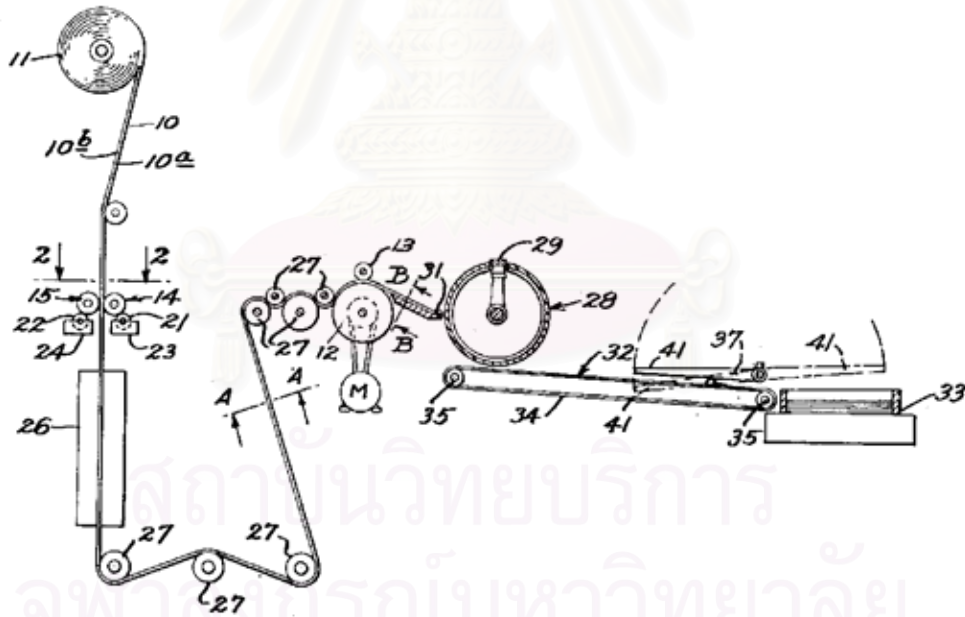


รูปที่ 2.1 เครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No. 2,610,934 [3]

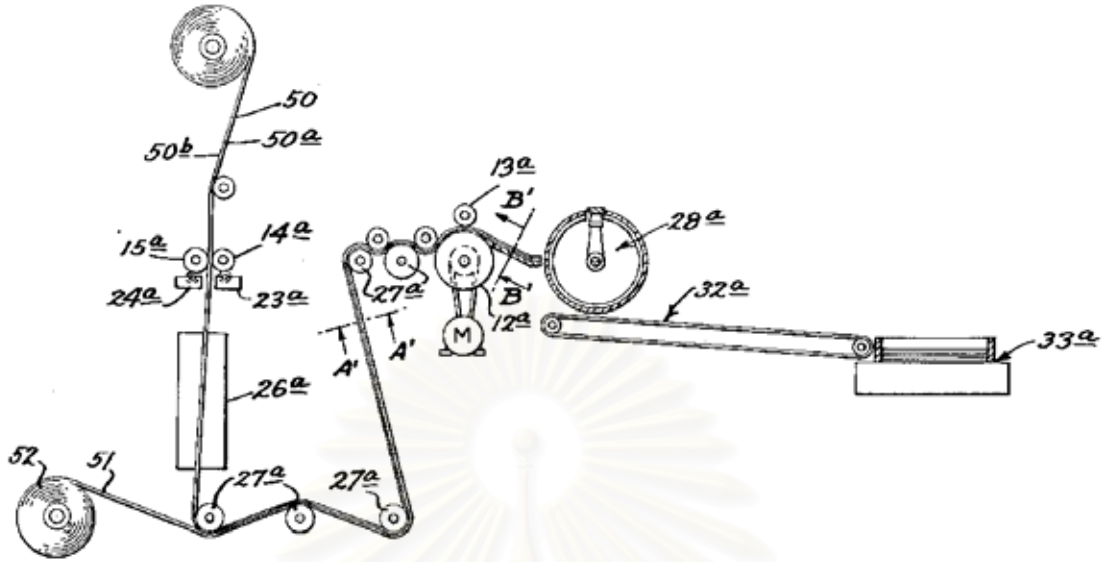
ในปี ค.ศ. 1956 Roger C. Steel ในนามของบริษัท Hexcel Products Inc. California ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.2,734,843) [4] โดยปรับปรุงการผลิตโครงสร้างรังผึ้งในส่วน  
ของโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว โดยเสนอ 3 วิธีการ แต่ละวิธีการประกอบด้วยขั้นตอนหลักเหมือนกัน  
คือ การทอแนวทอบนแผ่นวัสดุ การตัดแผ่นวัสดุ และนำไปวางซ้อนติดกัน

ในสิทธิบัตรนี้เสนอวิธีผลิตวิธีที่ 1 ดังนี้ แผ่นวัสดุจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องจากม้วนแผ่นวัสดุไปยังลูกกลิ้งเล็ก ๆ ที่จุ่มอยู่ในถาดใส่กาว ซึ่งเป็นลูกกลิ้งหลาย ๆ ลูกอยู่บนแกนหมุน แกนหมุนลูกกลิ้งสำหรับทากาวนี้มีทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นวัสดุ ทากาวเป็นแนวขนานกับความยาวของแผ่นวัสดุที่ส่งมาจากม้วน โดยทาทั้ง 2 ด้านตามแนวขนานกับแผ่นวัสดุ (ลักษณะลูกกลิ้งทากาวนี้คล้ายกับสิทธิบัตรวิธีการผลิตและเครื่องจักรในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง หมายเลข 2,610,934 ที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ [3]) แผ่นวัสดุที่ทากาวแล้วจะผ่านไปยังเตาอบ เพื่อให้กาวแห้งในระดับหนึ่งก่อนจะผ่านลูกกลิ้งไปยังลูกกลิ้งที่ติดใบมีด ตัดแผ่นวัสดุตามความยาวที่ต้องการ แล้ววางซ้อนกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว

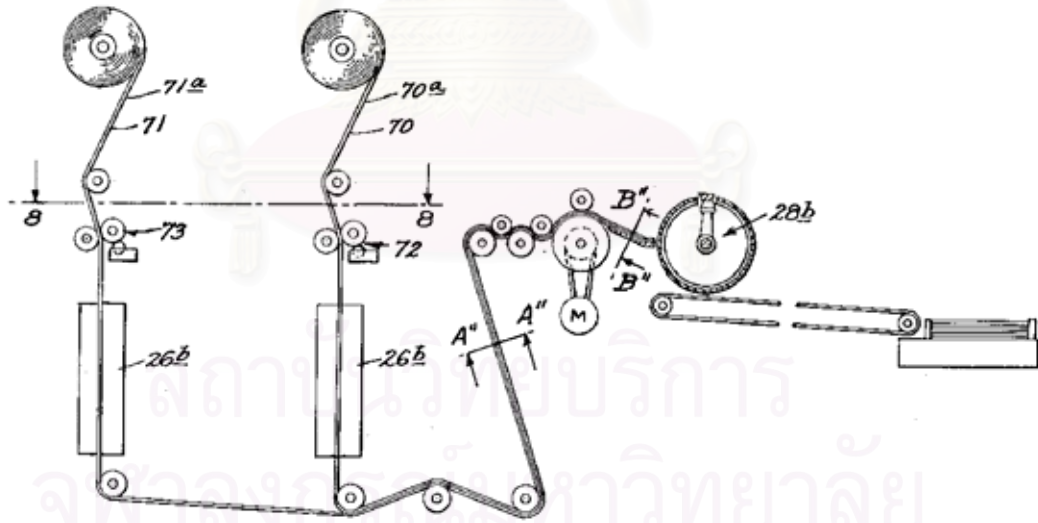
วิธีที่ 2 แตกต่างจากวิธีที่ 1 คือ เมื่อแผ่นวัสดุผ่านการทากาว และเตาอบแล้ว จะนำไปติดกับแผ่นวัสดุอีกแผ่นหนึ่งที่ไม่ได้ทากาว ก่อนที่จะนำไปตัดแล้วซ้อนเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว ส่วนวิธีที่ 3 แผ่นวัสดุ 2 แผ่นแยกกันผ่านลูกกลิ้งทากาว โดยทาแผ่นละด้าน ผ่านเข้าเตาอบแล้วนำมาติดกันก่อน แล้วจึงนำไปตัดและซ้อนเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว



รูปที่ 2.2 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 1 [4]



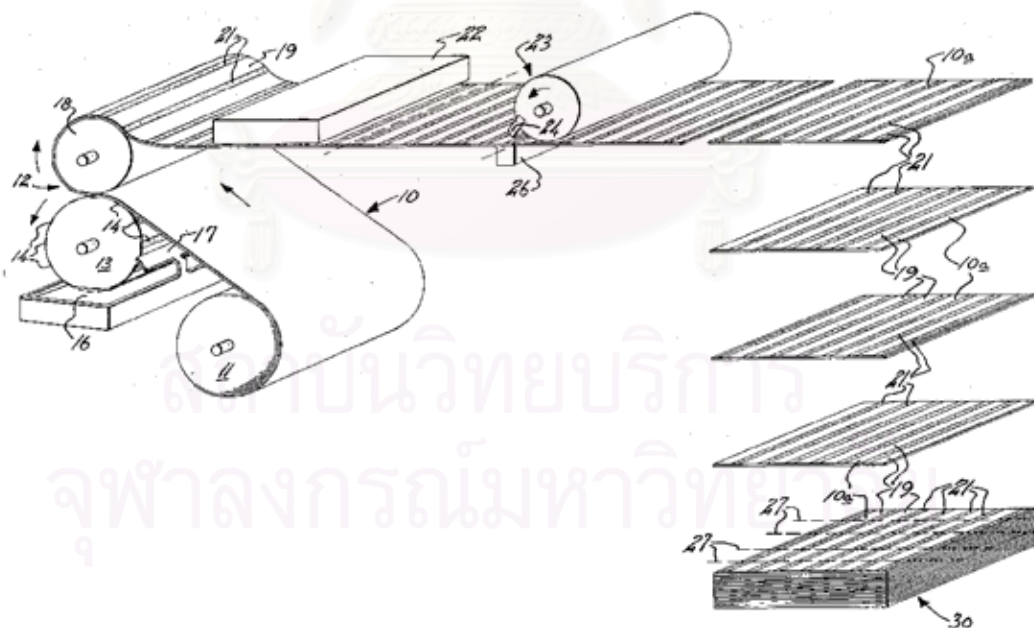
รูปที่ 2.3 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 2 [4]



รูปที่ 2.4 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,734,843 วิธีที่ 3 [4]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1961 บริษัท Hexcel Products Inc. ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No. 2,983,640) [5] โดยอ้างอิงถึงสิทธิบัตร US Patents No.2,610,934 [3] และ US Patents No.2,734,843 [4] ซึ่งในสิทธิบัตรนี้มีความแตกต่างจากเดิมในส่วนของคุณลักษณะการทากาว เปลี่ยนเป็นแบบตามขวางกับแผ่นวัสดุ เนื่องจากในวิธีการเดิมจะทากาวขนานกับความยาวของแผ่นวัสดุ ซึ่งทำให้ขนาดของโครงสร้างรังผึ้งถูกจำกัดด้วยความกว้างของแผ่นวัสดุ การเปลี่ยนแนวในการทากาวเป็นตามขวางนี้ มีผลให้โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีขนาดยาวได้มากขึ้นไม่จำกัด นอกจากนี้ในแนวยาวของแผ่นวัสดุนี้จะมีค่าความแข็งแรงทั้งแบบเฉือน (Shear) และแบบโค้ง (Flexural) มากกว่าในแนวขวาง

สิทธิบัตรนี้เสนอวิธีการทาแนวกาวโดยใช้ลูกกลิ้งทรงกระบอก ซึ่งมีความยาวเท่ากับความกว้างของแผ่นวัสดุ ลูกกลิ้งจะถูกเซาะร่องยาวไปตามความยาวของทรงกระบอก ความกว้างแต่ละร่องออกแบบให้สัมพันธ์กับระยะห่างของแนวกาว และขนาดเซลล์ที่ต้องการ ลูกกลิ้งนี้จุ่มอยู่ในถาดใส่กาว และหมุนเพื่อทาแนวกาวบนแผ่นวัสดุ จากนั้นผ่านเข้าเตาอบ และถูกตัดด้วยลูกกลิ้งที่ติดใบมีด แล้ววางซ้อนติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว หนึ่งวิธีในการทาแนวกาวและติดแผ่นวัสดุมี 3 วิธีเหมือนในสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.2,734,843) [4] ที่ได้กล่าวถึงก่อนนี้



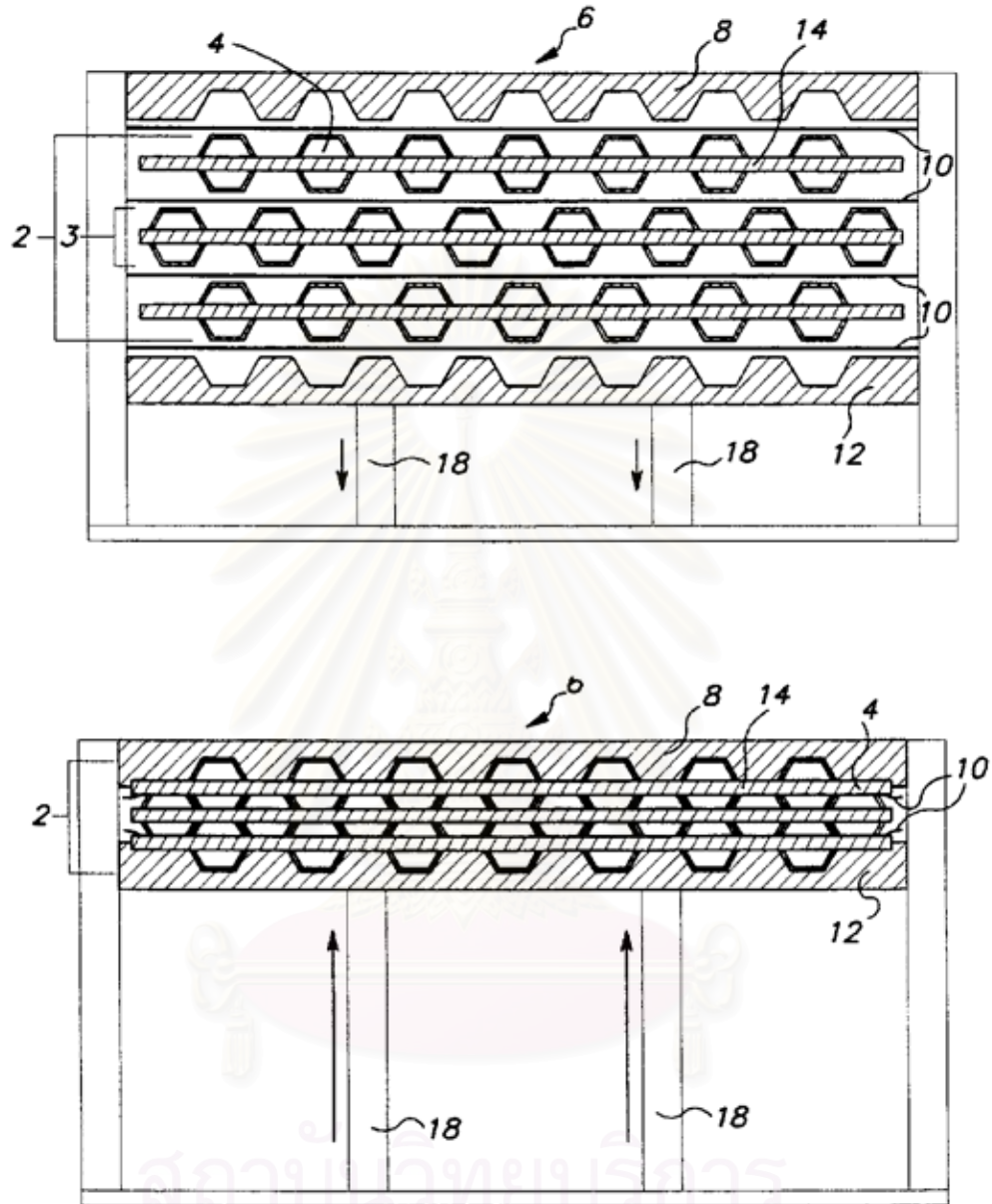
รูปที่ 2.5 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.2,983,640 [5]

H. Freeman Seebo บริษัท Seeton Technologies ได้จดสิทธิบัตรเครื่องมือและวิธีสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.5,354,394) [6] ในปี ค.ศ. 1994 เครื่องมือในการผลิตประกอบด้วยแกนให้ความร้อนที่เป็นรูปหกเหลี่ยมหลาย ๆ แท่งเชื่อมต่อกันบนแกนให้ความร้อนเป็นแถวยาว โดยระหว่างแท่งเหล็กแต่ละอันจะมีระยะห่างเท่ากับด้านของหกเหลี่ยม ซึ่งแถวของแท่งเหล็กหกเหลี่ยมนี้จะมีหลาย ๆ แถว เรียงกันเป็นชั้น ๆ ในแถวที่ติดกันนั้น รูปหกเหลี่ยมจะถูกเรียงสลับกัน โดยหกเหลี่ยมจะอยู่ที่บริเวณที่ว่างของแถวด้านบน สลับกันไปเรื่อย ๆ ในแต่ละแถว แผ่นวัสดุที่จะผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งจะถูกนำมาใส่คั่นระหว่างแต่ละแถว จากนั้นแต่ละแถวจะถูกกดให้ติดกัน และให้ความร้อนผ่านแกนให้ความร้อนและไปสู่รูปหกเหลี่ยม แผ่นวัสดุในแต่ละแถวบริเวณที่ใกล้กันจะถูกเชื่อมติดกันด้วยความร้อน จะได้เป็นโครงสร้างรังผึ้ง โดยวัสดุที่ใช้จะต้องทนต่ออุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่น พรีเพ็ก (Prepregs) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และ โนเม็กซ์ (Nomex®) เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.6 เครื่องมือและวิธีสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างรังผึ้ง US Patents No.5,354,394 [6]

Doyle G. Dixon (1995) บริษัท Hexcel Corporation ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยการเชื่อมติดด้วยความร้อน (US Patents No.5,421,935) [7] โดยเสนอวิธีและเครื่องสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งแผ่นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกแต่ละแผ่นจะถูกเชื่อมติดด้วยความร้อน เฉพาะแนวที่ต้องการเชื่อมติด ทีละชั้น ซ้อนทับกันไปเรื่อย ๆ เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สามารถผลิตด้วยวิธีนี้ได้แก่ โพลียูรีเทน (Polyurethane) ไวนิล (Vinyl) โพลีพรอพิลีน (Polypropylene) และโพลีเอทิลีน (Polyethylene) เป็นต้น

วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระยะเวลาหลังวิธีการผลิตมุ่งไปในด้านวิธีผลิตโครงสร้างรังผึ้งเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตตามขนาดที่ต้องการ และมีรูปทรงที่แม่นยำมากขึ้น ดังเช่นในปี ค.ศ. 2003 Richard A. Lewis บริษัท Northrop Grumman Corporation ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งประกอบแต่งชั้นสูง ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แม่นยำ สำหรับการประยุกต์ใช้กับยานอวกาศ (US Patents No.6,579,404) [8] ในสิทธิบัตรนี้ แผ่นวัสดุประกอบแต่งจะถูกใส่ในระหว่างแบบหล่อรูปครึ่งหกเหลี่ยมตัวผู้ และตัวเมีย เพื่อทำให้แผ่นวัสดุมีรูปทรงครึ่งหกเหลี่ยมที่แม่นยำ ก่อนที่จะนำไปเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้ง

Jean Pierre Maumus (2004) ได้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง (US Patents No.6,830,718) [9] โดยเสนอวิธีผลิตโครงสร้างรังผึ้งในส่วนการขยายโครงสร้างรังผึ้งหลังการเชื่อมติดแล้ว โดยใช้หมุดที่ขยายตัวได้หลาย ๆ อัน ใส่ในแต่ละเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งขนาดของหมุดมีขนาดเล็กกว่าขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง และทำจากวัสดุที่ขยายตัวได้ เช่น ซิลิโคน (Silicone) และโลหะ เป็นต้น โดยหมุดเหล่านี้จะถูกติดตั้งจากอยู่บนแผ่นเรียบ เมื่อใส่หมุดเข้าไปในโครงสร้างรังผึ้งแล้ว หมุดจะถูกทำให้ขยายตัวออกด้วยความร้อนจนเต็มเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง และการขยายตัวของหมุดนี้ จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ผิวด้านในเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ทำให้ผิวเซลล์เรียบขึ้นด้วย

ในปัจจุบันการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจะใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการผลิต มีความซับซ้อนและทำงานแบบอัตโนมัติ แต่เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานในการผลิตยังเหมือนกับ 50 ปีที่ผ่านมา และขั้นตอนการผลิตส่วนใหญ่ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งทุกวันนี้ เมื่อบริษัทที่ผลิตโครงสร้างรังผึ้งมีเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์โครงสร้างรังผึ้งมีน้อยลง เป็นเหตุให้วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งถูกปกปิดเป็นความลับเพื่อการแข่งขันด้านการตลาด [10]

## 2.2 การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้ง

John Leslie Cawse บริษัท Hexcel Corporation ได้จดสิทธิบัตรการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้งด้วยการเคลือบอนุภาค (US Patents No.6,117,518) [11] ในปี ค.ศ. 2000 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุที่ไม่ถักทอ เช่น กระดาษกราฟท์ (Craft paper) ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbonfiber) เป็นต้น โดยเคลือบด้วยเรซินที่ประกอบด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งดิ่งของโครงสร้างรังผึ้ง โดยไม่ลดสมบัติด้านความทนการอัด (Compressive strength)

อนุภาคพอลิเมอร์ที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงแก่โครงสร้างรังผึ้งทำจากวัสดุประเภทเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) อีพอกซี เป็นต้น และ/หรือ เทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิโอเลฟิน (Polyolefin) พอลิเอไมด์ (Polyamide) และพอลิเอสเทอร์ (Polyester) เป็นต้น อนุภาคจะถูกผสมในเรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งในปริมาณ 0.1 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อนุภาคมีขนาดระหว่าง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร

J.E. Shafizadeh and J.C. Seferis (2000) [10] ศึกษาความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง โดยหาตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัด และการใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้ง โดยเปรียบเทียบฟีนอลิกเรซินเกรดการค้ำ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1600 กรัมต่อโมล และฟีนอลิกเรซินแบบจำลอง (Model phenolic resin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 350 กรัมต่อโมล ซึ่งทั้ง 2 ชนิดมีความหนืดประมาณ 2 – 3 เซนติสโตกส์ (Centistokes) (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) จากการทดสอบสมบัติด้านแรงอัด พบว่าโครงสร้างที่ใช้ฟีนอลิกเรซินชนิดแบบจำลองมีค่าความทนแรงอัดมากกว่าชนิดเกรดการค้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งในฟีนอลิกเรซินทั้ง 2 ชนิด ความทนแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบ แต่จะไม่เพิ่มขึ้นอีกหลังจากจุ่มเคลือบเกิน 10 ครั้ง

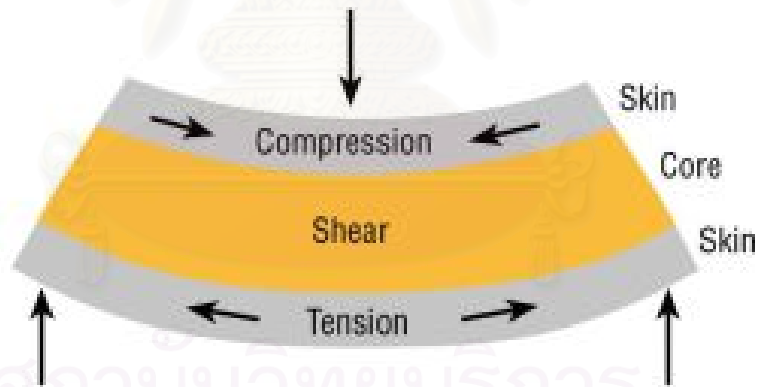
### บทที่ 3

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 3.1 โครงสร้างรังผึ้ง

วัตถุประสงค์สำคัญของการใช้วัสดุแกน (Core material) ในวัสดุประกอบ (Composite) คือเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุ ในขณะที่น้ำหนักของวัสดุเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

รูปที่ 3.1 แสดงการรับโหลด (Load) ของวัสดุแกนที่ถูกเคลือบเป็นชั้น ๆ (Laminated) ด้วยแผ่นวัสดุด้านบนและด้านล่าง โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า โครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) เทียบได้กับโครงสร้างของเหล็กแบบไอบีเอ็ม (I-beam) ภายใต้โหลดลักษณะนี้ แผ่นวัสดุด้านบนจะรับแรงอัด (Compression) ส่วนแผ่นวัสดุด้านล่างจะรับแรงดึง (Tension) และวัสดุแกนที่อยู่ตรงกลางจะรับแรงเฉือน (Shear) ในการนี้สมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุแกน ก็คือ ความทนแรงเฉือน (Shear strength) และความแข็งแรง [12]



รูปที่ 3.1 วัสดุแกนที่ถูกกลามิเนตภายใต้โหลด (Load) [12]

วัสดุแกนมีหลายชนิด ที่พบส่วนใหญ่คือ วัสดุประเภทโฟม ไม้ และโครงสร้างรังผึ้ง โฟมเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้ทำเป็นวัสดุแกนมาก โฟมสามารถผลิตได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์หลายชนิด ตัวอย่างเช่น โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foam) โฟมพีวีซี (PVC foam) โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene foam) เป็นต้น และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 30 – 3,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

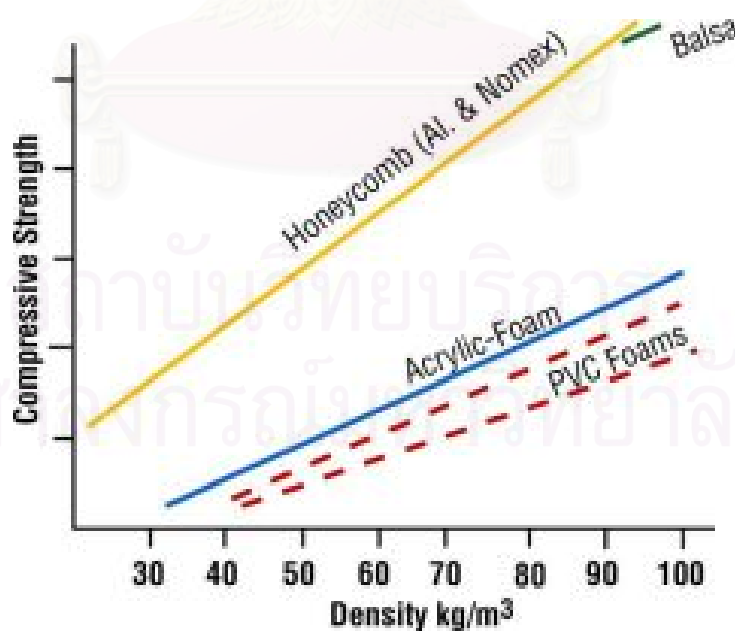
โดยช่วงความหนาแน่นที่นิยมใช้อยู่ระหว่าง 40 - 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนความหนาแน่นมีตั้งแต่ 5 ถึง 50 มิลลิเมตร [12]

แผ่นไม้สามารถใช้เป็นวัสดุแกนได้ เนื่องจากในโครงสร้างธรรมชาติของเนื้อไม้มีลักษณะคล้ายกับหกเหลี่ยม เมื่อนำมาใช้ในโครงสร้างแซนวิช เกรน (Grain) ในเนื้อไม้จะตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัสดุ ซึ่งจะให้สมบัติคล้ายกับโครงสร้างรังผึ้ง ข้อเสียของวัสดุแกนประเภทไม้ คือ มีความหนาแน่นมาก การนำไปใช้จะต้องปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ด้วยสารเคมีก่อน นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านความชื้น และอาจเกิดการเน่าเสียขึ้นได้ ถ้าไม่ผ่านการลามีเนตด้วยเรซินก่อน ไม้ที่นิยมใช้เป็นวัสดุแกนคือ ไม้บัลซา (Balsa) และไม้ซีดาร์ (Cedar) [12]

โครงสร้างรังผึ้งสามารถผลิตได้จากวัสดุหลายชนิด ตั้งแต่วัสดุประเภทกระดาษสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ต่ำ สำหรับการใช้ในงานที่มีโหลดน้อย เช่น ประตูภายในอาคาร เป็นต้น ส่วนโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและความแข็งตึงสูง และน้ำหนักเบา ๆ นั้นใช้สำหรับยานอวกาศ เป็นต้น [12]

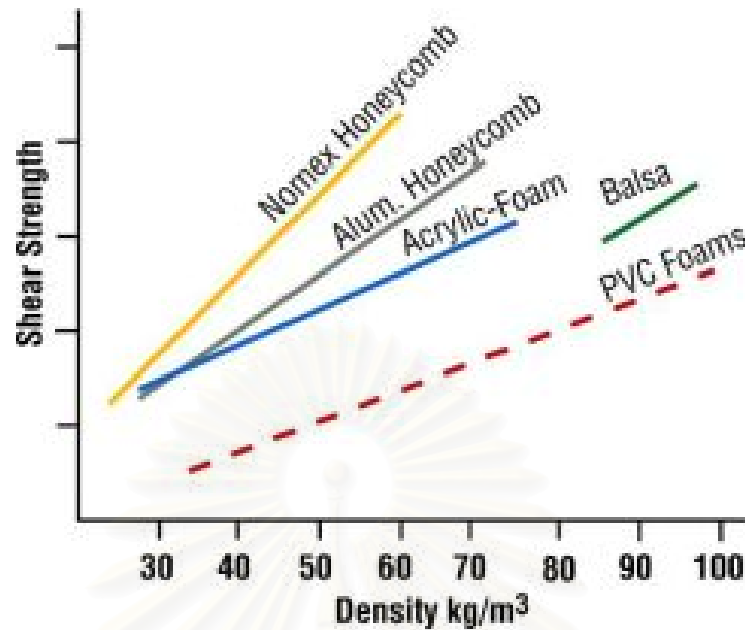
ข้อดีของโครงสร้างรังผึ้งที่เด่นชัดที่สุดคือ มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงมาก มีความต้านทานการล้า (Fatigue resistance) และไม่มีปัญหาโค้งงอ (Buckling problem) [12]

รูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) และความทนแรงเฉือน (Shear strength) ของวัสดุแกนประเภทต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน [12]



รูปที่ 3.2 ความทนแรงอัดของวัสดุแกนประเภทต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน [12]

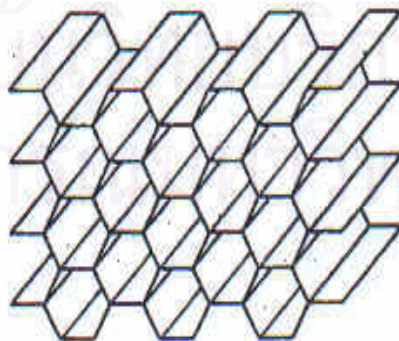




รูปที่ 3.3 ความทนแรงเฉือนของวัสดุแกนประเภทต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน [12]

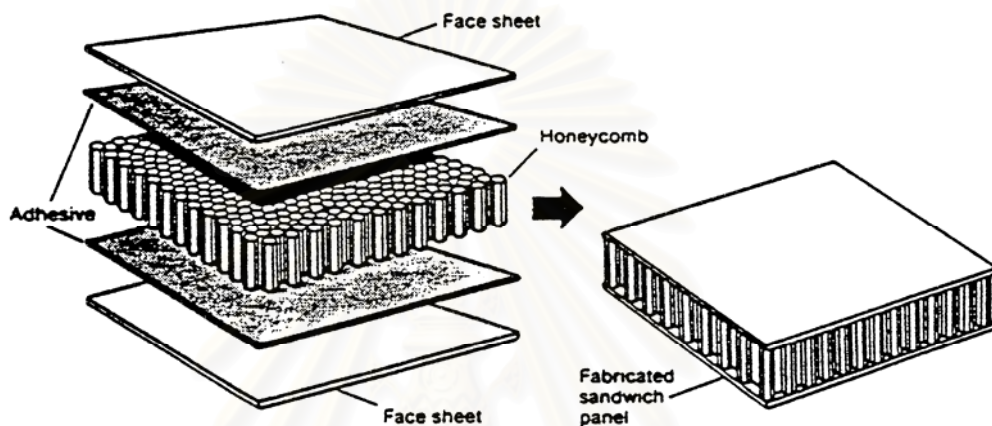
### 3.1.1 ความเป็นมาของโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งประกอบด้วยเซลล์เปิดหลาย ๆ เซลล์เชื่อมติดกัน ทำจากแผ่นวัสดุบาง ๆ เชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 3.4 ส่วนมากเซลล์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า โครงสร้างรังผึ้งสามารถผลิตจากวัสดุที่เป็นแผ่นบางได้มากกว่า 500 ชนิด โครงสร้างรังผึ้งที่ใช้เป็นวัสดุแกน เริ่มแรกผลิตจากกระดาษคราฟท์ ในปี ค.ศ. 1905 ในประเทศเยอรมัน [1]



รูปที่ 3.4 โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า [1]

ใน ค.ศ. 1919 ได้เริ่มมีโครงสร้างแซนวิชใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบิน และระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 และ 2 โครงสร้างรังผึ้งถูกใช้ในอุตสาหกรรมทหาร จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1945 ได้เริ่มมีโครงสร้างแซนวิชซึ่งทำจากอลูมิเนียมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบินอย่างแพร่หลาย รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างแซนวิช ซึ่งประกอบด้วยแผ่นวัสดุบาง และกาวด้านบนและล่าง และโครงสร้างรังผึ้งอยู่ตรงกลาง [1]



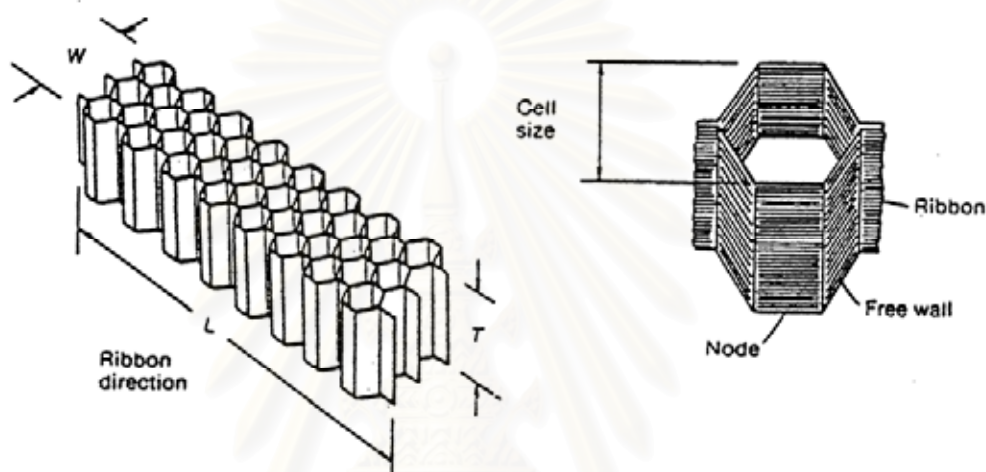
รูปที่ 3.5 โครงสร้างแซนวิช [13]

### 3.1.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างรังผึ้ง และคำจำกัดความ [1]

วัสดุประเภทโครงสร้างรังผึ้งมีศัพท์ที่ใช้เรียกส่วนประกอบ และคำจำกัดความสำหรับเรียกส่วนประกอบต่าง ๆ โดยเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

1. เซลล์ (Cell) - หน่วยของโครงสร้างรังผึ้ง
2. ขนาดเซลล์ (Cell size) - ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง เป็นระยะตั้งฉากระหว่างส่วนที่เชื่อมติดกัน (วัดในด้านกว้าง)
3. ส่วนที่เชื่อมติดกัน (Node) - บริเวณของผนังเซลล์ที่เชื่อมติดกันระหว่างแต่ละเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง
4. ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน (Free wall) - บริเวณของผนังเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ไม่เชื่อมติดกับแผ่นอื่นของเซลล์ข้างเคียง

5. ด้านยาว (L direction or ribbon direction) – ด้านยาวของโครงสร้างรังผึ้งตามแนวแผ่นวัสดุ
6. ด้านกว้าง (W direction) – ด้านของโครงสร้างรังผึ้งที่ถูกดึงขยายออก หรือด้านที่ตั้งฉากกับด้าน L
7. ด้านสูง (T direction) – ความสูงของโครงสร้างรังผึ้ง



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของโครงสร้างรังผึ้ง [1]

### 3.1.3 วัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้ง [1]

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โครงสร้างรังผึ้งผลิตได้จากวัสดุแผ่นมากมาย ทั้งโลหะและอโลหะ วัสดุแผ่นประเภทโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมิเนียม สแตนเลส และไททานเนียม เป็นต้น ส่วนประเภทอโลหะ ได้แก่ ไฟเบอร์กลาส คาร์บอนไฟเบอร์ โนเม็กซ์ และกระดาษกราฟท์ เป็นต้น นอกจากนี้ วัสดุที่ใช้ผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งในบางครั้งก็ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และใยหิน เป็นต้น

การเลือกใช้วัสดุในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้งานเป็นหลัก ปัจจุบันโลหะที่นิยมนำมาผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ได้แก่ อลูมิเนียม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเครื่องบินและยานอวกาศ เช่น ในโครงสร้างเครื่องบินโบอิง 747 เป็นต้น วัสดุอีกประเภทที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ไฟเบอร์กลาส และอะรามิด (Aramid) โดยเฉพาะในโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา

ทนการผุกร่อน ทนน้ำ และความแข็งแรงสูง เช่น ยานพาหนะ อุปกรณ์กีฬา และอุปกรณ์กีฬาทางน้ำ เป็นต้น

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากอลูมิเนียมจะมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดหากต้องการ โครงสร้างรังผึ้งที่มีน้ำหนักและราคาต่ำ ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากโพลีเอทิลีนและเทอร์โมพลาสติกจะมีความเหนียวและทนทานมากที่สุด โครงสร้างรังผึ้งที่มีราคาต่ำที่สุดคือโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากกระดาษกราฟที่เกรดการค้า

### 3.1.4 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งในอุตสาหกรรม [1]

#### 3.1.4.1 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามลักษณะการเชื่อมติดกันของแผ่นวัสดุ

เมื่อพิจารณาลักษณะการเชื่อมติดกันของแผ่นวัสดุที่ใช้ผลิต โครงสร้างรังผึ้ง สามารถแบ่งวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง ได้เป็น 5 วิธี ได้แก่

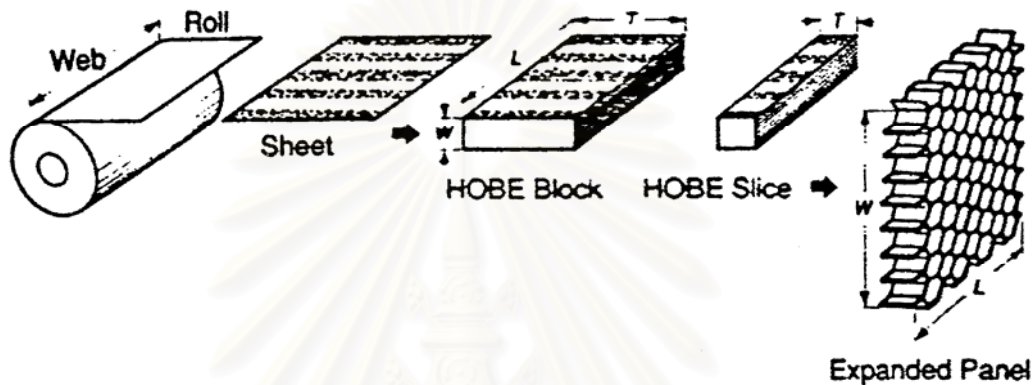
1. การเชื่อมแบบใช้กาว (Adhesive bonding)
2. การเชื่อมแบบใช้ความต้านทาน (Resistance welding)
3. การเชื่อมบัดกรี (Brazing)
4. การเชื่อมแบบการแพร่ (Diffusion bonding)
5. การเชื่อมแบบใช้ความร้อน (Thermal fusion)

วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การเชื่อมแบบใช้กาว ประมาณ 95% ของโครงสร้างรังผึ้งทั้งหมดผลิตด้วยวิธีนี้ เช่น โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากอลูมิเนียม โพลีเอทิลีน ไฟเบอร์กลาส และกระดาษกราฟ เป็นต้น กาวที่ใช้ส่วนมากคือ อีพอกซี ฟีนอลิก และพอลิเอไมด์ สำหรับวิธีการเชื่อมแบบใช้ความต้านทาน การเชื่อมบัดกรี และการเชื่อมแบบการแพร่นั้นจะใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่นำไปใช้กับอุณหภูมิสูง หรือในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ซึ่งการผลิตด้วยวิธีเหล่านี้จะมีราคาแพงมาก วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกบางชนิดจะผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งด้วยวิธีการเชื่อมแบบใช้ความร้อน โดยวัสดุบริเวณที่จะเชื่อมติดกันจะถูกหลอมด้วยความร้อน แล้วกดให้วัสดุ 2 แผ่นเชื่อมติดกัน

#### 3.1.4.2 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบ่งตามการเปลี่ยนแผ่นวัสดุเป็นโครงสร้างรังผึ้ง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โครงสร้างรังผึ้งจะผลิตมาจากวัสดุที่เป็นแผ่นบาง ๆ ดังนั้น เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเปลี่ยนแผ่นวัสดุเป็นโครงสร้างรังผึ้ง สามารถแบ่งวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งได้ 2 วิธี ได้แก่

1. การผลิตแบบดิ่งขยาย (Expansion process) วิธีผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบบเชื่อมติดกันด้วยกาวส่วนมากจะใช้วิธีการผลิตแบบดิ่งขยาย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 วิธีการผลิตเริ่มจากการทาแนวกาว (Adhesive lines) บนแผ่นวัสดุตามแนวที่จะเชื่อมติดกัน แล้วนำไปวางซ้อนติดกันเป็นตั้ง ที่เรียกว่า โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว หรือ HOBE (Honeycomb Before Expansion) จากนั้นนำไปบ่ม แล้วนำมาดิ่งขยายเป็นโครงสร้างรังผึ้งตามแบบที่ต้องการ

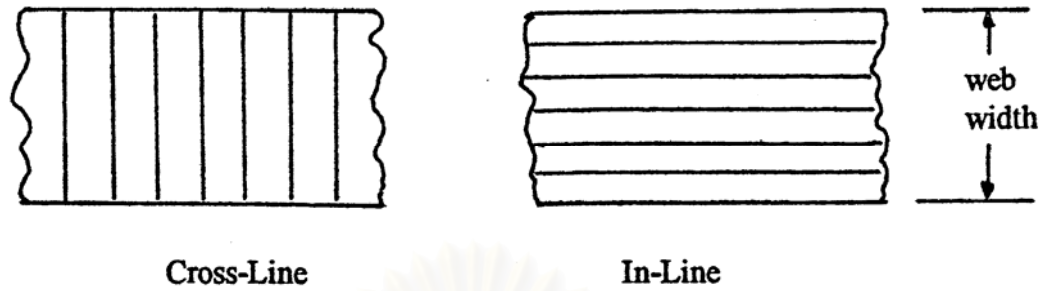


รูปที่ 3.7 วิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งแบบดิ่งขยาย [14]

สำหรับวัสดุประเภทโลหะจะไม่สามารถคงรูปได้ทั้งหมดหลังจากดิ่งขยายแล้ว จะต้องนำไปคงรูปโดยใช้ความร้อน (Heat-set) เพื่อให้โครงสร้างรังผึ้งไม่คืนรูปบางส่วน กลับไปเป็นโครงสร้างก่อนขยายตัวอีก นอกจากนี้โครงสร้างรังผึ้งบางชนิด เช่น โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากกระดาษ หรืออะรามิด เป็นต้น ต้องนำมาเคลือบด้วยเรซินและนำไปบ่มอีกครั้งเพื่อให้วัสดุคงรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งเรซินที่นิยมใช้เคลือบ คือ ฟีนอลิก และพอลิเอไมด์ การเคลือบและบ่มเรซินจะถูกทำซ้ำจนกว่าจะได้รับความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งตามที่ต้องการ โดยทั่วไปจะทำซ้ำประมาณ 2 – 3 ครั้ง

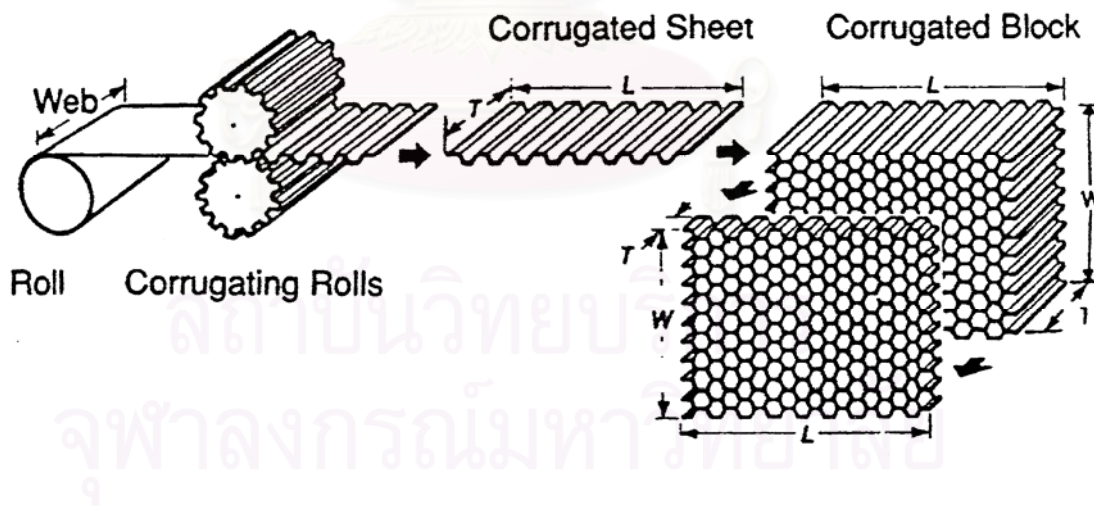
รูปที่ 3.8 แสดงการทาแนวกาวบนแผ่นวัสดุ แนวกาวที่จะเชื่อมติดกันสามารถทาบนแผ่นวัสดุได้ทั้งแบบตามขวางแผ่นวัสดุ และตามยาวแผ่นวัสดุ ในการทาแนวกาวแบบตามขวางแผ่นวัสดุนั้น ขนาดของโครงสร้างรังผึ้งจะไม่ถูกจำกัดด้วยความกว้างของแผ่นวัสดุ ซึ่งแตกต่างจากการทาแนวกาวตามยาวแผ่นวัสดุ ขนาดของโครงสร้างรังผึ้งจะถูกจำกัดด้วยความกว้างของแผ่นวัสดุ ซึ่งมีความสำคัญต่อการผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดใหญ่





รูปที่ 3.8 การทำแนวทาบบนแผ่นวัสดุ แบบตามขวางแผ่นวัสดุ และตามยาวแผ่นวัสดุ [1]

2. การผลิตแบบทำให้เป็นรอยย่น (Corrugation process) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 วิธีการผลิตแบบนี้เป็นวิธีดั้งเดิม ใช้แรงงานในการผลิตมาก แต่ยังคงใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งประเภทโลหะ และประเภทโลหะบางชนิดที่ต้องการความหนาแน่นสูงๆ ที่ยากต่อการดึงขยาย วัสดุที่นิยมใช้กับการผลิตวิธีนี้ ได้แก่ อลูมิเนียม และสแตนเลส เป็นต้น



รูปที่ 3.9 วิธีการผลิตโครงสร้างรูปร่างแบบทำให้เป็นรอยย่น [1]

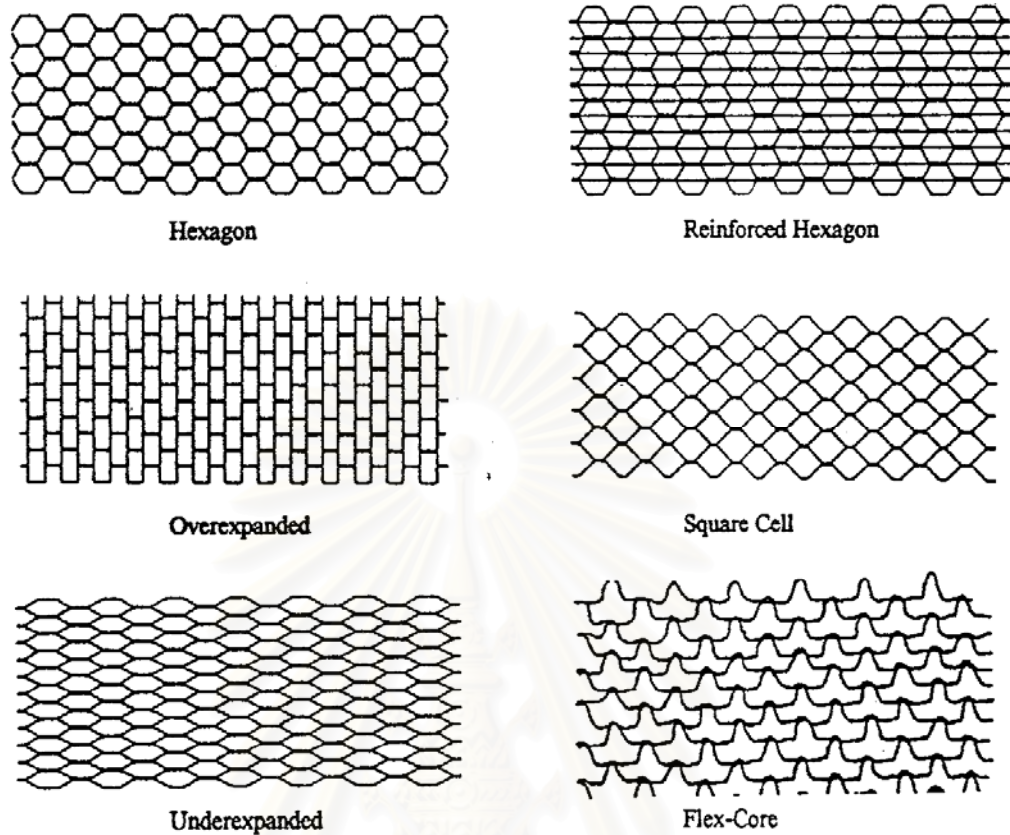


ในวิธีการผลิตแบบทำให้เป็นรอยย่นนี้ เริ่มแรกแผ่นวัสดุจะถูกนำมาขึ้นรูปเป็นรอยย่นก่อน จากนั้นจะทากาวในบริเวณที่จะเชื่อมติด นำแต่ละแผ่นมาวางซ้อนติดกัน แล้วนำไปบ่ม เนื่องจากการเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งนั้นสามารถใช้แรงกดได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้กาวมีความหนามากกว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีดึงขยาย โดยทั่วไปโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีนี้มีน้ำหนักกาวประมาณ 10 % ของน้ำหนักโครงสร้างรังผึ้งทั้งหมด ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตด้วยวิธีดึงขยายมีน้ำหนักกาวประมาณ 1 % (หรือน้อยกว่า) ของน้ำหนักโครงสร้างรังผึ้งทั้งหมด

สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะบางชนิดที่ผลิตด้วยวิธีนี้อาจใช้วิธีการเชื่อมติดกันด้วยวิธีการเชื่อมแบบใช้ความต้านทาน การเชื่อมบัดกรี และการเชื่อมแบบการแพร่ แทนการเชื่อมติดด้วยกาวก็ได้

### 3.1.5 รูปแบบเซลล์

โดยพื้นฐานรูปแบบเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะเป็นแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Hexagon) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) และแบบยืดหยุ่น (Flex) นอกจากนี้ยังมีรูปแบบเซลล์ชนิดอื่น ๆ อีก ได้แก่ แบบ Overexpanded Underexpanded และโครงสร้างรังผึ้งแบบเสริมแรง (Reinforced) รูปแบบต่าง ๆ ของเซลล์มีแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รูปแบบเซลล์ชนิดต่าง ๆ [1]

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวิธีเชื่อมติดด้วยกาวส่วนใหญ่มีรูปเซลล์แบบหกเหลี่ยม ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวิธีการเชื่อมแบบใช้ความดันทาน และการเชื่อมบัดกรี จะมีรูปเซลล์แบบสี่เหลี่ยม ซึ่งมีส่วนที่เชื่อมติดกันแคบ โครงสร้างรังผึ้งแบบ Overexpanded ก็คือโครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมที่มีการดึงขยายที่มากขึ้นจนกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะทำให้โครงสร้างรังผึ้งสามารถใช้งานในลักษณะที่ดัดโค้งเป็นแบบทรงกระบอกได้ง่าย เพราะโครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมนั้นทำให้เป็นรูปร่างที่โค้งได้ยาก ส่วนโครงสร้างรังผึ้งแบบโค้งใช้สำหรับงานที่ต้องการความโค้งมาก ๆ เช่น ใช้หุ้มวัสดุทรงกลมที่มีขนาดเล็กเท่าลูกเบสบอลได้ เป็นต้น โครงสร้างรังผึ้งแบบเสริมแรงจะมีแผ่นวัสดุเสริมระหว่างจุดที่เชื่อมติดกัน เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและสมบัติทางกล

### 3.1.6 ราคาของโครงสร้างรังผึ้ง [1]

โดยทั่วไปโครงสร้างรังผึ้งจะขายเป็นตารางเมตร และมีราคาต่างกันตามชนิดของโครงสร้างรังผึ้ง ปัจจัยที่มีผลต่อราคาของโครงสร้างรังผึ้งมีดังต่อไปนี้

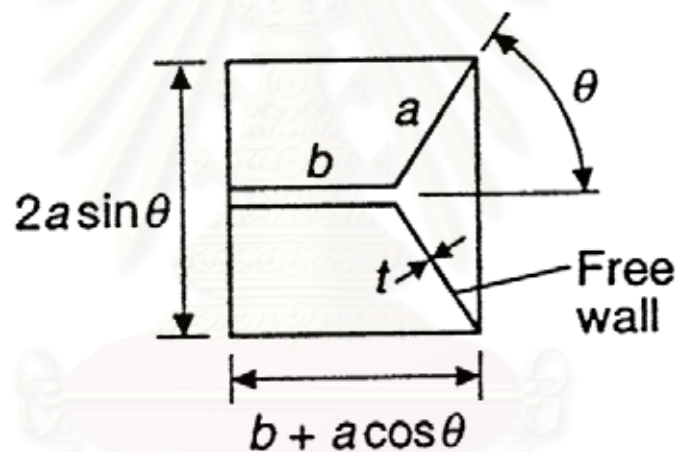
1. ปริมาณโครงสร้างรังผึ้งที่ซื้อ
2. ชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้ง
3. เกรดของโครงสร้างรังผึ้ง เช่น แบบการค้า แบบเฉพาะ เป็นต้น
4. ความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ของการตัดแบ่งความหนาของโครงสร้างรังผึ้ง ซึ่งมีค่ามาตรฐานเท่ากับ  $\pm 0.127$  มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่มีความหนาน้อยกว่า 102 มิลลิเมตร และ  $\pm 0.254$  มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่หนามากกว่า 102 มิลลิเมตร
5. ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง โดยทั่วไปหากโครงสร้างรังผึ้งมีขนาดเซลล์เท่ากัน โครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีราคาแพงกว่า
6. รูปแบบเซลล์ โครงสร้างรังผึ้งที่มีรูปแบบต่าง ๆ กันจะมีราคาต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยม โครงสร้างรังผึ้งแบบสี่เหลี่ยมจะมีราคาแพงกว่า โครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยม 1.25 เท่า แบบเสริมแรงแพงกว่า 1.75 เท่า และแบบยืดหยุ่นประมาณ 2 - 5 เท่า เป็นต้น

การเลือกใช้โครงสร้างรังผึ้งชนิดต่างๆ นอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลแล้ว สภาพแวดล้อมในการใช้งาน ดังเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ การซึมน้ำ ความทนต่อการถูกทำลาย ความต้านทานต่อการกระแทก เป็นต้น

### 3.1.7 ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งทางทฤษฎี [1]

เนื่องจากข้อดีที่เด่นชัดของโครงสร้างรังผึ้งในการนำไปใช้งานคือ เป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งจำเป็นที่จะต้องประเมินค่าความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่จะผลิตจากวัสดุชนิดนั้น ๆ ก่อน สูตรที่จะใช้คำนวณความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งแบบหกเหลี่ยมแสดงได้ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง} = \frac{[2(b+a)](t\rho)}{(b+a\cos\theta)(2a\sin\theta)} \quad (1)$$



รูปที่ 3.11 แสดงส่วนต่างๆ ของโครงสร้างรังผึ้ง [1]

ในรูปที่ 3.11 กำหนดให้

$a$  = ความยาวของส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน [mm]

$b$  = ความยาวของส่วนที่เชื่อมติดกัน [mm]

$\theta$  = มุมที่ขยายออก [องศา]

$t$  = ความหนาของแผ่นวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้ง [mm]

$\rho$  = ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้ง [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

## 3.2 วัสดุเริ่มต้นในการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

### 3.2.1 เส้นใย (Fiber)

แผ่นวัสดุชนิดเส้นใยที่นิยมใช้ประโยชน์ด้านความแข็งแรงมี 3 ชนิด คือ คาร์บอนไฟเบอร์ กลาสไฟเบอร์ และอะรามิด

คาร์บอนไฟเบอร์ หรือแกรไฟต์ (Graphite) มักผลิตจากเส้นใยอะคริลิก (Acrylic fiber) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ ในกระบวนการผลิตมีการให้ความร้อน 3 ขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนเส้นใยอะคริลิกเป็นเส้นใยคาร์บอน ขั้นแรกให้ความร้อนแก่เส้นใยอะคริลิกที่ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิไดซิงส์ ตามด้วยขั้นตอนที่ 2 ซึ่งให้ความร้อนแก่เส้นใยที่ถูกออกซิไดซ์นี้ในบรรยากาศเฉื่อยไปยังอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อะตอมไฮโดรเจนและไนโตรเจนจะถูกไล่ออกไป เหลืออะตอมคาร์บอนในรูปของวงแหวนหกเหลี่ยมจัดเรียงในเส้นใยที่ถูกดึงให้โมเลกุลเป็นระเบียบ สุดท้ายเส้นใยที่ถูกคาร์บอนไนซ์นี้จะถูกทำให้ร้อนไปที่อุณหภูมิ 3000 องศาเซลเซียสในบรรยากาศเฉื่อย เพื่อเพิ่มการจัดเรียงที่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนเป็นโครงสร้างผลึก คล้ายกับของแกรไฟต์ อะตอมเหล่านี้อยู่ในชั้นหรือระนาบที่ขนานซึ่งกันและกัน ระนาบถูกดึงเป็นระเบียบดีในทิศทางตามแกนเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเส้นใยคาร์บอนที่มีมอดูลัสสูง

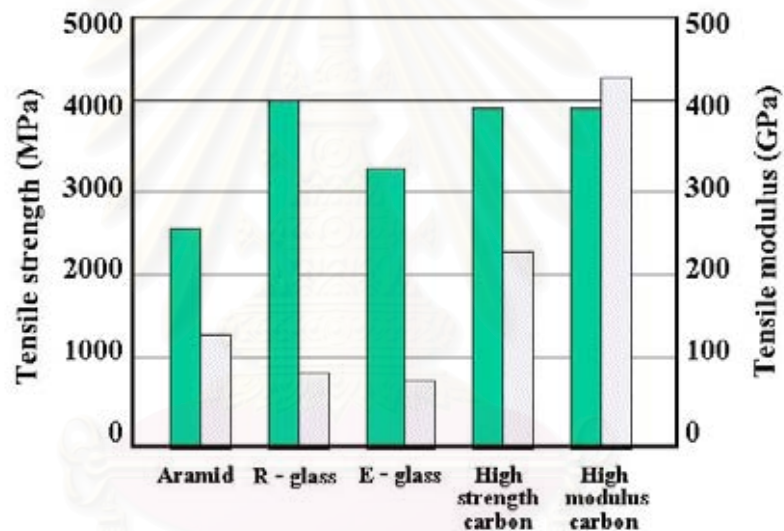
เส้นใยคาร์บอนมีสีดำ และผิวเรียบ มันวาว ไม่ติดไฟ เป็นเส้นใยที่มีค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งดึงสูง ใช้ผสมกับพอลิเมอร์เป็นวัสดุประกอบ (Composites) เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีราคาแพงมาก

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

สมบัติต่าง ๆ ของกลาสไฟเบอร์ไม่เหมือนกับของแก้วปกติ กลาสไฟเบอร์มีความทนแรงดึงดีกว่าแก้วปกติ กลาสไฟเบอร์อาจจะมีความทนแรงดึงได้สูงถึง 3,400 เมกะปาสคาล ความต้านทานต่อสารเคมีของกลาสไฟเบอร์จะลดลงจากของแก้วปกติ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของกลาสไฟเบอร์มีช่วงจากประมาณ 2.54 ถึง 25.4  $\mu\text{m}$

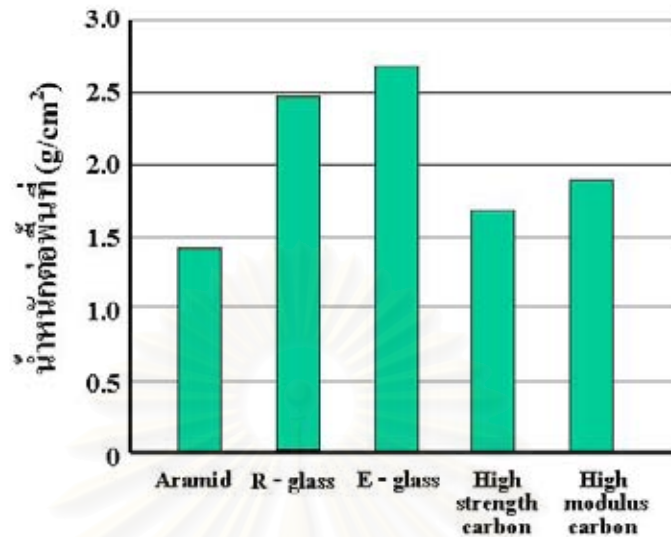
อะรามิดหรืออะโรเมติกพอลิเอไมด์ (Aromatic polyamide) เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงดีมาก ทนไฟ ไม่หลอมแต่จะไหม้เกรียมที่อุณหภูมิประมาณ 760 องศาเซลเซียส บริษัทดูปองท์ (DuPont) ผลิตเส้นใยอะรามิดที่มีชื่อทางการค้าว่า โนเม็กซ์ (Nomex®) ในปี ค.ศ. 1963 และชนิดที่มีชื่อทางการค้าว่า เคพลาร์ (Kevlar®) ในปี ค.ศ. 1973 [15]

แผ่นวัสดุชนิดเส้นใยแต่ละชนิดมีข้อดีและสมบัติแตกต่างกัน รูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14 เปรียบเทียบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัสแบบดึง (Tensile modulus) น้ำหนัก และราคา ของไฟเบอร์ทั้ง 3 ชนิด [16]

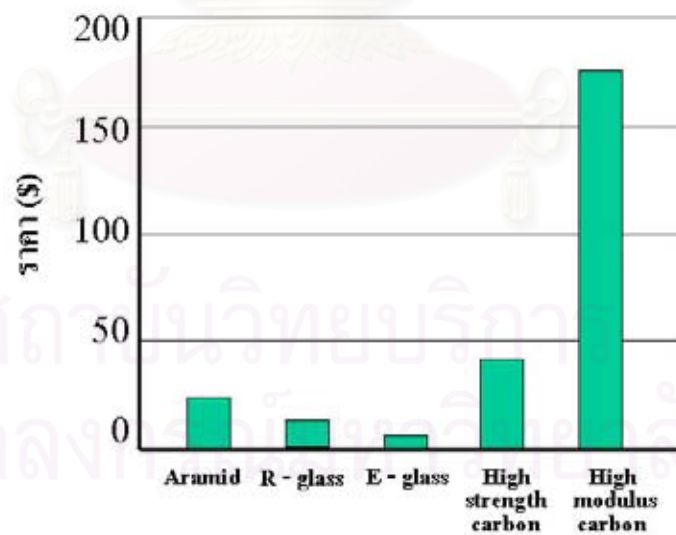


รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบความทนแรงดึง ■ มอดูลัสแบบดึง ▨ ของไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ [16]





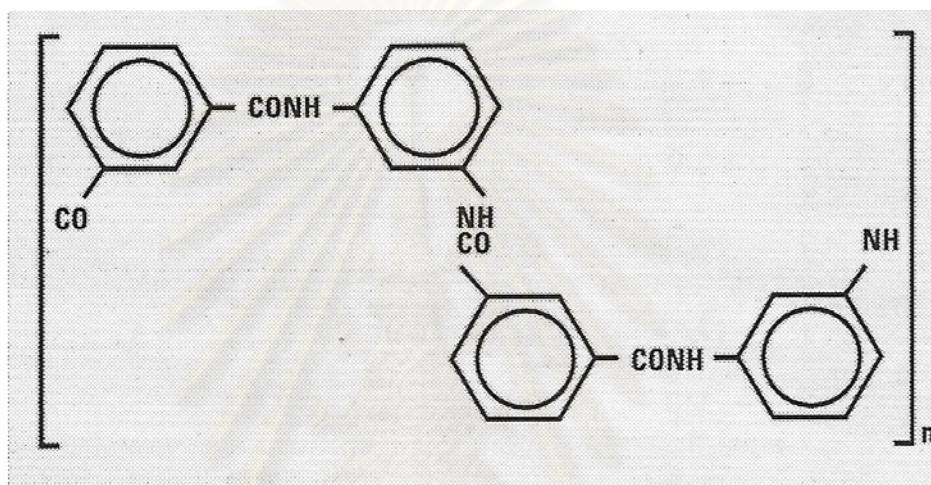
รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบน้ำหนักต่อพื้นที่ของไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ [16]



รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบราคาของไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ [16]

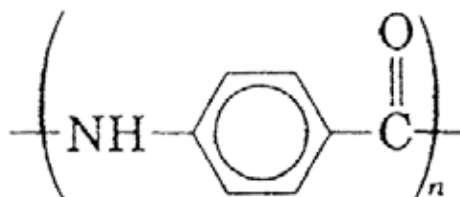
### 3.2.1.1 โนเม็กซ์

โนเม็กซ์ ผลิตขึ้นโดยบริษัท DuPont เป็นชื่อทางการค้าของพอลิเมอร์อะรามิด แบบ m-isomer หรือ poly (m-phenyleneisophthalamide) ซึ่งมีสมบัติเด่นคือ ไม่ติดไฟ และทนความร้อน สามารถคงสมบัติทางกายภาพได้แม้อยู่ในที่อุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียสได้เป็นเวลานาน สมบัติทนความร้อนและไม่ติดไฟนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น ฟอสฟอรัส เป็นต้น

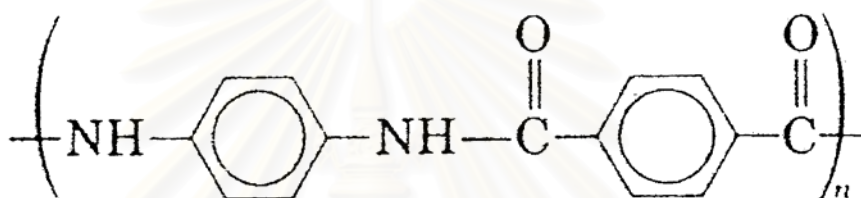


รูปที่ 3.15 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (m-phenyleneisophthalamide) [17]

อะรามิดแบบ p-isomer ชนิด poly (p-benzamide) ถูกผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1970 เพื่อใช้เป็นไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงใช้สำหรับเสริมความแข็งแรงให้กับยางรถยนต์ หลังจากนั้นไฟเบอร์ชนิดนี้ถูกแทนที่ด้วย poly (p-phenyleneterephthalamide) ในชื่อทางการค้าว่า เคปลาร์ (Kevlar®) ซึ่งเป็น ไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงและความแข็งดิ่งมาก [18]



รูปที่ 3.16 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p-benzamide) [18]

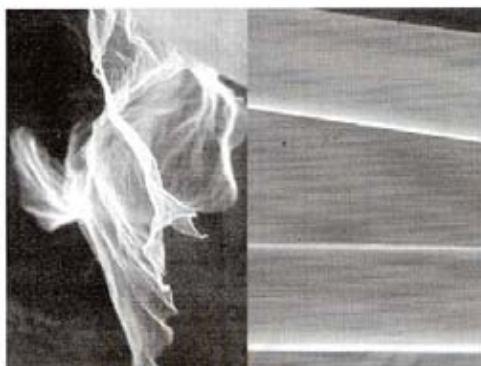


รูปที่ 3.17 โครงสร้างอะรามิดแบบ poly (p-phenyleneterephthalamide) [18]

### 3.2.1.2 การผลิตโนเม็กซ์ [17]

โนเม็กซ์ผลิตจากอะรามิดไฟเบอร์ 2 แบบ คือแบบไฟบริดส์ (Fibrids) ซึ่งได้จากเส้นใยอะรามิดที่ผ่านกระบวนการที่มีแรงเหวี่ยงสูง และแบบฟลอก (Floc) ซึ่งเป็นเส้นใยอะรามิดขนาดสั้น เส้นใยทั้ง 2 แบบจะถูกผสมกันในของเหลวที่ประกอบด้วยน้ำ เพื่อผลิตเป็นโครงสร้างแผ่นที่ต่อเนื่องกันตลอดในเครื่องผลิต ซึ่งคล้ายกับกระบวนการผลิตกระดาษ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.18 ลักษณะอะรามิดแบบไฟบริดส์ (ก) และแบบฟลอก (ข) [17]

ระหว่างกระบวนการผลิต อะรามิดไฟเบอร์แบบฟลอกซึ่งมีความยาวมากกว่าแบบไฟบริดส์ จะเรียงตัวในแนวตามทิศทางของแผ่นโนเม็กซ์ที่ถูกผลิตจากเครื่อง ซึ่งทำให้สมบัติของโนเม็กซ์ในทิศทางขวาง และทิศทางตามเครื่องจักรที่ผลิตนั้นมีค่าแตกต่างกัน

### 3.2.1.3 สมบัติของโนเม็กซ์ [17]

โนเม็กซ์เป็นวัสดุที่มีความเหนียว มีสมบัติเป็นฉนวนกันไฟฟ้าและความร้อน เมื่อถูกน้ำจะเกิดการอ่อนตัวน้อยมาก สามารถทนสารละลาย เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) คีโตน (Ketone) อะซีโตน (Acetone) โทลูอิน (Toluene) และไซลีน (Xylene) เป็นต้น มีค่า LOI (Limiting Oxygen Index) ประมาณ 27 - 32% ที่อุณหภูมิห้อง โดยขึ้นอยู่กับความหนาและความหนาแน่นของโนเม็กซ์ (วัสดุที่มีค่า LOI มากกว่า 20.8% เป็นสารที่ไม่ช่วยในการเผาไหม้) โนเม็กซ์สามารถทนความร้อนได้ถึงช่วงอุณหภูมิ 240 - 350 องศาเซลเซียส สมบัติเชิงกลของโนเม็กซ์ที่ความหนาต่าง ๆ มีแสดงในตารางที่ 3.1 [17]

ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลของโนเม็กซ์ [17]

Nominal thickness	(mil)	2	3	10	15	Test method
	(mm)	0.05	0.08	0.25	0.38	
Typical thickness	(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 <sup>2</sup> )		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 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

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.2 กาว (Adhesive)

โดยทั่วไปแล้วกาวสามารถอยู่ในรูปของของเหลว และของแข็ง ในรูปของของแข็ง กาวอาจเป็นผง แท่ง แผ่น หรือเป็นฟิล์มเคลือบ ส่วนในรูปของเหลว กาวอาจเป็นสารละลายอยู่ในตัวทำละลาย หรือเป็นกาวชนิด 2 ส่วน เป็นต้น กาวถูกใช้ได้หลายแบบ เช่น พ่น (Spray) ทาด้วยแปรง หรือลูกกลิ้ง หรือเทคนิคอื่น ๆ ชนิดของกาวแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กาวชนิดอนินทรีย์ และชนิดอินทรีย์ กาวชนิดอนินทรีย์มักมีโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) และแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ (Magnesium oxychloride) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งกาวชนิดนี้ไม่เหมาะกับการใช้เชื่อมโครงสร้าง

กาวชนิดอินทรีย์ แบ่งเป็นกาวธรรมชาติ และกาวสังเคราะห์ กาวธรรมชาติได้จากสัตว์ หรือพืช ตัวอย่างเช่น อัลบูมิน (Albumin) โปรตีน และอนุพันธ์เซลลูโลส เป็นต้น ซึ่งใช้กับวัสดุพวก กระดาษ และไม้

ส่วนกาวอินทรีย์สังเคราะห์ แบ่งได้เป็นเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ และเทอร์โมเซต ตัวอย่างของกาวประเภทเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ พอลิเอไมด์ พอลิเอทิลีน และอนุพันธ์ของพอลิไวนิล เป็นต้น ส่วนกาวอีลาสโตเมอร์มักประกอบด้วยยาง เช่น SBR (Styrene - butadiene rubber) ABS (Acrylonitrile - butadiene - styrene) และซิลิโคน เป็นต้น

กาวประเภทเทอร์โมเซต มีตัวอย่างเช่น อีพอกซี ฟีนอลิก ยูเรีย เมลามีน พอลิเอสเทอร์ และพอลิยูรีเทน เป็นต้น เรซินเหล่านี้ต้องทำให้เกิดการบ่ม หรือการเชื่อมโยง (Cross - linking) เพื่อทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ละลายไม่ได้ หลอมเหลวไม่ได้

โดยทั่วไป กาวประเภทเทอร์โมเซตมีราคาแพงกว่ากาวชนิดอื่น แต่ความแข็งแรงด้านการเชื่อมต่อ และความแข็งแรงด้านการคืบ (Creep strength) มีค่ามากกว่า กาวชนิดนี้ส่วนมากใช้ในส่วนประกอบที่แบกรับโหลด โดยเฉพาะในส่วนประกอบที่มีเรซินชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น อีลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถผสมกับเทอร์โมพลาสติกเพื่อเพิ่มความเหนียว ความทนต่อการลอก (Peel strength) และความทนแรงกระแทก (Impact resistance) [19]

#### 3.2.2.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

อีพอกซีที่ถูกใช้เป็นกาว ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงเมื่อใช้เชื่อมวัสดุจำพวกโลหะ เทอร์โมพลาสติก สารประกอบแต่งเทอร์โมเซต และเชื่อมโลหะกับพลาสติก ด้วยความก้าวหน้าในการพัฒนาสูตรทางเคมีในปัจจุบัน ทำให้อีพอกซีมีความเหนียว ซึ่งทำให้เหมาะ

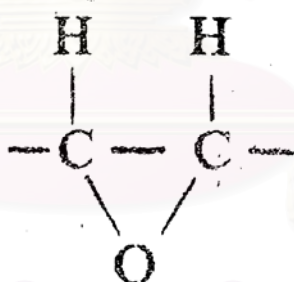


สำหรับวัสดุประเภทสารประกอบแต่ง พลาสติกที่เสริมความแข็งแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และวัสดุที่นำไปใช้ในสภาวะที่มีการสั่นสะเทือน เป็นต้น อีพอกซีที่มีความเหนียวนี้ทำให้การยึดติดในสภาวะที่รุนแรงมีเวลายาวนานขึ้นด้วย [20]

### 3.2.2.2 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน

ปริมาณของอีพอกซีเรซินที่ถูกผลิตขึ้นนั้น แม้ว่าจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิเอทิลีน หรือพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น แต่ความหลากหลายของเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้อีพอกซีทำให้อีพอกซีเรซินมีบทบาทสำคัญมากกว่าเรซินชนิดอื่น ๆ อีพอกซีสามารถใช้เป็นกาว สี วานิช สารเคลือบ และอื่น ๆ อีกมาก นอกจากนี้ อีพอกซียังสามารถถูกใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น แบบร้อน แบบเย็น ฟัน ทาด้วยลูกกลิ้ง เป็นต้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้ประยุกต์ใช้อีพอกซีได้หลากหลาย [19]

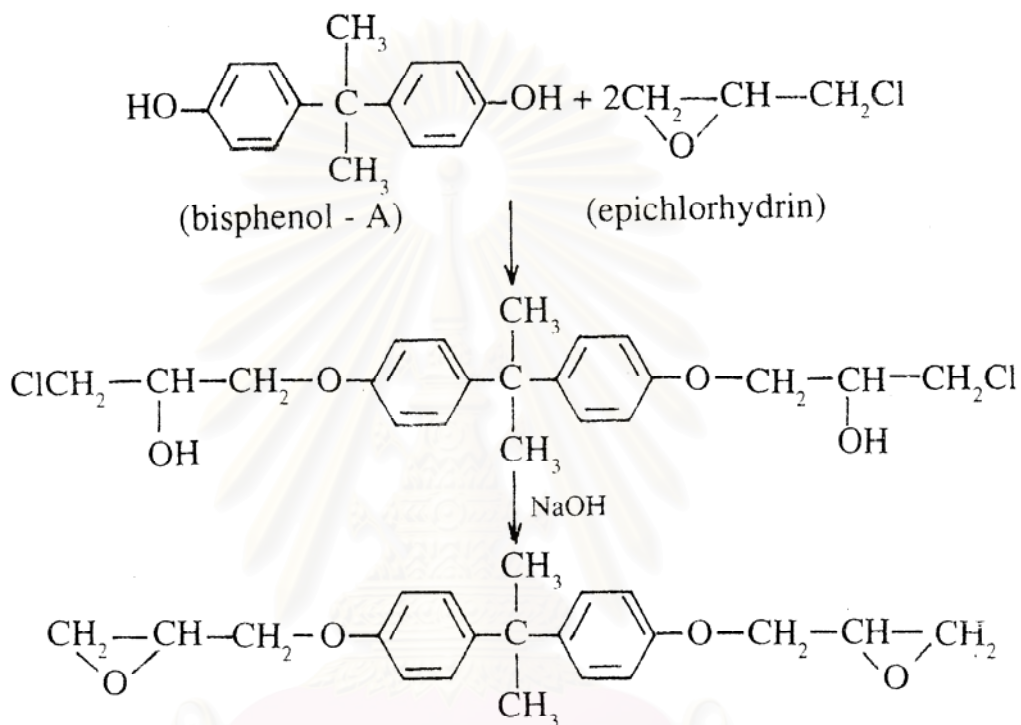
อีพอกซี หรืออีพอกไซด์เรซินมีหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide) หรือออกซิเรน (Oxirane) อยู่ในโครงสร้าง หมู่อีพอกซีว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากเนื่องจากวงแหวนเปิดออกได้ง่าย [15]



รูปที่ 3.19 หมู่อีพอกไซด์ [21]

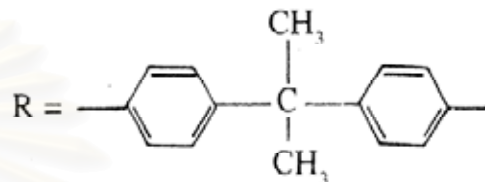
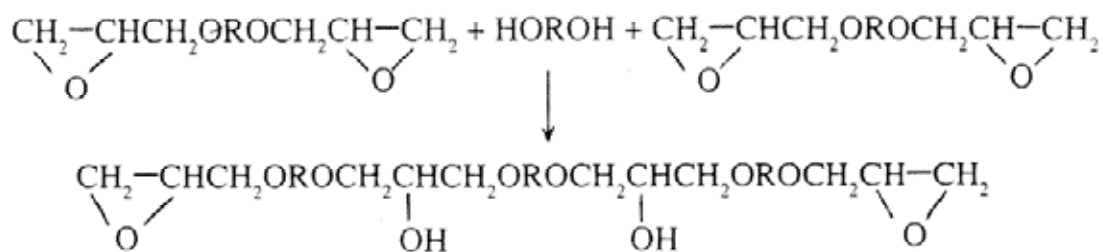
อีพอกซีเรซินเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างได - หรือพอลิไฮดรอกฟีโนล กับ อีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin) พอลิไฮดรอกฟีโนลที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ บิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) และอีพิฮาโลไฮดรินที่สำคัญในทางการค้า คือ อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin)

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

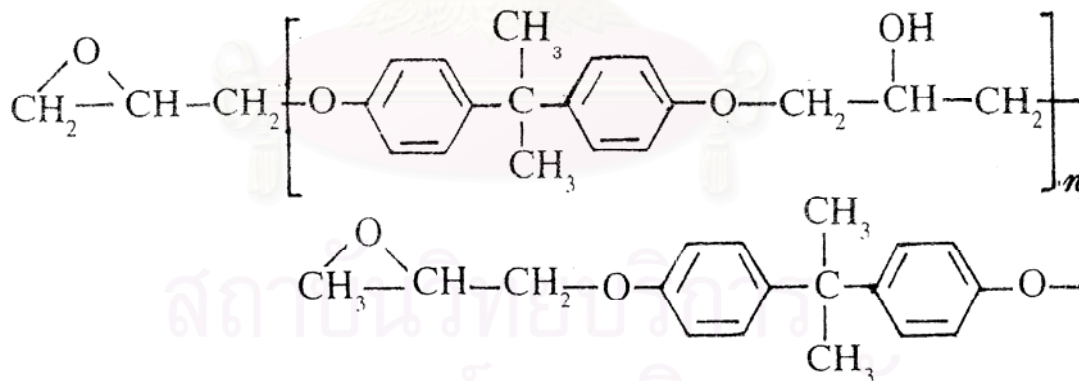


ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นแรก จะทำปฏิกิริยากับบิสฟีนอล เอ ต่อไป ทำให้วงอีพอกซี (Epoxy ring) เปิดออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ปฏิกิริยาจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนถึงขั้นของพอลิเมอร์ และเนื่องจากปลายโซ่ ทั้ง 2 ข้างจะสิ้นสุดด้วยหมู่อีพอกซี ดังนั้นปฏิกิริยานี้จะต้องมีอีพิกโลโรไฮดรินเหลือเพื่อ [25] โครงสร้างของอีพอกซีเรซินแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 โครงสร้างของอีพอกซีเรซิน [22]

บิสฟีนอล เอ นั้นเตรียมได้จากฟีนอลกับอะซีโตน ดังนั้นอักษร A ในคำ Bisphenol A จึงหมายถึงอะซีโตนนั่นเอง 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 [15]

### 3.2.2.3 สมบัติของอีพอกซีเรซิน [22]

อีพอกซีเรซิน มีสมบัติเด่นดังนี้

1. อีพอกซีเรซินมีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อต่างทั้งหลาย เพราะโมเลกุลไม่มีหมู่เอสเทอร์ (Ester) ที่จะถูกสะพอนิฟาย (Saponified) ได้ มีแต่พันธะอีเทอร์ และพันธะคาร์บอน – คาร์บอนเท่านั้น
2. อีพอกซีเรซินมีสมบัติยึดกับผิวหน้าต่าง ๆ ได้ดี เพราะโซ่พอลิเมอร์มีปริมาณของหมู่ที่มีขั้วสูง นอกจากนี้การมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกันอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุล จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี เป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโซ่สูง
3. อีพอกซีเรซินมีความแข็งแรง และอ่อนตัว ไม่เปราะ การที่โมเลกุลมีหมู่อะโรมาติกอยู่บนโซ่ ทำให้โซ่แข็ง ดังนั้นจึงทำให้อีพอกซีเรซินทนความร้อนได้ดี ในขณะที่เดียวกันการที่โซ่มีพันธะเดี่ยว จึงทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการหมุน (Rotation) รอบ ๆ พันธะเดี่ยวได้ จึงทำให้อีพอกซีเรซินมีความอ่อนตัวดี ไม่เปราะ
4. หมู่อีพอกซีเรซินและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุลทำให้อีพอกซีเรซินสามารถเกิดพอลิเมอไรเซชัน หรือเกิดการบ่มต่อไป ทำให้ได้เป็นโครงสร้าง 3 มิติที่แข็งแรงทนทาน และใช้ประโยชน์ได้ดี

### 3.3 วิธีการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินในอุตสาหกรรม

#### 3.3.1 การเคลือบผิว (Coating) [22]

เทคโนโลยีของสารเคลือบผิวได้มีมานานแล้วโดยเริ่มพัฒนาจากเทคโนโลยีของสี ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว มีการใช้สารยึด (Binder) มากมายหลายชนิด ขึ้นกับภาวะของการใช้งาน และสภาพสิ่งแวดล้อม

##### 3.3.1.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว

วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ และสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีได้มากขึ้น และอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยงามของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิว อาจมาจากสี จากความเงา จากลวดลายตกแต่ง หรือจากความสว่าง หรือจากทั้งหมดรวมกัน

##### 3.3.1.2 ประเภทของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. สี (Paint) หมายถึง สารที่มีส่วนผสมของผงสี สารยึด หรือสิ่งนำสี (Vehicle) ตัวทำละลาย และสารเติมแต่ง

สารยึด หรือสิ่งนำสี คือสารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าไว้ด้วยกันให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึด เช่น ประเภทน้ำมันแห้งเร็ว ประเภทเรซินธรรมชาติ ได้แก่ ชันสน เป็นต้น ประเภทเรซินสังเคราะห์ ได้แก่ อลคิดเรซิน ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

ตัวทำละลาย มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสี เพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้ ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

2. วาร์นิช (Vanish) คือ สารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว
3. แล็กเกอร์ (Lacquer) ได้แก่ สารละลายซึ่งได้จากการนำเรซินหรือสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

### 3.3.1.3 การเกิดฟิล์ม

การเปลี่ยนสภาพจากสารเคลือบผิวในภาชนะบรรจุ ไปเป็นฟิล์มที่ยึดติดแน่นกับผิว และทำให้พื้นผิวมีความทนทานเพิ่มขึ้นคือ กระบวนการการเกิดฟิล์ม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. แอปพลิเคชัน (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้าหรือทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่มก็ได้
2. ฟิกเซชัน (Fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่น ไม่หลุดออกจากผิวหน้าและไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวที่มีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ การเกิดเป็นฟิล์มในขั้นฟิกเซชัน จะเกิดโดยการระเหยออกของตัวทำละลาย
3. การบ่ม (Curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยใช้แสง ความร้อน หรืออากาศ

### 3.1.3.4 การแห้งของสารเคลือบผิว

โดยทั่วไป สารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่าง ๆ กันได้ 2 แบบ คือ

1. แห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ การแห้งด้วยวิธีการนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (Secondary bond) อย่างอ่อน ๆ
2. แห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวด้วยวิธีนี้ ยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะแข็งแรง และทนทานต่อตัวทำละลาย



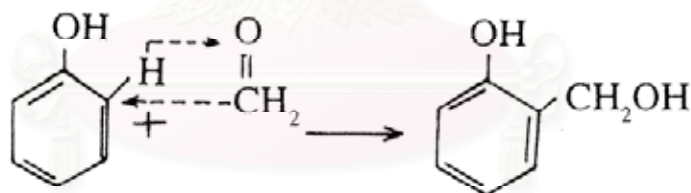
### 3.3.2 ฟีนอลิกเรซิน

ฟีนอลิกเรซินเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบกลั่นตัว (Condensation polymerization) ซึ่งโมเลกุลที่หลุดออกมาจากกระบวนการมักเป็นน้ำ ฟีนอลิกเรซินสามารถผลิตขึ้นได้ทั้งในรูปแบบผง เกล็ด ก้อน และของเหลว สมบัติของฟีนอลิกเรซินสามารถถูกออกแบบได้อย่างกว้างขวาง ตามการประยุกต์ใช้ที่ต้องการ เช่น ปริมาณความชื้น น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นกรดต่างระดับโมโนเมอร์ ความหนืด การไหล การหล่อขึ้น และขนาดอนุภาค เป็นต้น [23]

#### 3.3.2.1 การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน [22]

ฟีนอลิกเรซินได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล หรือฟีนอลที่ถูกแทนที่กับแอลดีไฮด์ หรือสารที่จะเกิดเป็นอัลดีไฮด์ได้ ฟีนอลิกเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมักนำมาตัดแปรด้วยชั้นสน กรดโรซิน หรือกรดไขมัน

โดยปกติแล้ว ฟีนอลิกเรซิน หมายถึงเรซินที่ได้จากฟีนอลเข้าทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ ได้เป็นเมทิลลอลฟีนอล (Methylol phenol) ดังนี้

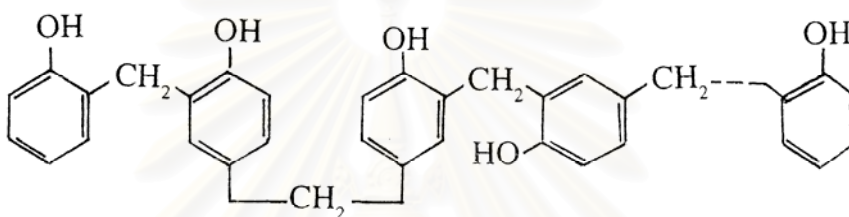


ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ จะเกิดเรื่อยๆ ไป โดยไม่มีขอบเขตจำกัด

การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินทำได้ 2 แบบ คือ ทำในภาวะที่ใช้ฟีนอลมากเกินไป และแบบที่ทำในภาวะที่ใช้ฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป

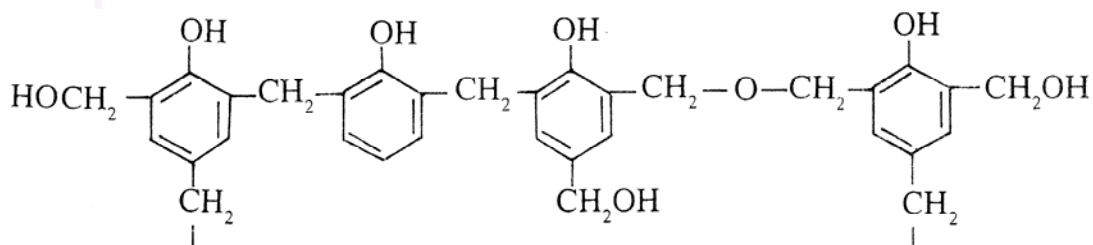
### 3.3.2.2 ประเภทของฟีนอลิกเรซิน [22, 23]

1. โนวาแลกฟีนอลิกเรซิน (Novalac phenolic resin) เตรียมขึ้นในภาวะที่ใช้ฟีนอลมากเกินไป โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเตรียมขึ้นในภาวะที่ขาดฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนั้นจะมีหมู่เมทิลลอล ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ) เกิดขึ้นน้อย ปฏิกิริยาจึงเกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลลอล ฟีนอลกับไฮโดรเจนของอีกโมเลกุลหนึ่งเกิดเป็นพันธะเมทิลีน โนวาแลกเรซินมีโครงสร้างดังนี้



โนวาแลก ไม่มีหมู่เมทิลลอลเหลืออยู่ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีก ถ้าไม่เติมฟอร์มัลดีไฮด์ หรือสารบ่ม เช่น เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน (Hexamethylene tetraamine) ดังนั้นโนวาแลกจึงมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก คือยังละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ และหลอมเหลวได้

2. รีซอลฟีนอลิกเรซิน (Resole phenolic resin) เตรียมขึ้นในภาวะที่ใช้ฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป โดยมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของรีซอลมีหมู่เมทิลลอลอยู่มาก หมู่เมทิลลอลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นพันธะอีเทอร์ และหมู่เมทิลลอลอาจเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนของอีกโมเลกุลหนึ่งเกิดเป็นพันธะเมทิลีนด้วย รีซอลเรซินมีโครงสร้างดังนี้



เนื่องจากโมเลกุลของรีซอลมีหมู่เมทิลลอลอยู่มาก ดังนั้นถ้าให้ความร้อนกับรีซอลจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นตาข่าย ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลายทั้งหลาย มีสมบัติเป็นเทอร์โมเซต

### 3.3.2.3 สมบัติของฟีนอลิกเรซิน [23]

1. ความคงทนที่อุณหภูมิสูง สมบัติที่สำคัญของฟีนอลิกเรซินก็คือความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง และทนต่อแรงทางกลได้โดยมีการผิดรูป (Deformation) หรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Creep) น้อยมาก ฟีนอลิกเรซินที่ผ่านการบ่มแล้วจะมีสภาพแข็งเกร็งเพียงพอที่จะคงสภาพที่สมบูรณ์ของโครงสร้าง และเสถียรภาพของมิติไว้ได้

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงเสถียรภาพของอุณหภูมิคือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( Glass transition temperature,  $T_g$  ) การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว คือ การอุปทานการหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ของแข็งที่เป็นผลึก เช่น น้ำแข็ง หรือพอลิเอทิลีน จะหลอมเหลว และกลายเป็นของเหลว ของแข็งอสัณฐาน เช่น แก้ว และฟีนอลิกเรซินที่บ่มแล้ว ผ่านช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเคลื่อนที่ของโมเลกุลนี้ทำให้เกิดการไหลหรือการเปลี่ยนรูป และเกิดการเปลี่ยนแปลงมิติอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิมากกว่า  $T_g$  ฟีนอลิกเรซินยังคงสภาพการเชื่อมโยง (Crosslink) และยังคงมีความแข็งดั่งบางส่วนอยู่ ซึ่งในอุดมคติแล้ว อุณหภูมิสุดท้ายในการใช้งานไม่ควรเกินค่า  $T_g$

2. ความแข็งแรงของพันธะ ในเบื้องต้นฟีนอลิกเรซินใช้เป็นตัวเชื่อมพันธะ ฟีนอลิกเรซินสามารถเข้ากันได้กับสารเติม และสารเพิ่มความแข็งแรง ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งทำให้ฟีนอลิกเรซินมีสมบัติในการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย ฟีนอลิกเรซินแทรกซึมโครงสร้างของสารเหล่านี้ได้อย่างรวดเร็ว สมบัติขั้นสุดท้ายได้มาเมื่อผ่านความร้อนในช่วงสั้น ๆ เพื่อให้กระบวนการเชื่อมโยงสมบูรณ์

3. ความต้านทานสารเคมี การใช้งานฟีนอลิกเรซินบ่อยครั้งที่ถูกเจาะจงให้ใช้ในสภาวะที่ต้องเผชิญกับสารเคมีอย่างรุนแรง ธรรมชาติของฟีนอลิกเรซินจะเป็นเกราะป้องกันแก่สารต่าง ๆ จากการกัดกร่อนของสารเคมี การทดสอบในห้องปฏิบัติการยืนยันการเสื่อม (Degradation) ที่เล็กน้อยจากสารเคมีหลายชนิด แม้เผชิญเป็นระยะเวลาในอุณหภูมิสูง โดยสารเคมีที่ทนได้ ได้แก่ น้ำมันเบนซิน แอลกอฮอล์ ไกลคอล น้ำมันเบรค ไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด และกรดและเบสชนิดอ่อน เป็นต้น

4. กว้นและสภาพเป็นพิษ (Toxicity) ต่ำ ฟีนอลิกเรซินสามารถถูกออกแบบให้มีอัตราการติดไฟเฉพาะตามที่ต้องการได้ สำหรับการใช้งานในบริเวณที่จุดติดไฟได้ โดยการเลือกใช้สารเติม และสารเสริมความแข็งแรงชนิดอนินทรีย์ เมื่อเกิดไฟขึ้นฟีนอลิกเรซินจะให้ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน ไออน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition) ฟีนอลิกเรซินจะผลิตคว้นในปริมาณที่น้อยมาก และมีระดับสภาพเป็นพิษต่ำ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการทดลองวิจัย

#### 4.1 วัสดุและสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ โครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ประมาณ 10 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่นน้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะถูกผลิตโดยวิธีเชื่อมแบบใช้กาว และวิธีการผลิตแบบดึงขยาย ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งคือ โนเม็กซ์ และกาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน เนื่องจากวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งคือ โนเม็กซ์ความหนา 50 ไมโครเมตรนั้นเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัว ดังนั้นจึงต้องเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ด้วยการเคลือบฟีนอลิกเรซิน รายละเอียดของวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลองวิจัยมีดังนี้

##### 4.1.1 โนเม็กซ์ [17]

ในงานวิจัยนี้ใช้โนเม็กซ์ ชนิด 410 ซึ่งผลิตโดยบริษัท DuPont® โนเม็กซ์ชนิด 410 มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า เหนียว และมีความยืดหยุ่นดี ความหนาของโนเม็กซ์ที่ใช้เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร น้ำหนัก 41 กรัมต่อตารางเมตร และความหนาแน่น 0.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความทนแรงดึงในแนวนอนของแผ่นโนเม็กซ์มีค่า 39 นิวตันต่อเซนติเมตร และในแนวขวางของแผ่นโนเม็กซ์มีค่า 18 นิวตันต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.1 โนเม็กซ์ชนิด 410 หนา 0.05 มิลลิเมตร [24]

#### 4.1.2 อีพอกซีเรซิน [25]

อีพอกซีเรซินในงานวิจัยนี้ใช้แบบ 2 ส่วนผสมกัน เรซินชนิด YD582 และตัวทำแข็งชนิด TH7278 ทั้ง 2 ส่วนซื้อจากบริษัท ไทยอีพอกซี แอนด์ อัลทราซด์ โปริคส์ จำกัด YD582 เป็นอีพอกซีชนิดบิสฟีนอลเอดัดแปร (Modified bisphenol-A) มีสมบัติทำให้เปียกได้ดี และแสดงสมบัติการยึดติดได้ดีเยี่ยมเมื่อใช้กับวัสดุประเภทเสริมแรง (Reinforcement) เช่น กระจกไฟเบอร์ โพลีเอสเตอร์ คาร์บอนไฟเบอร์ และเคปลาร์ เป็นต้น มีความหนืดต่ำ  $1500 \pm 200$  เซนติพอยส์ ลักษณะเป็นของเหลวใส มีความถ่วงจำเพาะ  $1.15 \pm 0.02$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่ 25 องศาเซลเซียส)

TH7278 เป็นตัวทำแข็ง ผลิตจากเอมีนดัดแปร (Modified amine) มีความหนืด 80 – 150 เซนติพอยส์ มีสมบัติทำให้เปียกได้ดี ลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน มีความถ่วงจำเพาะ 0.95 – 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่ 25 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนผสมเรซินต่อตัวทำแข็งเท่ากับ 100 ต่อ 27 (โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.2 อีพอกซีเรซิน YD582/TH7278



### 4.1.3 ฟีนอลิกเรซิน [26]

ในงานวิจัยนี้ใช้ฟีนอลิกเรซินแบบของเหลว ชนิด PL-2211 ซึ่งจากบริษัท ไทยจีซีไอ จำกัด เป็นฟีนอลิกเรซินชนิดรีซอล ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีปริมาณเรซิน (Resin contents) 58.99% โดยน้ำหนัก และความหนืด 161 เซนติพอยส์

### 4.1.4 เอทิลแอลกอฮอล์

เอทิลแอลกอฮอล์ 99 % ใช้เป็นตัวทำละลายเพื่อปรับลดความหนืดของฟีนอลิกเรซิน ซึ่งจากบริษัท อีสท์ เอเชียติก จำกัด

## 4.2 การพัฒนาและออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

ในงานวิจัยนี้ เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว เพื่อใช้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย และเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย เพื่อดึงขยายโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ให้เป็นโครงสร้างรังผึ้ง

ในส่วนของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว ได้มีผู้จดสิทธิบัตรมากมาย เริ่มตั้งแต่ ค. ศ. 1904 ( ดังตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ) จนมาถึงช่วง ค. ศ. 1950 – 1960 การเปลี่ยนแปลงวิธีในการผลิตโครงสร้างรังผึ้งด้วยเครื่องทากาวดูเหมือนจะสิ้นสุดลง เนื่องจากบริษัท Hexcel จำกัด [27] ผู้ผลิตโครงสร้างรังผึ้งรายใหญ่ ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จดสิทธิบัตรครอบคลุมไว้ ภายหลังจากนั้น ด้วยเหตุผลทางการตลาด เมื่อบริษัทผลิตโครงสร้างรังผึ้งมีมากขึ้น การผลิตโครงสร้างรังผึ้งจึงถูกปกปิดเป็นความลับ [10] สิทธิบัตรและงานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างรังผึ้งในช่วงหลัง ๆ จนถึงปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นไปในการพัฒนาโครงสร้างรังผึ้งให้มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในด้านความแข็งแรง และมีลักษณะรูปทรงเรขาคณิตตามขนาดสัดส่วนที่ต้องการ

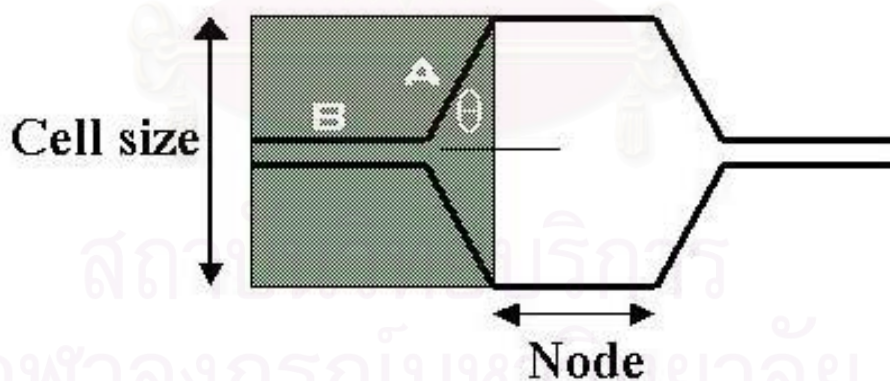
สำหรับเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยายนั้น ไม่ได้มีการกล่าวถึงเทคนิคที่ใช้อย่างชัดเจน ในสิทธิบัตรวิธีการผลิตโครงสร้างรังผึ้งนั้น จะจบลงที่ขั้นตอนการผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอเครื่องมือแบบง่าย ๆ สำหรับใช้เป็นเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย

#### 4.2.1 เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

การออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องสำหรับทาแนว กาวอีพอกซีลงบนแผ่น โนเม็กซ์สำหรับส่วนที่จะเชื่อมติดกัน เพื่อผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การทาแนวกาวในแนวขวางกับแผ่น โนเม็กซ์ เพื่อจัดข้อจำกัดในการผลิต โครงสร้างรังผึ้งขนาดต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 การทาแนวกาวบนโนเม็กซ์นั้นจะต้องมีระยะ แนวกาว สลับกับพื้นที่ว่าง ซึ่งพื้นที่ว่างนี้จะกลายเป็นส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันใน โครงสร้างรังผึ้ง แนว กาวและพื้นที่ว่างจะสลับกันไปเรื่อยๆ ตามความยาวของแผ่นโนเม็กซ์ โดยมีรายละเอียดการออกแบบ เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว ดังนี้

##### 4.2.1.1 การออกแบบลูกกลิ้งเซาะร่อง

ลูกกลิ้งเซาะร่องเป็นส่วนที่จะทำการทาแนวกาวลงบนโนเม็กซ์ โดยลูกกลิ้ง ส่วนที่ไม่ถูกเซาะร่องจะเป็นส่วนที่ทาแนวกาวลงบนโนเม็กซ์ และส่วนที่ถูกเซาะร่องคือ พื้นที่ว่าง ระหว่างแนวกาว โดยขนาดของแนวกาวสำหรับส่วนที่เชื่อมติดกันในเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง มี ขนาดสัมพันธ์กับขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านต่าง ๆ ของเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง

ในรูปที่ 4.3 กำหนดให้

A = ความยาวของส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน [mm]

B = ความยาวของส่วนที่เชื่อมติดกัน (ส่วนที่ทำแนวทาบ) [mm]

$\theta$  = มุมที่ขยายออก [องศา]

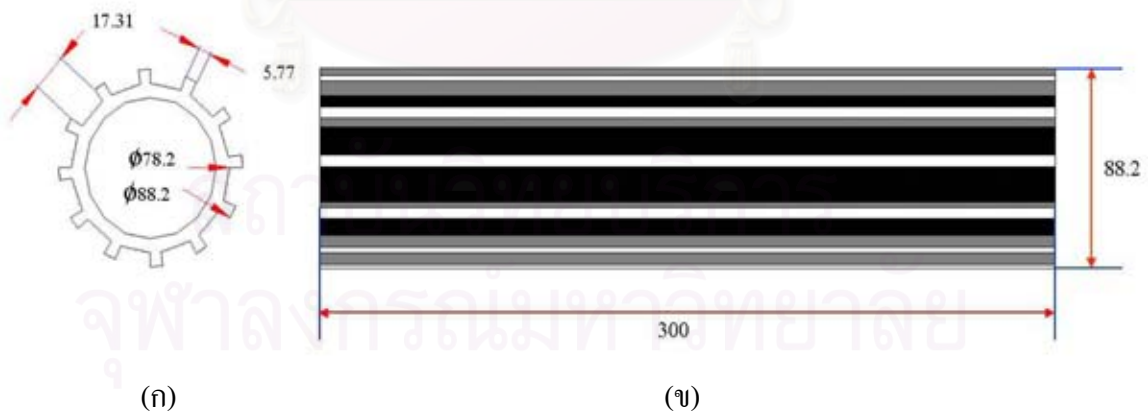
เมื่อกำหนดให้ ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังสีที่ต้องการผลิตมีค่า 10 มิลลิเมตร และมุมที่ดึงขยาย ( $\theta$ ) เท่ากับ 60 องศา โดยที่  $A = B$  จะได้

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

$$A = B = 5.77 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น แนวทาบมีความกว้าง เท่ากับ 5.77 มิลลิเมตร และส่วนที่เป็นพื้นที่ว่างก่อนดึงขยายมีค่าเป็น 3 เท่าของแนวทาบ ซึ่งเท่ากับ 17.31 มิลลิเมตร ลักษณะลูกกลิ้งเซาะร่องแสดงดังรูปที่ 4.4

ลูกกลิ้งเซาะร่องนี้ทำจากท่อสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 88.2 มิลลิเมตร เซาะร่องจำนวน 12 ร่อง โดยร่องลึก 5 มิลลิเมตร



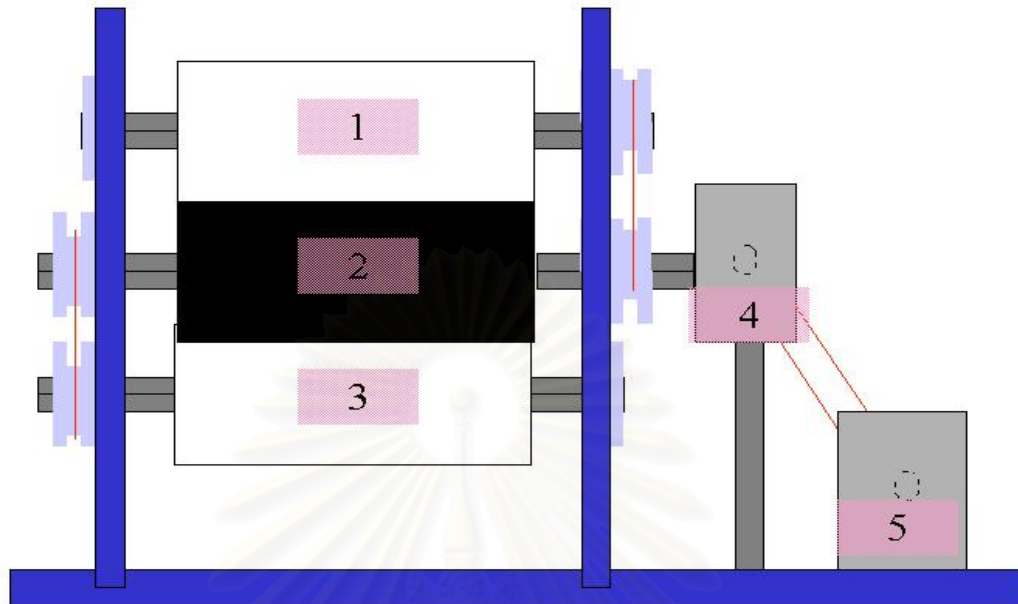
รูปที่ 4.4 ลูกกลิ้งเซาะร่องและค่าออกแบบ (หน่วยมิลลิเมตร) (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านข้าง

#### 4.2.1.2 การออกแบบเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

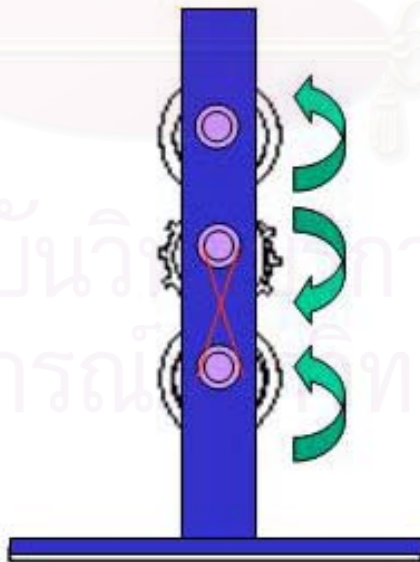
เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวประกอบด้วยลูกกลิ้ง 3 ลูก ลูกกลิ้งลูกกลางเป็นลูกกลิ้งเซาะร่องดั่งที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.1.1 ส่วนลูกกลิ้งลูกบนและล่าง ทำจากยางสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนลูกกลิ้งลูกกลาง โดยผ่านเฟืองทดเพื่อลดความเร็วรอบ ลูกกลิ้งลูกกลางขับเคลื่อนลูกกลิ้งลูกบนและลูกล่างผ่านสายพาน โดยลูกกลิ้งลูกบนและลูกล่างหมุนสลับทิศกับลูกกลิ้งลูกกลาง

ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์ลูกบนและล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ 83.3 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเซาะร่อง (88.2 มิลลิเมตร) และลูกกลิ้งยางสังเคราะห์เป็นอัตราส่วนที่หารไม่ลงตัว (ประมาณ 1.058823529..) เพื่อเป็นการป้องกันการกดทับกันของลูกกลิ้งไม่ให้เกิดเป็นรอยซ้ำ ๆ กันในขณะใช้งาน และเป็นการยืดอายุการใช้งานของลูกกลิ้ง แผนภาพลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงดังรูปที่ 4.5 และภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงในรูปที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

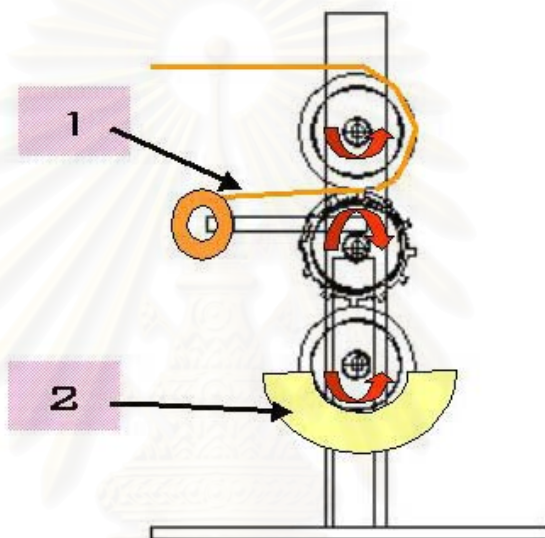


รูปที่ 4.5 แผนภาพลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว (1.ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์อันบน 2.ลูกกลิ้งเซาะร่อง (ลูกกลิ้งอันกลาง) 3.ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์อันล่าง 4.เฟืองทด 5.มอเตอร์)



รูปที่ 4.6 ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

ในการใช้งาน แผ่นโนเม็กซ์จะถูกป้อนไ้ระหว่างลูกกลิ้งลูกบน และลูกกลิ้งลูกกลาง ด้านล่างส่วนหนึ่งของลูกกลิ้งลูกล่างจะจุ่มอยู่ในถาดใส่กาว เมื่อกาวถูกหมุนขึ้นมากับผิวของลูกกลิ้งลูกล่างผ่านใบมีดปาดกาวส่วนเกินแล้ว กาวจะย้ายไปติดบนผิวลูกกลิ้งลูกกลาง เฉพาะส่วนที่ไม่ถูกเซาะร่อง และย้ายต่อไปติดผิวด้านล่างของแผ่นโนเม็กซ์ จากนั้นแผ่นโนเม็กซ์จะถูกพลิกกลับด้านด้วยลูกกลิ้งลูกบนทำให้แนวกาวพลิกมาอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะการทำงานของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว (1.ม้วนแผ่น โนเม็กซ์ 2.ถาดใส่กาว)

#### 4.2.2 เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย

เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย เป็นเครื่องมือง่ายๆ โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะขยายช่องว่างที่แนบปิดอยู่ในโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ให้เปิดออกเป็นเซลล์รูปหกเหลี่ยม ดังนั้นวิธีการดึงขยาย จึงออกแบบให้มีแท่งเหล็ก ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดความกว้างของแนวกาว เพื่อสอดอยู่ในช่องว่างระหว่างแนวกาวที่ด้านนอกสุดทั้ง 2 ด้านของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย โดยแท่งเหล็กเหล่านี้จะถูกใส่ในทุกๆ ช่องว่างด้านนอก จากนั้นจะนำโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายที่มีแท่งเหล็กใส่อยู่ ไปใส่ตริงไว้ในเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย ซึ่งประกอบด้วยแกนเหล็ก 2 แท่ง เชื่อมติดกัน



บริเวณกลางแท่งด้วยสกรู เพื่อให้แกนเหล็กทั้ง 2 อันนี้เคลื่อนที่เข้าและออกจากกันได้ทีละนิดโดยการหมุนสกรู ที่แกนเหล็กแต่ละแท่งยังมีเสานำร่อง (guide posts) ที่ปลายทั้ง 2 ด้านเชื่อมตั้งฉากกับแกนเหล็ก เสาที่ปลายทั้ง 2 ด้านนี้จะเป็นที่สำหรับยึดโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายที่มีแท่งเหล็กใส่อยู่ ดังที่กล่าวถึงในตอนต้น เสาและโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้าน จะถูกยึดติดกันด้วยแท่งเหล็กอีกด้านละ 2 อัน ซึ่งวางในแนวตั้งฉากกับเสา (ขนานกับแกนเหล็กที่เชื่อมกับสกรู) เมื่อหมุนสกรูให้แกนเหล็กแยกออกจากกัน เสาและแท่งเหล็กที่ยึดโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้านอยู่ จะช่วยให้ช่องว่างในโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายเปิดออก เป็นโครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม และดึงค้างไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงถอดแท่งเหล็กที่ใส่ในโครงสร้างรังผึ้งออก

#### 4.3 การวัดสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์

เนื่องจากอีพอกซีเรซินที่เหมาะสมสำหรับเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว จะต้องอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อีพอกซีเรซินชนิด YD582/TH7278 ซึ่งมีความหนืดประมาณ 1600 เซนติพอยส์ ปรากฏว่าเมื่อใช้ใส่ในเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแล้ว ลูกกลิ้งยางสังเคราะห์ลูกล่างซึ่งจุ่มอยู่ในถาดใส่กาวสามารถหมุนพาอีพอกซีเรซินขึ้นไปติดที่ผิวลูกกลิ้งเซาร่อง และหมุนไปติดบนแผ่นโนเม็กซ์ได้ดี โดยมีน้ำหนักอีพอกซีเรซินต่อพื้นที่โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0063 กรัมต่อตารางเซนติเมตร (ภาคผนวก ค. การหาน้ำหนักกาวต่อพื้นที่ ASTM D 899 – 94 [28])

นอกจากนี้ระยะเวลาในการใช้งาน (Pot – life) ของอีพอกซีเรซินก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหลังผสมเรซินและตัวทำแข็งแล้ว อีพอกซีเรซินจะเกิดการแข็งตัวขึ้นเมื่อหมดระยะเวลาในการใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อใช้งานกับเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว อีพอกซีเรซินจะต้องมีระยะเวลาก่อนแข็งตัวเพียงพอต่อการทาบนโนเม็กซ์และเวลาสำหรับการทำความสะอาดเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวด้วย อนึ่ง ระยะเวลาการใช้งานของอีพอกซี สามารถประมาณได้จากเวลาที่อีพอกซีเปลี่ยนสภาพเป็นเจล (Gel time) เพราะเมื่อผ่านสภาพเจลแล้ว อีพอกซีเรซินจะเกิดการแข็งตัว สำหรับอีพอกซีเรซินชนิด YD582 /TH7278 มีระยะเวลาที่เป็นเจลประมาณ 55 นาทีหลังการผสม และเกิดการแข็งตัวที่ระยะเวลาประมาณ 61 นาทีหลังการผสม (ภาคผนวก ง. การหาระยะเวลาที่เรซินเทอร์โมเซตเปลี่ยนสภาพเป็นเจล และอุณหภูมิ Peak Exothermic ASTM D 2471 – 94 [29])

#### 4.3.1 การระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า อีพอกซีเรซินที่เหมาะสมกับเครื่องดันแบบสำหรับทาภาวนั้น จะต้องมีความหนืดต่ำ ดังนั้นเมื่อทาอีพอกซีเรซินบนแผ่นโนเม็กซ์ด้วยเครื่องดันแบบสำหรับทาภาวนั้น จึงต้องระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีออกก่อนที่จะนำมาวางซ้อนกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อน ติงขยาย เพื่อลดการพองตัวเมื่อนำเข้าบ่มในเตาอบ ซึ่งจะทำให้แนวอีพอกซีเรซินที่ได้ไม่เป็นแนวตรง ตามช่องที่ต้องการ

สำหรับการระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน ใช้วิธีวางไว้บนโต๊ะที่ อุณหภูมิห้อง จากนั้นกำหนดระยะเวลาที่ควรใช้จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอีพอกซีเร ซินที่ทาบนโนเม็กซ์เทียบกับเวลา โดยในการทดลองทาอีพอกซีเรซิน (อัตราเรซินต่อตัวทำแข็ง 100 ต่อ 27 โดยน้ำหนัก) บนโนเม็กซ์ ให้น้ำหนักอีพอกซีเรซินต่อพื้นที่และสภาวะในการทดลอง เหมือนกับการใช้กับเครื่องดันแบบสำหรับทาภาวน (ภาคผนวก ค.) จากนั้นวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง และชั่ง น้ำหนักอีพอกซีเรซินและโนเม็กซ์เทียบกับเวลา

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอีพอกซีเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์ เทียบกับเวลา โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยมาพลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของอีพอกซีเรซินและเวลา (ภาคผนวก จ.) พบว่าในช่วงแรกน้ำหนักของอีพอกซีเรซินจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนผ่านไป 3 ชั่วโมง น้ำหนักของอีพอกซีเรซินเริ่มคงที่ และคงที่ต่อไปเรื่อยๆ จนถึง 5 ชั่วโมง ดังนั้นในการผลิต โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว เมื่ออีพอกซีเรซินถูกทาบนโนเม็กซ์ด้วยเครื่องดันแบบสำหรับทาภาวนแล้ว จึงให้ระยะเวลาสำหรับระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซินเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาวางซ้อนกันตามขั้นตอนต่อไป (หัวข้อ 4.4.1)

#### 4.3.2 การทดสอบสมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซินโดยใช้ DSC

สมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซิน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม ได้ถูก ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อกำหนดเงื่อนไขสำหรับการบ่มโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว การ ทดลองเริ่มจากการทำชิ้นงานตัวอย่างโดยการใช้อีพอกซีเรซิน ทาบนโนเม็กซ์ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรหลายๆ แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นมีอีพอกซีเรซินประมาณ 0.0063 กรัมต่อตารางเซนติเมตร แล้วระเหยตัวทำละลายส่วนเกินที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้ววางซ้อนกัน 20 และ 40 ชั้น

จากนั้นนำไปป้อนในเตาอบ โดยใช้อุณหภูมิ 100, 140 หรือ 160 องศาเซลเซียส ที่เวลา 3, 6, 12 หรือ 24 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ไอพอกซีเรซินบ่มสมบูรณ์

สมบัติการบ่มของไอพอกซีเรซินถูกทดสอบโดย Differential scanning calorimeter รุ่น 2910 ด้วยโปรแกรม TA Instruments โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 30–300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 5–10 กรัม ถูกวางในถาดอลูมิเนียมที่มีฝาปิด อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

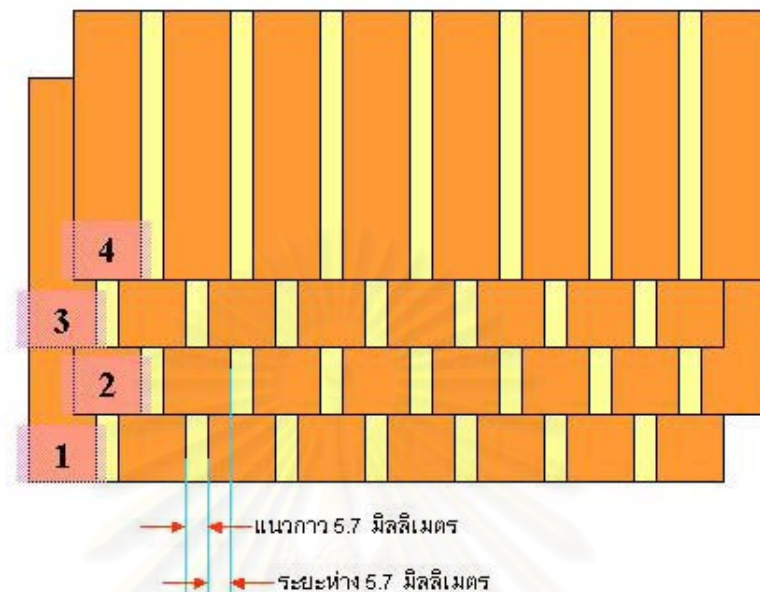
#### 4.4 ขั้นตอนการผลิตโครงสร้างรังผึ้ง

ขั้นตอนการผลิตโครงสร้างรังผึ้งในงานวิจัยนี้มีหลายขั้นตอน ในหัวข้อ 4.4 นี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการผลิตโครงสร้างรังผึ้งตั้งแต่เป็นแผ่นโนเม็กซ์ จนถึงเป็นโครงสร้างรังผึ้งที่เป็นเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อคือ การผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยาย และการดัดขยายโครงสร้างรังผึ้ง

##### 4.4.1 การผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยาย

โครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยายถูกผลิตโดยใช้เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น (หัวข้อ 4.2.1) ในงานนี้โครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยายที่มีจำนวนชั้นของโนเม็กซ์ 14 20 และ 40 ชั้นจะถูกผลิตขึ้นโดยการผลิตแบบเบทช์ (Batch) ซึ่งในแต่ละเบทช์ใช้แผ่นโนเม็กซ์หนา 0.05 มิลลิเมตร กว้าง 11.43 เซนติเมตร ยาว 12 เมตร และใช้ไอพอกซีเรซินในส่วนของเรซิน YD582 ประมาณ 100 กรัม ผสมกับตัวทำแข็ง TH7278 ประมาณ 27 กรัม ถูกใส่ในเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 และรูปที่ 4.7)

หลังจากทาแนวทากาวไอพอกซีเรซินด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว โนเม็กซ์ที่ทาแนวทากาวแล้วจะถูกปล่อยให้ตัวทำละลายส่วนเกินระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามหัวข้อ 4.3.1 จากนั้นตัดตามความยาวเพื่อนำมาวางซ้อนกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยาย โดยตัดแบ่งที่ความยาว 15, 20 หรือ 30 เซนติเมตร สำหรับโครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยายที่มีจำนวนชั้นโนเม็กซ์ 40, 20 หรือ 14 ชั้น ตามลำดับ แผ่นโนเม็กซ์ที่ตัดแบ่งแล้วจะถูกนำมาวางเรียงซ้อนกัน โดยชั้นที่ติดกันแนวทากาวจะถูกวางสลับกันห่างกัน 5.7 มิลลิเมตร สลับกันไปมาเรื่อยๆ จนครบจำนวนชั้นที่ต้องการ รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการวางแนวทากาวสลับกันในแต่ละชั้นที่ติดกันจากนั้นนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดัดขยาย



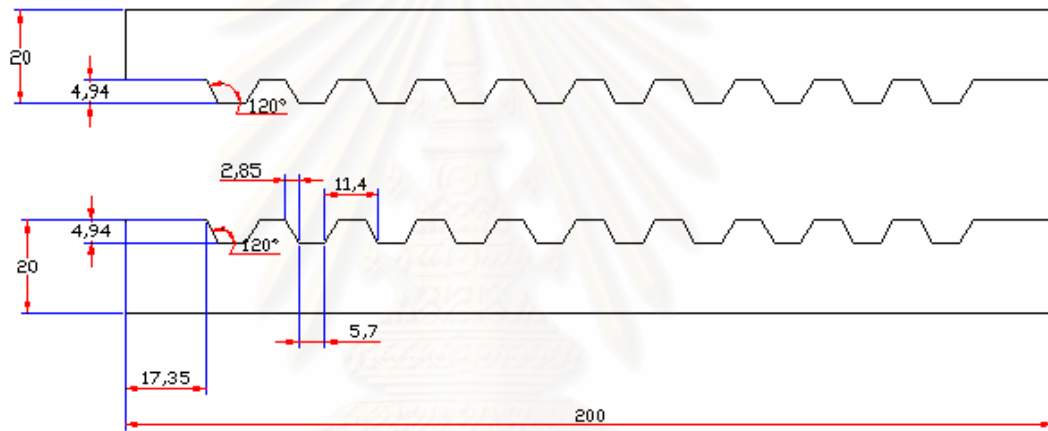
รูปที่ 4.8 ลักษณะการวางแนวทาบสลับกันในแต่ละชั้นที่ติดกัน

#### 4.4.2 การดึงขยายโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายที่ผลิตตามหัวข้อ 4.4.1 จะถูกนำมาดึงขยายเพื่อทำให้เกิดเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม ด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย โดยโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายจะถูกตัดแบ่งตามความกว้าง ให้มีขนาด 12.7 มิลลิเมตร และถูกดึงขยายโดยใช้เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย โดยดึงขยายเป็นเวลา 30 นาที ตามวิธีการที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.2 ได้เป็นโครงสร้างรังผึ้ง

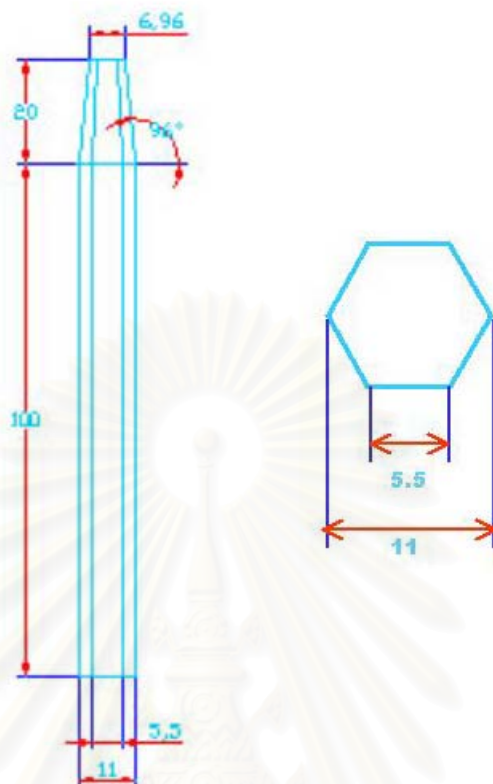
#### 4.5 วิธีการเพิ่มเสถียรของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้ในแบบหล่อโดยการอบอ่อน (Annealing)

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการดึงขยายตามหัวข้อ 4.4.2 แล้ว พบว่าไม่มีความเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป โดยโครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะหดตัวลง ดังนั้นจึงต้องใช้แบบหล่อ (Mold) ครึ่งหกเหลี่ยม และแท่งหกเหลี่ยมที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างรังผึ้ง โดยวิธี การอบอ่อน (Annealing) ภาพตัดขวางของแบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยม และแท่งหกเหลี่ยมมีแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางและขนาดของแบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยม (หน่วยมิลลิเมตร)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

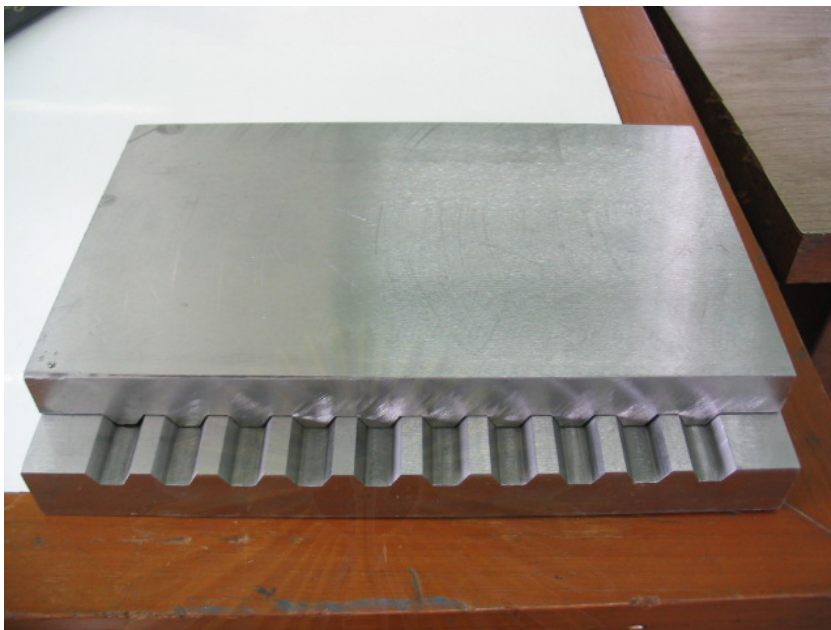


รูปที่ 4.10 ลักษณะและขนาดของแหงหกลเหลี่ยม และภาพตัดขวาง (หน่วยมิลลิเมตร)

แบบหล่อครึ่งหกลเหลี่ยมประกอบด้วยแบบหล่อ 2 ชั้นซึ่งประกอบเข้ากันเป็นรูปหกลเหลี่ยมได้พอดี ทำจากเหล็ก กว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตรหนา 20 มิลลิเมตร เซาะร่องครึ่งหกลเหลี่ยม ตรงกลางกว้าง 11.4 มิลลิเมตร ฐานหกลเหลี่ยมกว้าง 5.77 มิลลิเมตร ลึก 4.94 มิลลิเมตร จำนวน 10 ร่อง ดังรูปที่ 4.11

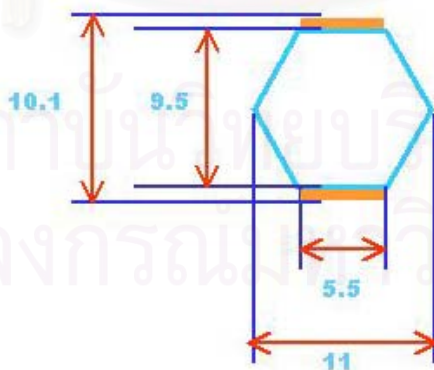
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.11 แบบหล่อเครื่องหกเหลี่ยม

ส่วนแท่งหกเหลี่ยมสำหรับใส่ในเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ทำจากทองเหลือง กว้าง 11 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร ส่วนปลายกลึงเป็นมุมแหลมเพื่อให้สอดในเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งได้ง่าย เนื่องจากปรากฏว่าแท่งหกเหลี่ยมที่ทำขึ้นมามีขนาดเล็กกว่าเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มขนาดแท่งหกเหลี่ยมด้วยการแปะเทปขาว 2 ด้าน หนาด้านละ 0.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเพิ่มขนาดแท่งหกเหลี่ยม

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการคั่งขยายแล้วจะถูกใส่ในแบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยม และแท่งหกเหลี่ยมแต่ละอันจะถูกใส่ในแต่ละเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงถอดแบบหล่อและแท่งหกเหลี่ยมออกจากโครงสร้างรังผึ้ง

#### 4.6 การวัดสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้ง

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากโนเม็กซ์บางเป็นโครงสร้างที่มีความอ่อนตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างรังผึ้งด้วยการเคลือบเรซิน ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาแน่น และยังช่วยเพิ่มสมบัติทางกลแก่โครงสร้างรังผึ้งด้วย เรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งในงานวิจัยนี้ คือฟีนอลิกเรซิน และใช้วิธีจุ่มเคลือบ (Dip – coat) ซึ่งโครงสร้างรังผึ้งจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม โดยจุ่มเคลือบฟีนอลิกเรซินเพียง 1, 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ

##### 4.6.1 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟีนอลิกเรซินที่เคลือบบนโนเม็กซ์

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการอบอ่อนเพื่อเพิ่มความเสถียรแล้วจะถูกนำมาจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินเพื่อเพิ่มความหนาของผนังและสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้ง ฟีนอลิกเรซินที่ใช้จุ่มเคลือบมีลักษณะเป็นของเหลว และมีความหนืด 161 เซนติพอยส์ ซึ่งเป็นความหนืดต่ำสุดที่สามารถหาซื้อได้ แต่พบว่ายังมีความหนืดมากเกินไปไม่เหมาะสมในการจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับลดความหนืดของฟีนอลิกเรซิน โดยการเติมเอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ได้ความหนืดที่เหมาะสมในการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งให้มีผิวที่สวยงาม

สำหรับความเข้มข้นของฟีนอลิกเรซินที่เหมาะสม ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (ภาคผนวก จ.) โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างแผ่นโนเม็กซ์ชิ้นเล็กๆ แล้วลองจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซิน เริ่มจากใช้ฟีนอลิกเรซิน ความหนืด 161 เซนติพอยส์ ซึ่งมีความเข้มข้น 58.99% จากนั้นเจือจางด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ได้ฟีนอลิกเรซินที่ความเข้มข้น 20.23% 25.28% และ 33.7% โดยน้ำหนัก แล้วทดลองจุ่มเคลือบแผ่นโนเม็กซ์ขนาด 10 \* 60 มิลลิเมตร หลังจากจุ่มเคลือบฟีนอลิกเรซินแล้ว แผ่นโนเม็กซ์จะถูกวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ออกบางส่วน เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึง

นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการจุ่มเคลือบนี้ถูกทำซ้ำ 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งจะบันทึกน้ำหนักแผ่นโนเม็กซ์ก่อนและหลังเคลือบไว้

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการจุ่มเคลือบ และน้ำหนักแผ่นโนเม็กซ์ที่เปลี่ยนแปลง พบว่าฟีนอลิเรซินที่มีความเข้มข้น 20.23 % และ 25.28 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน และให้ผิวในการเคลือบโนเม็กซ์ที่เรียบสวยงามกว่าฟีนอลิเรซินที่มีความเข้มข้น 33.7 % โดยน้ำหนัก ลักษณะผิวของโนเม็กซ์ที่เคลือบฟีนอลิเรซินที่มีความเข้มข้น 33.7% และ 25.28% แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ลักษณะผิวของโนเม็กซ์ที่เคลือบฟีนอลิเรซินที่มีความเข้มข้น 33.7% (ภาพด้านบน)



รูปที่ 4.14 ลักษณะผิวของโนเม็กซ์ที่เคลือบฟีนอลิเรซินที่มีความเข้มข้น 25.28% (ภาพด้านบน)

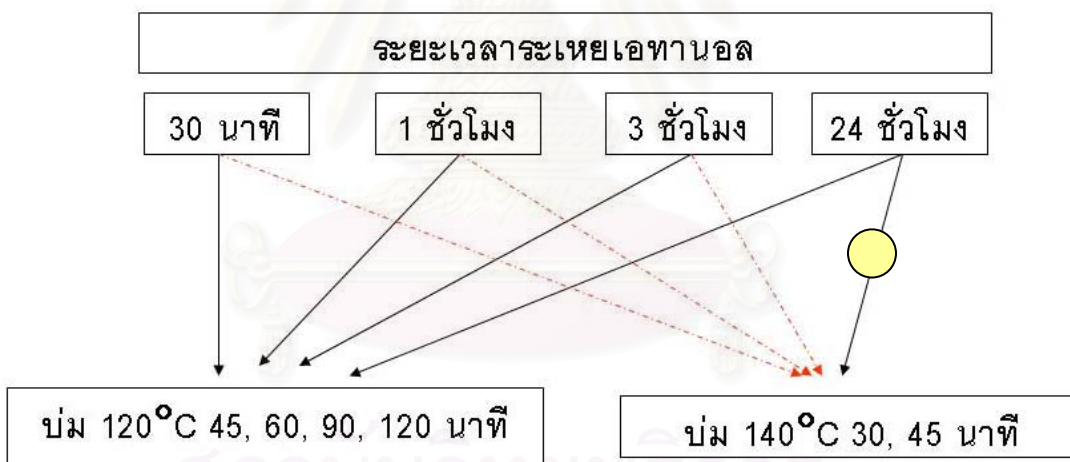
#### 4.6.2 การทดสอบสมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินโดยใช้ DSC (Differential Scanning Calorimeter)

จากหัวข้อ 4.6.1 พบว่าฟีนอลิกเรซินที่มีความเข้มข้น 25.28 % โดยน้ำหนัก เมื่อใช้เคลือบโนเม็กซ์แล้วจะให้ผิวเรียบสวยงาม ดังนั้นจึงเลือกใช้ฟีนอลิกที่มีความเข้มข้นนี้สำหรับเคลือบโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตขึ้น

ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินสำหรับกลุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งถูกเตรียมขึ้น โดยมีตัวแปรดังนี้

- ระยะเวลาระเหยเอทานอล 30 นาที 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
- อุณหภูมิแลเวลบ่ม 120°C 45, 60, 90, 120 นาที ตามลำดับ  
140°C 30, 45 นาที

แผนภาพของสถานะในการทดลองมีแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงสถานะในการทดลอง (เส้นทึบ-ผิวเคลือบมีลักษณะเรียบ, เส้นประ-ผิวเคลือบมีลักษณะไม่เรียบ)

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิบ่ม 120 องศาเซลเซียส ทุกระยะเวลาบ่ม และทุกระยะเวลาที่ใช้ระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ (เส้นทึบ) ให้ผิวเคลือบเรียบ ไม่มีฟอง และมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนกรณีของอุณหภูมิบ่ม 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลาบ่ม 30 และ 45 นาที และใช้เวลาระเหย

เอทิลแอลกอฮอล์ 24 ชั่วโมง (เส้นทึบ) ได้ผิวเรียบ ไม่มีฟองและสีน้ำตาลอ่อน เหมือนกับใช้อุณหภูมิ บ่ม 120 องศาเซลเซียส ส่วนที่ระยะเวลากระเหยเอทิลแอลกอฮอล์อื่น (เส้นประ) ผิวเคลือบยังคงมีฟอง เล็กๆ คล้ายตามด และมีสีน้ำตาลเข้มกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.15

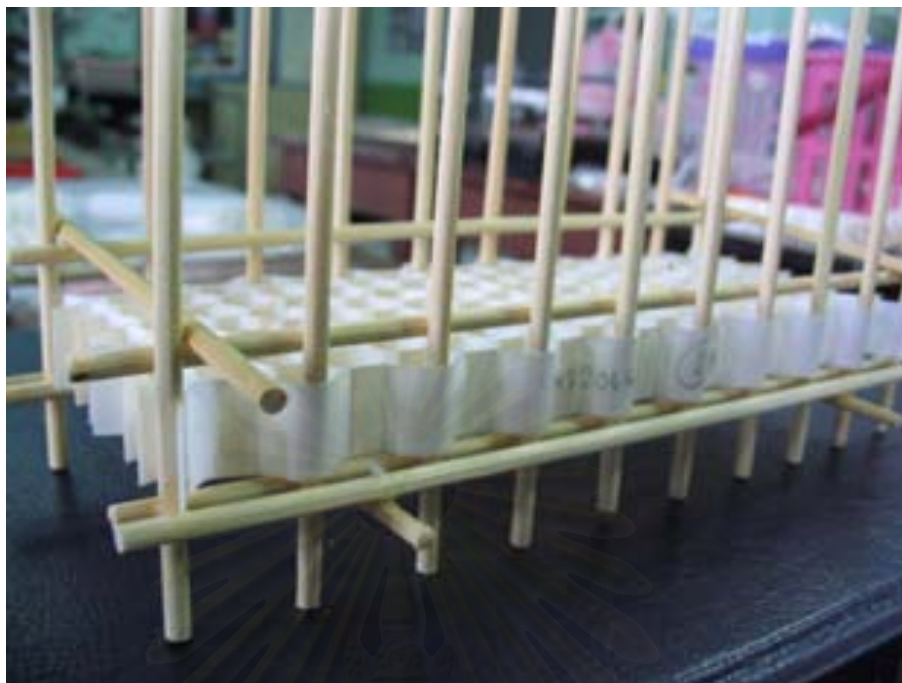
ดังนั้นจึงได้เลือกสภาวะการบ่มที่ได้ผิวที่สวยงาม (เส้นทึบ) ไปวิเคราะห์สมบัติการบ่ม ของฟีนอลิกเรซิน โดย Differential scanning calorimeter รุ่น 2910 ด้วยโปรแกรม TA Instruments โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 30–300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 5–10 กรัม ถูกวางใน ถาดอลูมิเนียมที่มีฝาปิด อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และ ทดสอบภายใต้ไนโตรเจน

#### 4.7 วิธีการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการอบอ่อนในแบบหล่อครึ่งหกเหลี่ยมและแท่งหกเหลี่ยมตามข้อ 4.5 แล้ว จะถูกนำมาจุ่มเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซิน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.6 โดยการจุ่มเคลือบนั้นจะต้องใช้ โครงไม้สำหรับตรึงโครงสร้างรังผึ้งในระหว่างจุ่มเคลือบ เพื่อให้โครงสร้างรังผึ้งที่มีลักษณะเซลล์และ รูปทรงที่สวยงาม และ ไม่หดตัวในระหว่างการนำไปบ่มในเตาอบอีกครั้ง ลักษณะโครงไม้สำหรับใช้ จุ่มเคลือบฟีนอลิกเรซินมีแสดงดังรูปที่ 4.16

อนึ่ง ฟีนอลิกเรซินที่ใช้จุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งมีความเข้มข้น 25.28 % โดยน้ำหนัก หลังจากจุ่ม เคลือบแล้ววางผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 140 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตามเงื่อนไขการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อ 4.6 การจุ่มเคลือบโครงสร้าง รังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินนี้ทำทั้งหมด 1, 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ สำหรับการจุ่มเคลือบครั้งที่ 2 และ 3 นั้น เมื่อบ่มที่ 140 องศาเซลเซียสแล้ว จะวางผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้โครงสร้างรังผึ้งเย็นตัวลง แล้ว จึงจุ่มเคลือบซ้ำตามขั้นตอนเดิม





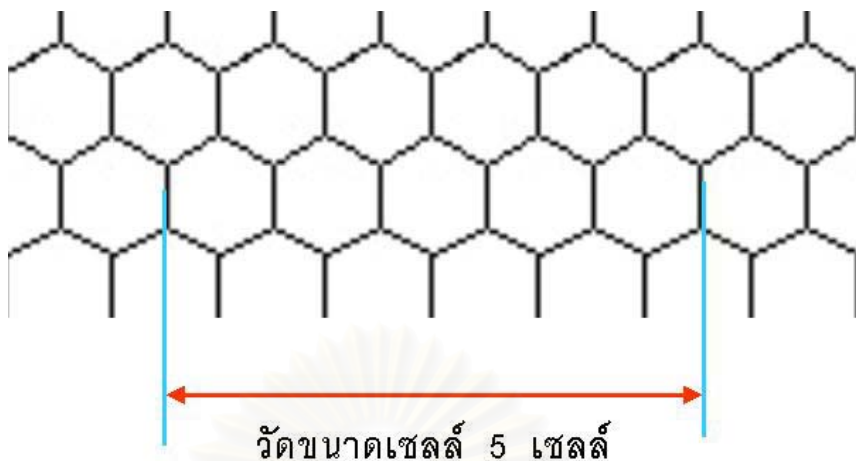
รูปที่ 4.16 โครงไม้สำหรับจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน

#### 4.8 การวัดขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง [1]

ขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งถูกวัดโดยใช้เวอร์เนีย วัดตามด้านกว้างของโครงสร้างรังผึ้งเป็นระยะเซลล์จำนวน 5 เซลล์ โดยการสุ่ม แล้วหาค่าเฉลี่ย การวัดขนาดเซลล์แสดงในรูปที่ 4.17 ขนาดเฉลี่ยของเซลล์ได้จากการหารผลรวมของระยะที่วัดได้ด้วย 5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.17 การวัดขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง

#### 4.9 การวัดความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง [1]

ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้หาได้จาก

$$HD = \frac{Wt \times 10^6}{L \times W \times T} \quad (2)$$

- เมื่อ
- HD = ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
  - Wt = น้ำหนักของโครงสร้างรังผึ้ง (กรัม)
  - L = ด้านยาวของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)
  - W = ด้านกว้างของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)
  - T = ด้านสูงของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

#### 4.10 วิธีการทดสอบสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้ง

การทดสอบสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งที่สำคัญมี 2 ประเภทคือ การทดสอบสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) และการทดสอบความทนแรงเฉือน (Shear strength)

##### 4.10.1 ความทนแรงอัด

โดยทั่วไป การทดสอบสมบัติความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งมี 2 แบบคือ แบบโครงสร้างรังผึ้งเปล่าๆ หรือที่เรียกว่า Bare compression และแบบโครงสร้างแซนวิช หรือที่เรียกว่า Stabilized compression ซึ่งจะประกอบด้วยแผ่นซีทเคลือบกาวประกบ 2 ด้าน โดยมีโครงสร้างรังผึ้งอยู่ตรงกลาง [1] โดยทั่วไปแล้วความทนแรงอัดของโครงสร้างแซนวิชจะมีค่ามากกว่าของโครงสร้างรังผึ้ง ในงานวิจัยนี้จะทดสอบเฉพาะความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งเท่านั้น

สมบัติความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C365 – 94 [28] โดยชิ้นงานโครงสร้างรังผึ้งที่ถูกทดสอบมีขนาดกว้าง 76.2 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตร หนา 12.7 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ด้วยอัตราคดที่ความเร็ว 0.50 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นคำนวณค่าความทนแรงอัดได้จาก

$$\alpha = P / A \quad (3)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง (เมกะปาสกาล)  
 $P$  = แรงกดที่ทนได้มากที่สุด (นิวตัน)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างรังผึ้งที่ทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร)

นอกจากนี้โมดูลัสแรงอัด (Compressive modulus) ของโครงสร้างรังผึ้ง สามารถหาได้จาก

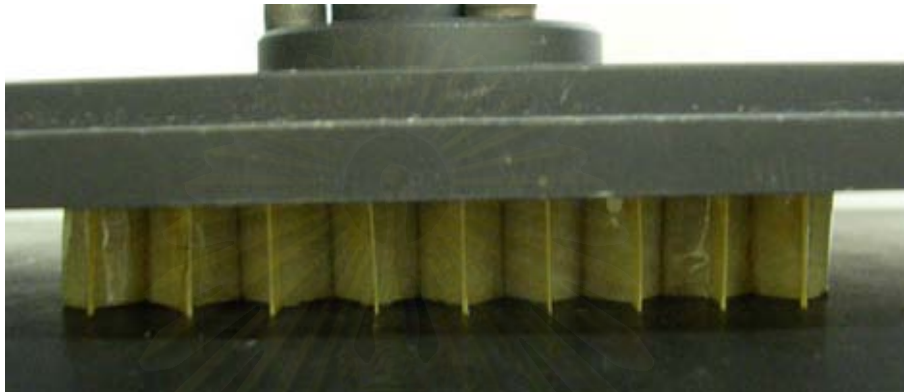
$$E = ST / A \quad (4)$$

เมื่อ  $E$  = โมดูลัสแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง (เมกะปาสกาล)

$S = (\Delta P / \Delta t)$  ความชันของส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรกของกราฟ load – deflection (นิวตันต่อมิลลิเมตร)

$T =$  ความหนาของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

ลักษณะการทดสอบความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การทดสอบความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง

#### 4.10.2 ความทนแรงเฉือน

ความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งเป็นสมบัติที่สำคัญ เพราะในการออกแบบโครงสร้างรังผึ้งส่วนใหญ่จะใช้สมบัตินี้ วิธีการวัดความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งมีอยู่ 2 วิธี คือ การวัดความทนแรงเฉือนด้วยวิธีการดึง (Tensile plate shear) และการวัดความทนแรงเฉือนด้วยวิธีการกด (Compressive plate shear) ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะให้ค่าความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งเหมือนกัน [1] ในงานวิจัยนี้จะทดสอบความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งด้วยวิธีการกด ซึ่งทำตามมาตรฐาน ASTM C 273 – 94 [29] โดยชิ้นงานโครงสร้างรังผึ้งที่ถูกทดสอบมีขนาดกว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 152.4 มิลลิเมตร หนา 12.7 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ด้วยอัตรากดที่ความเร็ว 0.50 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นคำนวณค่าความทนแรงเฉือนได้จาก

$$\tau = P / LW \quad (5)$$

เมื่อ  $\tau =$  ความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้ง (เมกะปาสกาล)

- $P$  = แรงที่ทนได้มากที่สุด (นิวตัน)  
 $L$  = ความยาวของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)  
 $W$  = ความกว้างของโครงสร้างรังผึ้ง (มิลลิเมตร)

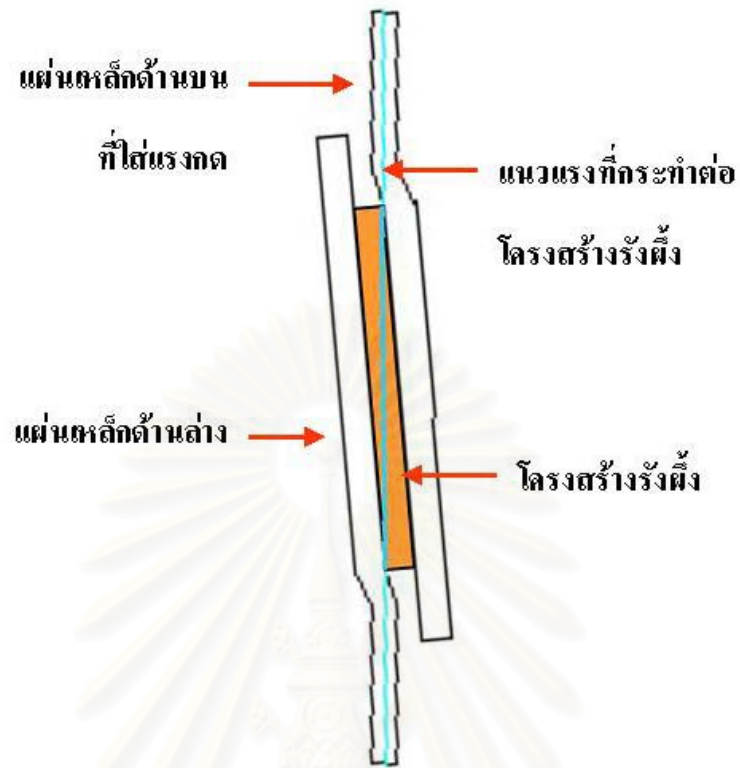
อนึ่ง โมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus) ของโครงสร้างรังผึ้ง สามารถหาได้จาก

$$G = St / LW \quad (6)$$

เมื่อ  $G$  = โมดูลัสแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้ง (เมกะปาสกาล)

$S$  =  $(\Delta P / \Delta t)$  ความชันของส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรกของกราฟ load – deflection (นิวตันต่อมิลลิเมตร)

โดยชิ้นงานตัวอย่างโครงสร้างรังผึ้งที่นำไปวัดความทนแรงเฉือน จะยึดติดกับแผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบทั้ง 2 ด้าน โดยใช้กาวอีพอกซีหนา 1 มิลลิเมตรทำยึดติดโครงสร้างรังผึ้งบนแผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กที่ใช้มีความกว้างและความหนาเท่ากับโครงสร้างรังผึ้งที่นำไปทดสอบ โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ถูกออกแบบให้แรงที่กดโครงสร้างรังผึ้งอยู่ในแนวทแยงผ่านมุมที่อยู่ด้านตรงข้ามของโครงสร้างรังผึ้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.19 อนึ่ง การวัดความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งจะวัดทั้งในด้านยาว และ ด้านกว้าง รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะการทดสอบความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้ง



รูปที่ 4.19 แผนภาพแสดงแนวแรงที่กดผ่านโครงสร้างรังผึ้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ลักษณะการทดสอบความทนแรงเหวี่ยงของโครงสร้างรังผึ้ง

#### 4.11 การสังเกตลักษณะพื้นผิวโครงสร้างรังผึ้งก่อนและหลังการทดสอบทางกล

โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการทดสอบสมบัติทางกล ทั้งสมบัติความทนแรงอัด และความทนแรงเหวี่ยงแล้ว จะถูกนำมาสังเกตลักษณะที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าและภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล เพื่อตรวจสอบลักษณะของการเสียรูปของโครงสร้างรังผึ้งที่เกิดจากการทดสอบสมบัติทางกล



## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 5.1 เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งที่สร้างขึ้น

##### 5.1.1 เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

สำหรับเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ลูกกลิ้งเซาะร่องที่ใช้สำหรับทาแนวขวางของกาวอีพอกซีเรซินลงบนแผ่น โนเม็กซ์ และลูกกลิ้งเรียบอีก 2 อันที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของลูกกลิ้งเซาะร่อง ลูกกลิ้งอันล่างช่วยนำกาวอีพอกซีเรซินขึ้นมาจากถาดใส่กาวมาที่ลูกกลิ้งเซาะร่อง ส่วนลูกกลิ้งอันบนช่วยในการดึงแผ่น โนเม็กซ์เข้ามาในเครื่อง และพลิกกลับแผ่น โนเม็กซ์ที่ผ่านการทากาวแล้วให้กลับมาอยู่ด้านบน ลูกกลิ้งเซาะร่องมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง ทำจากสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 88.2 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร เซาะร่องตามความยาวของทรงกระบอก ร่องลึก 5 มิลลิเมตร ความกว้างของร่องมีค่าลดลงจากค่าที่ออกแบบไว้ คือ 5.77 มิลลิเมตร เป็น 5.7 มิลลิเมตร เพื่อความสะดวกในการสร้าง ทำให้ช่องว่างระหว่างแต่ละร่องห่างกันลดลงเป็น 17.1 มิลลิเมตร (จาก 17.31 มิลลิเมตร) เซาะร่องจำนวน 12 ร่อง ลักษณะลูกกลิ้งเซาะร่องแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลูกกลิ้งเซาะร่อง

ส่วนลูกกลิ้งอันบนและล่าง ทำจากยางสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 83.3 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ลูกกลิ้งทั้ง 3 อันมีเพลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตรเป็นแกนกลาง ติดอยู่บนขาตั้งเหล็ก 2 ข้าง ซึ่งกว้าง 100 มิลลิเมตรหนา 12.7 มิลลิเมตร และสูง 500 มิลลิเมตร ระดับของลูกกลิ้งสามารถปรับระยะสูงต่ำได้ประมาณ 10 มิลลิเมตร ขาตั้งทั้ง 2 ข้างเชื่อมอยู่บนฐานซึ่งทำจากเหล็กกว้าง 100 มิลลิเมตรหนา 12.7 มิลลิเมตร และยาว 500 มิลลิเมตร ฐานนี้ยังมีขาตั้งสำหรับวางเฟืองทด มอเตอร์ และสวิตช์สำหรับเปิดปิดเครื่อง สำหรับแกนใส่โน้มีกซ์จะติดกับขาตั้งทั้ง 2 ข้างระหว่างลูกกลิ้งอันบนและอันกลาง โดยอยู่ห่างออกจากลูกกลิ้ง 10 มิลลิเมตร และสามารถปรับระยะสูงต่ำได้ 50 มิลลิเมตร เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวใช้มอเตอร์ขนาด 200 วัตต์ เป็นแรงขับเคลื่อนลูกกลิ้งอันกลาง โดยผ่านเฟืองทดเพื่อลดความเร็วรอบเหลือ 45 รอบต่อนาที และลูกกลิ้งอันกลางขับเคลื่อนลูกกลิ้งอันบนและอันล่างผ่านสายพาน ซึ่งอยู่แต่ละข้างของขาตั้ง โดยลูกกลิ้งอันกลางหมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนลูกกลิ้งอันบนและล่างหมุนทวนเข็มนาฬิกา ลักษณะเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงดังรูปที่ 5.2 และภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 เครื่องต้นแบบสำหรับทากาว



รูปที่ 5.3 ภาพด้านข้างของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว

ถาดสำหรับใส่กาวอีพอกซีเรซินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกผ่าครึ่งตามแนวยาว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ยาว 310 มิลลิเมตร ยึดติดกับขาตั้งทั้ง 2 ข้าง อยู่ด้านล่างของลูกกลิ้งอันล่าง และสามารถถอดออกได้ง่าย ใบมีดสำหรับปาดกาวทำจากสแตนเลส กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 310 มิลลิเมตร หนา 2.5 มิลลิเมตร ติดบนถาดใส่กาว และสามารถปรับระยะห่างจากลูกกลิ้งได้ การใช้งานเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว แผ่นโนเม็กซ์ขนาดกว้าง 11.43 เซนติเมตร ยาว 12 เมตร จะถูกป้อนใส่ในเครื่องต้นแบบที่ระหว่างลูกกลิ้งยางสังเคราะห์อันบนและลูกกลิ้งเซาะร่อง และถาดใส่กาวพร้อมใบมีดปาดกาวจะถูกติดที่ได้ลูกกลิ้งอันล่าง จากนั้นจึงผสมอีพอกซีเรซินทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน แล้วเทใส่ถาดใส่กาว แล้วจึงเริ่มเปิดเครื่องให้มอเตอร์ทำงาน โดยการทำงานในแต่ละแบบทซ์ของเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวจะใช้เวลาประมาณ 20 - 30 นาที หลังจากนั้นจึงล้างทำความสะอาดเครื่อง

การใช้เครื่องต้นแบบสำหรับทากาวเพื่อให้ได้แนวเส้นกาวที่เรียบตรงและมีแนวเส้นพอดีกับขนาดที่ออกแบบทุก ๆ เส้น ผู้ทำการวิจัยได้ทำการทดลองปรับเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว โดยปรับระยะของลูกกลิ้งและตั้งเกดแนวเส้นทากาวที่ได้จนได้แนวเส้นกาวที่เรียบตรงสม่ำเสมอ และได้ใช้ระยะลูกกลิ้งนี้ตลอดการทดลองผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย สำหรับแผ่นโนเม็กซ์ที่ทาแนวกาวอ็อกซีแล้ว จะนำไปวางระเหยตัวทำละลายส่วนเกินที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงตัดแบ่งและวางซ้อนกันเพื่อนำไปบ่ม ได้เป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ดังรูปที่ 5.4 การวางซ้อนกันเพื่อผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายเป็นอีกขั้นตอนที่มีความสำคัญ จำเป็นที่จะต้องให้แนวเส้นกาวที่ได้จากเครื่องทากาวนั้นวางอยู่ในระยะที่ได้ออกแบบไว้ตามหัวข้อ 4.4.1 (รูปที่ 4.8) เพราะแนวเส้นกาวที่วางซ้อนกันไม่ถูกต้องนั้นจะส่งผลกระทบต่อลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่จะได้รวมถึงสมบัติอื่น ๆ ด้วย ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงได้สร้างแผ่นบอกแนวที่มีระยะ 5.7 มิลลิเมตร สลับกับช่องว่าง 17.1 มิลลิเมตร สลับกันไปเรื่อย ๆ บนแผ่นกระดาษเพื่อใช้สำหรับนำแผ่นโนเม็กซ์ที่ทากาวโดยเครื่องต้นแบบแล้วมาวัดระยะให้ถูกต้อง และใช้แผ่นบอกแนวนี้ช่วยในการวางซ้อนทับแผ่นโนเม็กซ์หลาย ๆ ชั้นด้วย ทำให้การผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัวมีความแม่นยำและเหมือนกันในการทดลองทุก ๆ ครั้ง โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายที่ผลิตได้มีขนาดกว้าง 11.43 เซนติเมตร และยาว 15, 20 และ 30 เซนติเมตร สำหรับจำนวนชั้นโนเม็กซ์ 40, 20 และ 14 ชั้น ตามลำดับ ส่วนความหนาอยู่ระหว่าง 3 – 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย กว้าง 11.43 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตรหนา 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.5 ภาพขอบด้านบนของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย

เมื่อได้โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย (รูปที่ 5.4) แล้ว โครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายจะถูกนำมาตัดแบ่งตามด้านกว้างให้มีขนาด 12.7 มิลลิเมตร เพื่อนำมาดึงขยายเป็นโครงสร้างรังผึ้งด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยายต่อไป



### 5.1.2 เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย

เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยายมีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร บริเวณฐานสูง 5 เซนติเมตร ทำจากแผ่นเหล็กแบนเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยม สกรูที่ใช้เชื่อมระหว่างแกนเหล็ก มีขนาดพิทช์ 1 มิลลิเมตร ภาพเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย ขณะดึงขยาย โครงสร้างรังผึ้งแสดงดังรูปที่ 5.6

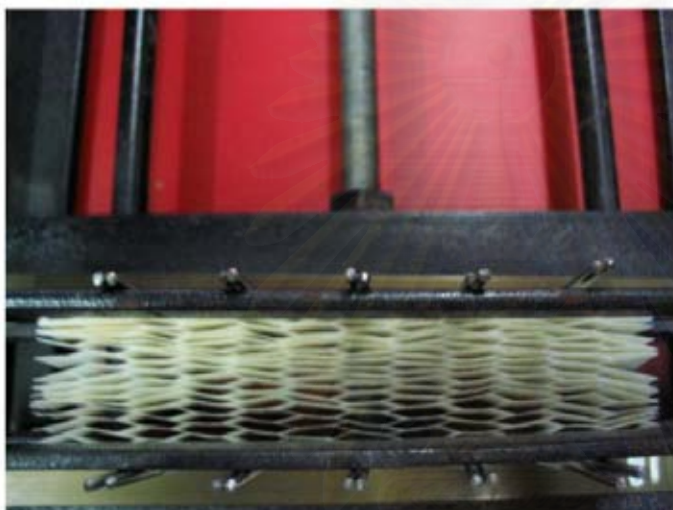


รูปที่ 5.6 เครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย (ภาพด้านบน)

จากรูปที่ 5.6 บริเวณด้านข้างของแกนเหล็กที่เคลื่อนที่เข้าออกด้วยสกรูมีเสาทำจากเหล็กแบนขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร เชื่อมตั้งฉากทั้ง 2 ด้าน เช่นเดียวกับแกนเหล็กที่อยู่กับที่ สำหรับแท่งเหล็กที่ใส่อยู่ในแต่ละเซลล์ที่บริเวณด้านนอกของโครงสร้างรังผึ้ง มีลักษณะเป็นแท่งกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร เสาและแท่งเหล็กในโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้าน จะถูกยึดติดกันด้วยแท่งเหล็กแบนกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร อีกด้านละ 2 อัน ซึ่งวางในแนวตั้งฉากกับเสา (ขนานกับแกนเหล็กที่เชื่อมกับสกรู) เมื่อหมุนสกรูให้แกนเหล็ก



แยกออกจากกัน เส้นและแท่งเหล็กที่ยึดโครงสร้างรังผึ้งแต่ละด้านอยู่ จะช่วยให้ช่องว่างในโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยายให้เปิดออก เป็นโครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์เปิดรูปหกเหลี่ยม และดึงค้างไว้เป็นเวลาประมาณ 30 นาที จึงถอดแท่งเหล็กที่ใส่ในโครงสร้างรังผึ้งออกได้เป็นโครงสร้างรังผึ้ง รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างรังผึ้งขณะถูกดึงขยายด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย (ก) ขณะดึงขยาย และ(ข) หลังจากดึงขยายแล้ว



(ก)



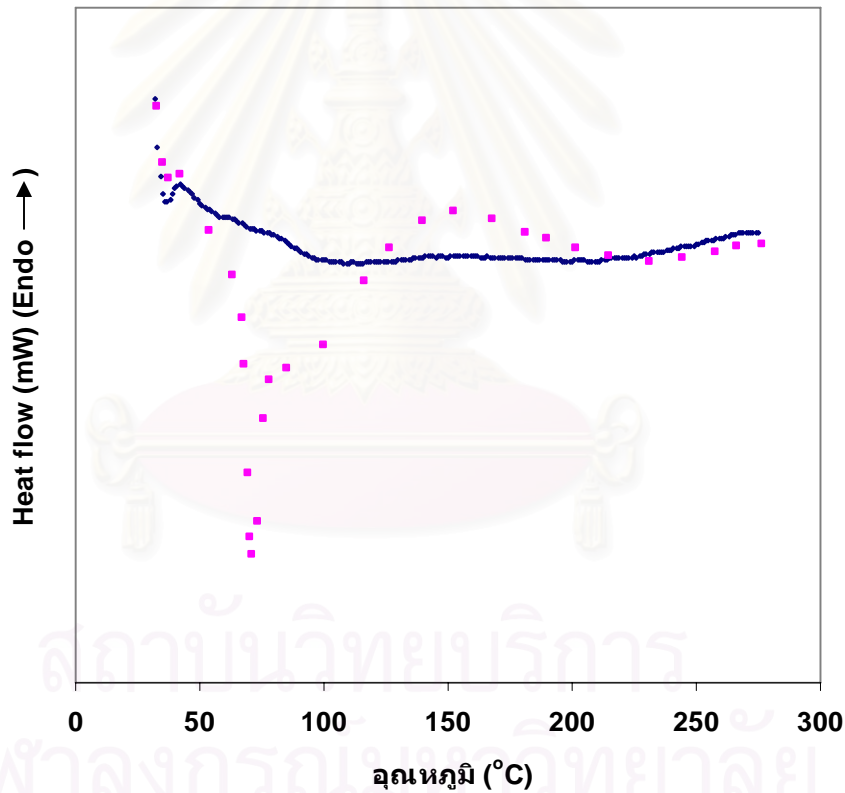
(ข)

รูปที่ 5.7 โครงสร้างรังผึ้งขณะถูกดึงขยายด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย (ก) ขณะดึงขยาย และ(ข) หลังจากดึงขยายแล้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 ผลการวัดสมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์

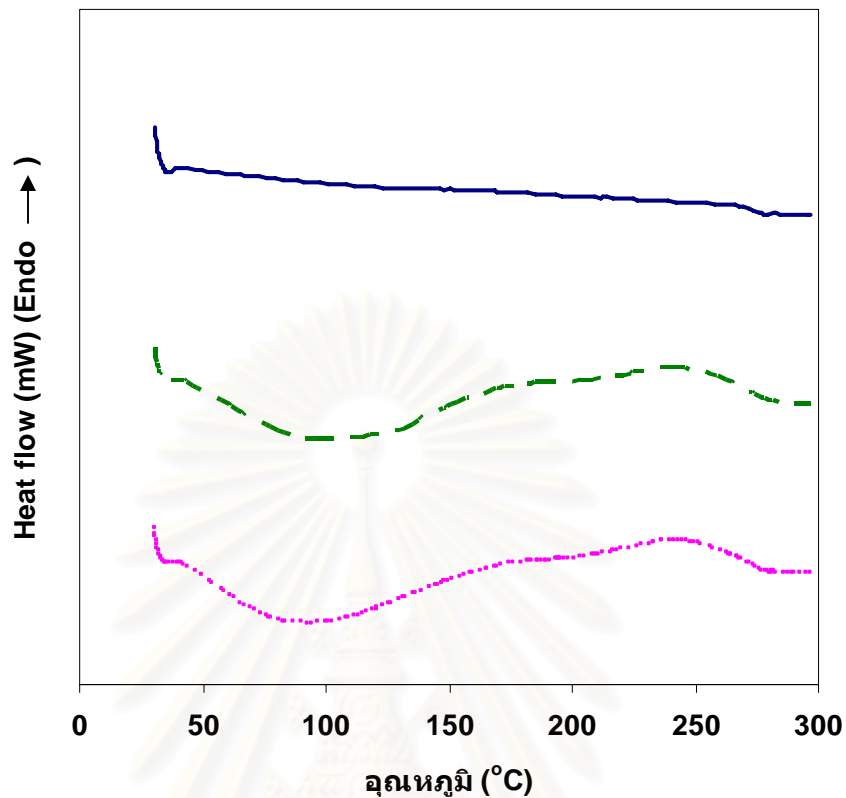
สมบัติการบ่มของอีพอกซีเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์ถูกทดสอบโดย Differential scanning calorimeter (DSC) อุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 100, 140 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาบ่ม 24 ชั่วโมงถึงจะให้การบ่มที่สมบูรณ์ ส่วนที่อุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการบ่มเป็นเวลา 6 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิงขยายจึงตัดสินใจเลือกใช้อุณหภูมิการบ่ม 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดิงขยายจากการทดสอบด้วย DSC แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของชิ้นงานตัวอย่างจากการทดสอบด้วย DSC ( — โครงสร้างรังผึ้งก่อนดิงขยายก่อนบ่ม  
- - - โครงสร้างรังผึ้งก่อนดิงขยายแต่หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง)

### 5.3 ผลการวัดสมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์

สมบัติการบ่มของฟีนอลิกเรซินที่ใช้สำหรับจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งนั้น ได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิการบ่ม 120 และ 140 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสนั้น พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการระเหยเอทานอลเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปบ่ม 45, 60, 90 และ 120 นาทีแล้วนั้น โครงสร้างรังผึ้งที่ได้มีผิวเรียบสวยงามดี จึงทำการทดสอบสมบัติการบ่มด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) ผลปรากฏว่าฟีนอลิกเรซินที่บ่มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 และ 120 นาทีนั้น การบ่มยังไม่สมบูรณ์ ส่วนการบ่มฟีนอลิกเรซินที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสนั้นต้องใช้ระยะเวลาในการระเหยเอทานอล 24 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มจึงจะได้ผิวโครงสร้างรังผึ้งที่เรียบ และเมื่อทดสอบสมบัติการบ่มด้วยเครื่อง DSC แล้วพบว่าการบ่มที่ 140 องศาเซลเซียส 30 นาทีก็ให้การบ่มที่สมบูรณ์แล้ว ดังนั้นในการเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน จึงเลือกใช้เวลาระเหยเอทานอล 24 ชั่วโมงและบ่มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของฟีนอลิกเรซินที่ทาบนโนเม็กซ์จากการทดสอบด้วย DSC แสดงในรูปที่ 5.9



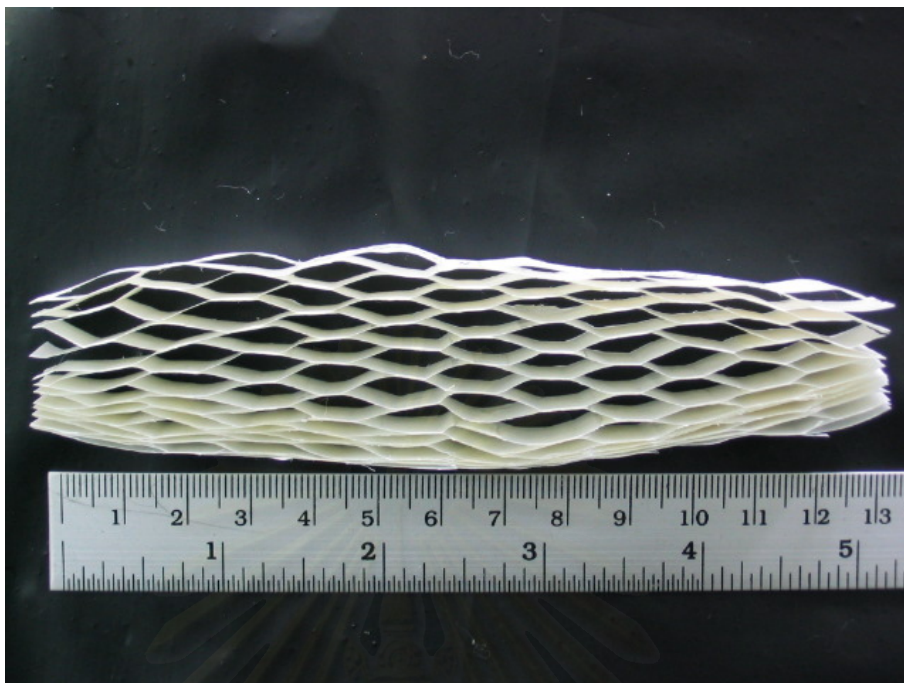
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน (Heat flow) ของชิ้นงาน ตัวอย่างพินอลิเกรซินที่ทาบนโนเม็กซ์จากการทดสอบด้วย DSC (— บ่มที่ 140 องศาเซลเซียส 30 นาที, ..... บ่มที่ 120 องศาเซลเซียส 60 นาที และ - - - บ่มที่ 120 องศาเซลเซียส 120 นาที)

#### 5.4 ขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้

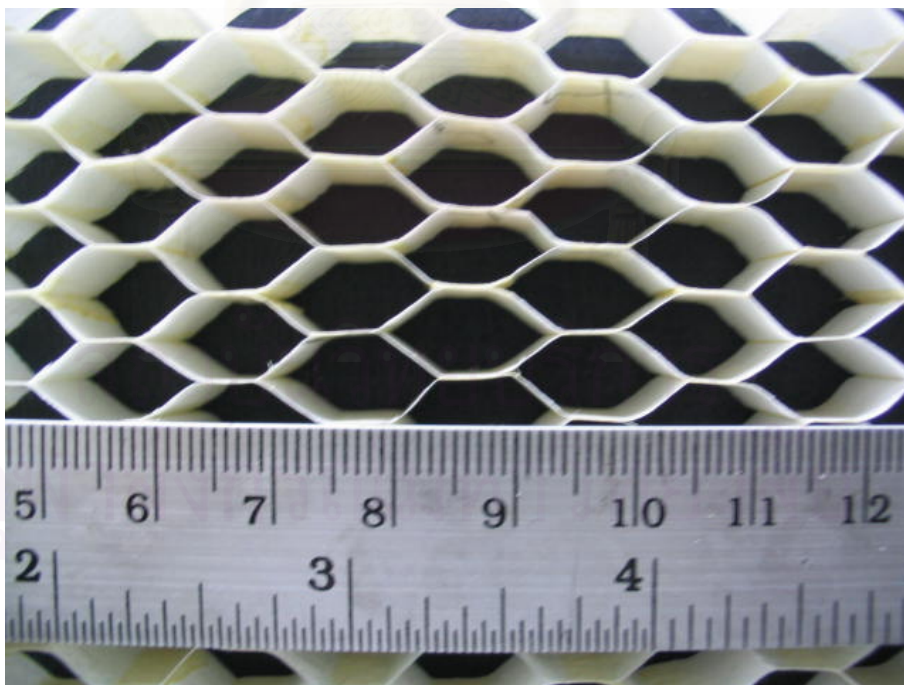
ขนาดเซลล์และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งเป็นสมบัติที่สำคัญ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้ง เมื่อพิจารณาโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุประเภทเดียวกัน โครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์ขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์ขนาดใหญ่กว่า แต่ในขณะเดียวกัน โครงสร้างรังผึ้งที่มีเซลล์ขนาดเล็กก็จะมีน้ำหนักหนาแน่นมากกว่า ส่วนลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งก็มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรังผึ้งเช่นกัน เซลล์ที่มีลักษณะหกเหลี่ยมด้านเท่าจะทำให้สมบัติความทนแรงอัดที่ดีที่สุด

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง เมื่อผ่านขั้นตอนการดึงขยายแล้ว ดังรูปที่ 5.10 พบว่าหลังจากนำโครงสร้างรังผึ้งออกจากเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยายแล้ว โครงสร้างรังผึ้งไม่มีความเสถียร มีลักษณะหดตัวเล็กน้อย และพยายามคืนรูปไปอยู่ในลักษณะของโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย จึงจำเป็นต้องเพิ่มความเสถียรให้โครงสร้างรังผึ้งด้วยการอบอ่อนในโมลด์ครึ่งหกเหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้หลังจากผ่านการอบอ่อนแล้ว โครงสร้างรังผึ้งมีความเสถียรมากขึ้น ดังรูปที่ 5.11





รูปที่ 5.10 โครงสร้างรังผึ้งหลังจากดึงขยายด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยายแล้วปล่อยให้เป็นเวลา  
ประมาณ 3 วัน



รูปที่ 5.11 โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการอบอ่อนใน โมลด์และแท่งทกเหลี่ยม

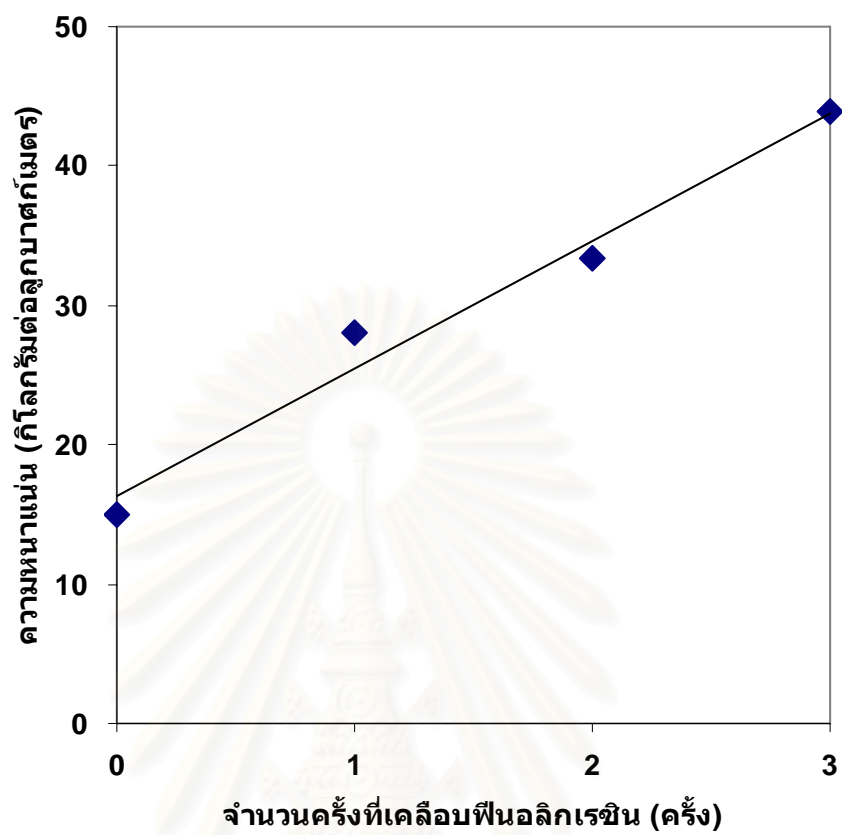


หลังจากผ่านการอบอ่อนในโมลต์แล้ว โครงสร้างรังผึ้งจะถูกนำมาวัดขนาดเซลล์ และด้านต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งใน 1 เซลล์นั้นจะประกอบด้วยส่วนที่เชื่อมติดกัน 2 ด้าน และส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน 4 ด้าน โดยขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีค่า 8.44 มิลลิเมตร ส่วนที่เชื่อมติดกันกว้าง 5.41 มิลลิเมตร และส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันกว้าง 6.32 มิลลิเมตร นั่นคือเซลล์ที่ได้มีลักษณะไม่เป็นหกเหลี่ยม ด้านเท่า และมุมที่ขยายออกมีค่าไม่ถึง 60 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบในตอนแรก ซึ่งเซลล์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า ด้านละ 5.7 มิลลิเมตร และมุมที่ขยายออกเป็น 60 องศา ซึ่งจะมีขนาดเซลล์เท่ากับ 9.87 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้จริงมีลักษณะเซลล์แตกต่างกัน จึงได้ปรับปรุงค่าที่ออกแบบให้สอดคล้องกับโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ โดยให้มุมที่ขยายออกมีค่าเป็น 52 องศา ส่วนที่เชื่อมติดกัน และส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันกว้าง 5.40 และ 6.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเซลล์เท่ากับ 9.9 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 วัน พบว่าโครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะหดตัวลงอีก ทำให้อาณาเขตเซลล์ลดลงอีกเหลือ 7.67 มิลลิเมตร และมุมที่ขยายออกลดลงเป็น 42 องศา ดังนั้นเพื่อคงความเสถียรและเพิ่มความแข็งแรงแก่โครงสร้างรังผึ้ง จึงจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซิน หนึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากวัสดุประเภท โนเม็กซ์นั้นจะต้องมีการเสริมความแข็งแรงด้วยการเคลือบเรซินเพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตจากโนเม็กซ์ของบริษัท Hexcel จำกัด ก็เคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินเช่นกัน

ในการจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินจะใช้โครงไม้เป็นตัวยึดโครงสร้างรังผึ้ง ทำให้โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการจุ่มเคลือบแล้ว มีขนาดเซลล์เท่ากับ 9.86 มิลลิเมตร มุมขยาย 51.7 องศา และส่วนที่เชื่อมติดกัน และส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันกว้าง 5.38 และ 6.63 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าโครงสร้างรังผึ้งมีความเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปก็ไม่หดตัวลงอีก (ตาราง ก.1 แสดงลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้)

## 5.5 ความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจุดเด่นของโครงสร้างรังผึ้งคือ เป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้จึงเป็นสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างรังผึ้ง หนึ่ง โครงสร้างรังผึ้งจากวัสดุประเภทโพลีเอทิลีนที่มีขายอยู่ในปัจจุบันนี้ มีขนาดเซลล์และความหนาแน่นหลากหลาย ยกตัวอย่างโครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด โครงสร้างรังผึ้ง 1 ชนิดมีขนาดเซลล์ตั้งแต่ 1.5 มิลลิเมตร จนถึง 9.5 มิลลิเมตร และแต่ละขนาดเซลล์มีความหนาแน่นตั้งแต่ 24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปจนถึง 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ 9.5 มิลลิเมตรนั้น จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 24 ถึง 48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากในงานวิจัยนี้โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ซึ่งมีขนาดเซลล์ 9.86 มิลลิเมตรนั้น มีความหนาแน่นก่อนเคลือบฟีนอลิกเรซินประมาณ 15.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหลังจากเคลือบฟีนอลิกเรซินแล้วมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 27.7 ถึง 43.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งและจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบ



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งและจำนวนครั้งที่เคลือบพื้นอลิกเรซิน

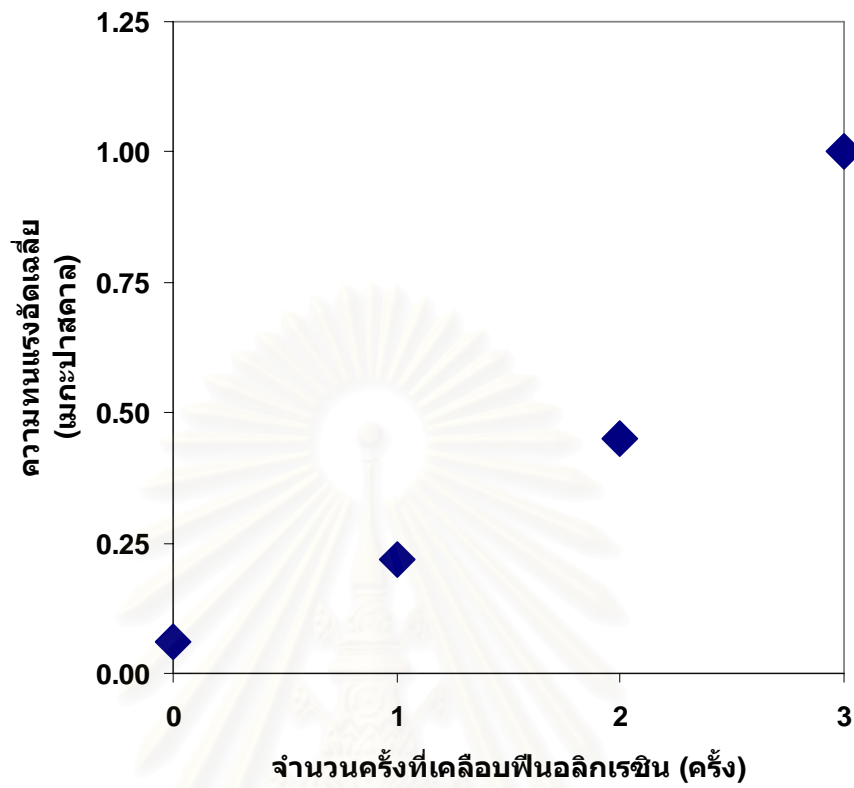
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.6 สมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งที่ได้

### 5.6.1 ความทนแรงอัด

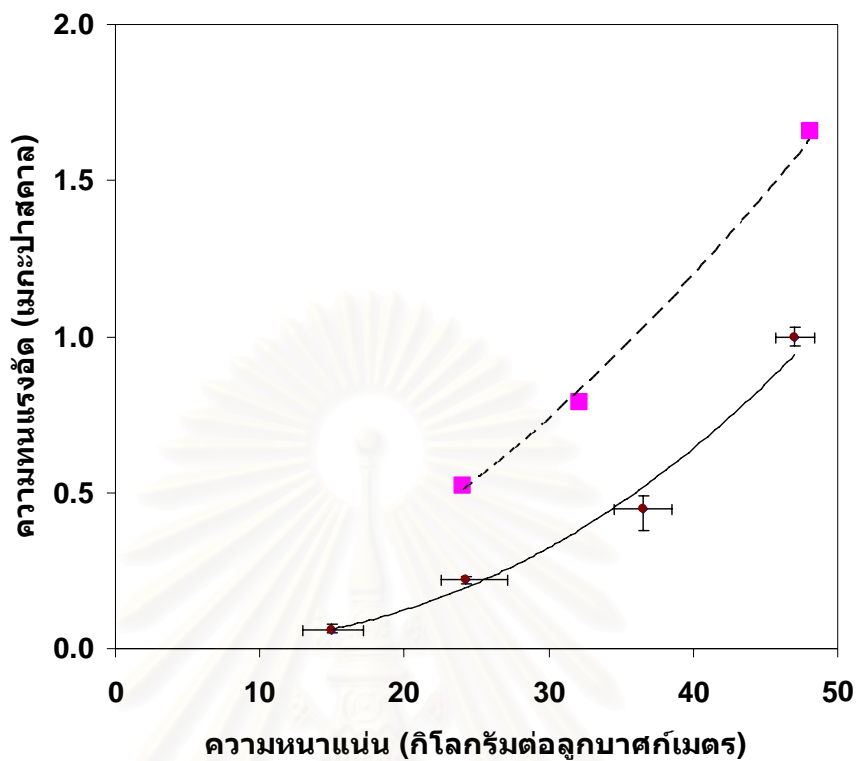
สมบัติความทนแรงอัดแบบ Bare compression ของโครงสร้างรังผึ้งถูกทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 5,806.44 ตารางมิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร ค่าความทนแรงอัดได้จาก load-deformation curve รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดเฉลี่ยของโครงสร้างรังผึ้งและจำนวนครั้งที่เคลือบพีนอลิกเรซิน โครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการเคลือบด้วยพีนอลิกเรซิน 1 และ 2 ครั้ง มีความทนแรงอัดเพิ่มมากขึ้น 266.67 และ 104.55 % ตามลำดับ สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่เคลือบพีนอลิกเรซิน 3 ครั้งนั้นจะมีความทนแรงอัดเพิ่มขึ้น 122.22% โดยการเสียรูปเนื่องจากแรงอัดสำหรับโครงสร้างที่ผลิตจากวัสดุประเภทอามิดนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดจากการโค้งงอ (Buckling) ความสามารถในการต้านทานการเสียรูปประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของเรซินที่ใช้เคลือบ นอกจากนี้ความหนาของผนังเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งก็เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดสมบัติความทนแรงอัด ผนังเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการเคลือบด้วยเรซินแล้วที่บริเวณส่วนที่เชื่อมติดกันจะมีความหนามากที่สุด ส่วนบริเวณตรงกลางของผนังเซลล์ของส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันจะบางที่สุด เมื่อโครงสร้างรังผึ้งเกิดการโค้งงอจนถึงจุด yield ที่จุดที่แข็งแรงน้อยที่สุดในเซลล์ ซึ่งคือบริเวณที่บางที่สุดแล้ว บริเวณรอบๆ ผนังเซลล์จึงจะเริ่มเกิดการเสียรูป [10]

โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ ซึ่งมีขนาดเซลล์ 9.86 มิลลิเมตร ความหนาแน่นประมาณ 15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความทนแรงอัด 0.06 เมกะปาสคาล ส่วนโครงสร้างรังผึ้งที่มีความหนาแน่น 47 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความทนแรงอัด 1 เมกะปาสคาล รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดและความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด โดยเลือกโครงสร้างรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์ใกล้เคียงกัน ในที่นี้ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีขนาดเซลล์ 9.86 มิลลิเมตร และความหนาแน่นประมาณ 45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความทนแรงอัด 1 เมกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด ที่ขนาดเซลล์ 9.53 มิลลิเมตร และความหนาแน่น 48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ามีความทนแรงอัดเท่ากับ 1.66 เมกะปาสคาล คาดว่าความแตกต่างของค่าความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้กับของบริษัทนั้นมีผลมาจากขนาดของเซลล์ ความหนาแน่น และลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ไม่เป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดเฉลี่ยของโครงสร้างฝังและจำนวนครั้งที่เคลือบฟีนอลิกเรซิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงอัดและความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้ง

( ◆ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ ขนาดเซลล์ 9.87 มม.

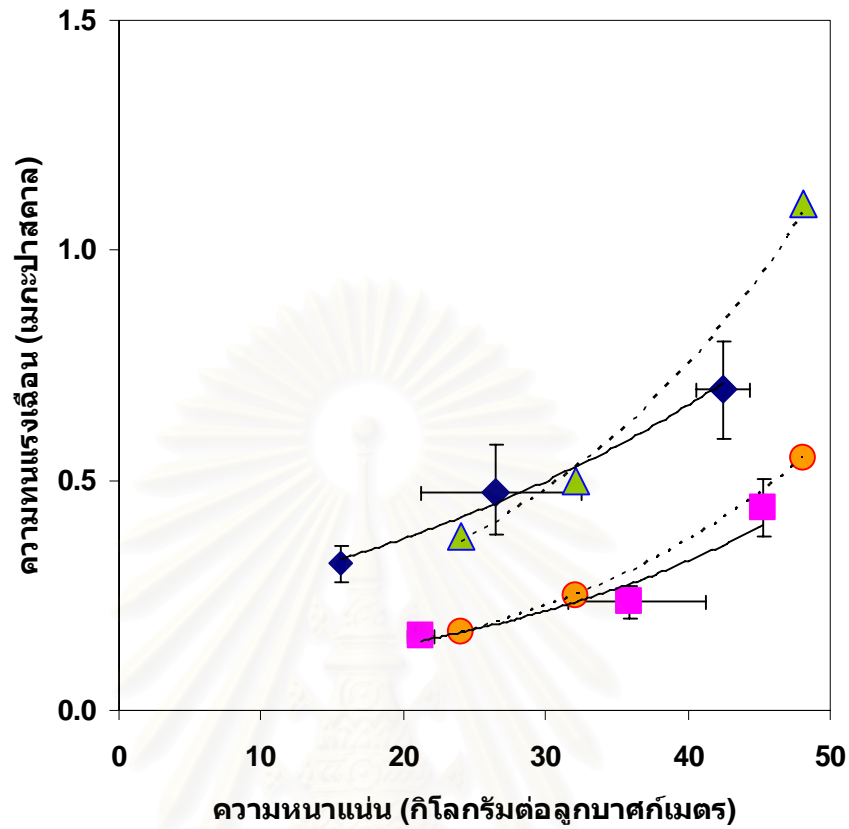
■ โครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด ขนาดเซลล์ 9.5 มม.)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 5.6.2 ความทนแรงเฉือน

ในที่นี้ ได้ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้ง โดยวัดในด้านยาว และด้านกว้าง ผลปรากฏว่าโครงสร้างรังผึ้งความหนาแน่นประมาณ 15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความทนแรงเฉือนในด้านยาว 0.32 เมกะปาสคาล ส่วนความหนาแน่นประมาณ 43 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความทนแรงเฉือนด้านยาวเท่ากับ 0.7 เมกะปาสคาล ส่วนความทนแรงเฉือนในด้านกว้างสำหรับโครงสร้างรังผึ้งความหนาแน่น 22 และ 45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่า 0.16 และ 0.44 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ความทนแรงเฉือนในด้านยาวมีค่ามากกว่าด้านกว้างอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณาในหนึ่งเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง ความทนแรงเฉือนของส่วนที่เชื่อมติดกันจะมีค่ามากกว่าส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน จึงทำให้ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันเกิดการเสียรูปแบบโค้งงอ ก่อนส่วนที่เชื่อมติดกัน ดังนั้นเมื่อวัดความทนแรงเฉือนในด้านยาวซึ่งขนานไปกับส่วนที่เชื่อมติดกันจึงได้ค่ามากกว่าความทนแรงเฉือนในด้านกว้างซึ่งวัดในด้านที่ตั้งฉากกับส่วนที่ไม่เชื่อมติดกัน เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด ที่มีขนาดเซลล์ 9.5 มิลลิเมตร และความหนาแน่น 48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรากฏว่าความทนแรงเฉือนในด้านยาวและด้านกว้างมีค่า 1.1 และ 0.55 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (รูปที่ 5.15) โดยโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้มีความทนแรงเฉือนในด้านยาวและด้านกว้างน้อยกว่าโครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel เท่ากับ 36.4 และ 20% ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงเฉือน และความหนาแน่นของ  
โครงสร้างรังผึ้ง

( ◆ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ L direction

■ โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ W direction

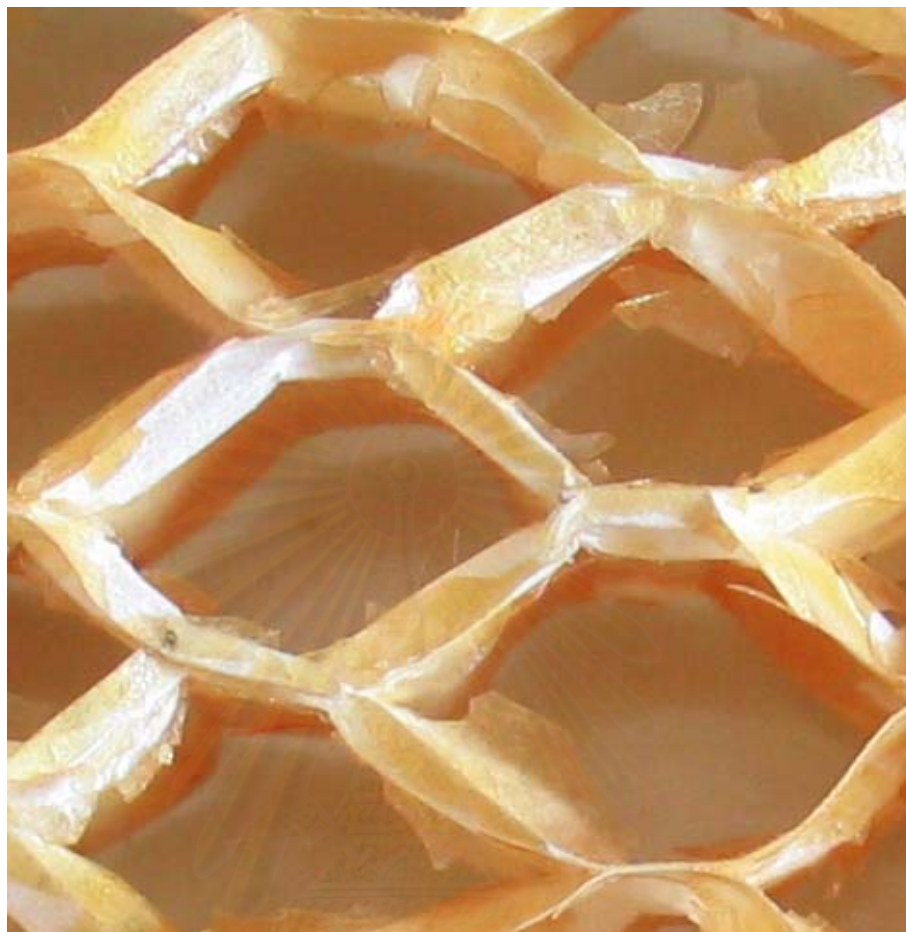
▲ โครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด L direction

● โครงสร้างรังผึ้งของบริษัท Hexcel จำกัด W direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.7 ผลการสังเกตลักษณะพื้นผิวโครงสร้างรังผึ้งก่อนและหลังการทดสอบทางกล

โครงสร้างรังผึ้งหลังจากผ่านการทดสอบทางกลแล้ว เมื่อนำมาเปรียบเทียบลักษณะก่อนและหลังการทดสอบ พบว่าหลังจากทดสอบความทนแรงอัดแล้ว โครงสร้างรังผึ้งมีลักษณะดังรูปที่ 5.15 พื้นผิวด้านที่รับแรงอัดจะมีลักษณะยุบตัวลงทั่วเซลล์ ทั้งในส่วนที่เชื่อมติดกันและไม่เชื่อมติดกัน ความหนาลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และฟिनอลิกเรซินที่เคลือบอยู่ในบริเวณที่มีการยุบตัวก็เกิดการหลุดลอกออกเป็นแผ่นเล็กๆ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานว่าการเสียรูปจากการทดสอบความทนแรงอัดนี้ขึ้นอยู่กับเรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้ง [10] ดังที่กล่าวไว้ในข้อ 5.6.1 สำหรับโครงสร้างรังผึ้งที่ผ่านการทดสอบความทนแรงเฉือน (ด้านกว้าง) แสดงดังรูปที่ 5.16 แนวที่ฉีกขาดออกจากกันบนโครงสร้างรังผึ้งหลังจากทดสอบความทนแรงเฉือน (ทั้งด้านกว้างและด้านยาว) มีลักษณะเป็นแนวทแยงจากมุมด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ตามแนวแรงที่กระทำกับชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้ (รูปที่ 4.19) และมีฟिनอลิกเรซินหลุดลอกออกเป็นแผ่นเล็กๆ เช่นเดียวกับการทดสอบความทนแรงอัด

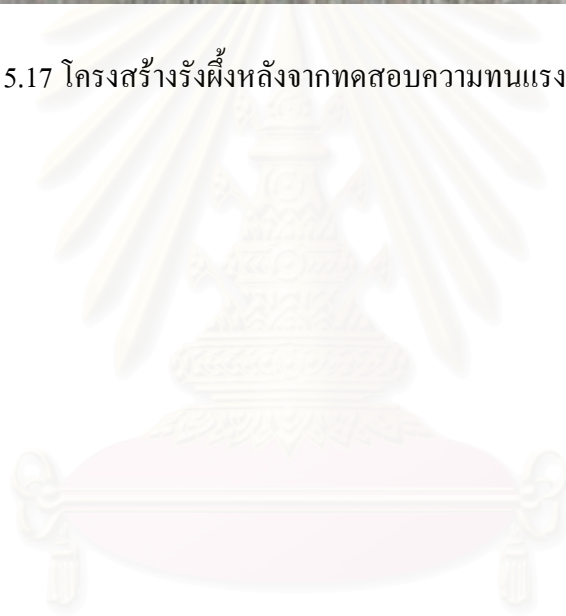


รูปที่ 5.16 โครงสร้างรังผึ้งหลังจากทดสอบความทนแรงอัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 โครงสร้างรังผึ้งหลังจากทดสอบความทนแรงเหวี่ยง (ด้านกว้าง)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งได้ถูกทำการพัฒนาขึ้น โดยประกอบด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว และเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย โครงสร้างรังผึ้งจากโพลิเมอร์ผลิตขึ้นโดยเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้ง โดยวิธีการเชื่อมติดด้วยกาว และกระบวนการผลิตแบบดึงขยาย ซึ่งกาวที่ใช้คือ อีพอกซีเรซิน โครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตขึ้น มีขนาดเซลล์เล็กกว่าที่ได้ออกแบบไว้ และมีลักษณะไม่เป็นหกเหลี่ยมด้านเท่าอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากส่วนที่เชื่อมติดกันด้วยอีพอกซีเรซินมีขนาดเล็กกว่าที่ออกแบบไว้ ทำให้ส่วนที่ไม่เชื่อมติดกันของเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น เซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้จึงมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมด้านไม่เท่า และมีมุมดึงขยายเล็กกว่า 60 องศา คือประมาณ 48.2 องศา นอกจากนี้ เมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างรังผึ้งมีการหดตัวเล็กน้อย จึงจำเป็นต้องเคลือบโครงสร้างรังผึ้งด้วยฟีนอลิกเรซินเพื่อเพิ่มความเสถียร โดยใช้วิธีจุ่มเคลือบ 1, 2 และ 3 ครั้ง ในการจุ่มเคลือบใช้โครงไม้สำหรับยึดโครงสร้างรังผึ้งไม่ให้เกิดการหดตัว ทำให้หลังจากผ่านการเคลือบฟีนอลิกเรซินแล้ว โครงสร้างรังผึ้งมีความเสถียร มีขนาดเซลล์เท่ากับ 9.86 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 27.7 – 48.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สำหรับการจุ่มเคลือบ 1, 2 และ 3 ครั้ง) ตามวัตถุประสงค์ สมบัติความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งมีค่า 0.06 – 1.00 เมกะปาสคาล และความทนแรงเฉือนในด้านยาวมีค่า 0.32 - 0.70 เมกะปาสคาล และความทนแรงเฉือนด้านกว้างมีค่า 0.16 - 0.44 เมกะปาสคาล อนึ่ง สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบ่มโครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว คือ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

#### 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับในส่วนของปัญหาและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. จากผลการทดลองผลิตโครงสร้างรังผึ้งจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนและมีอิทธิพลกับสมบัติอื่นๆ ของโครงสร้างรังผึ้งคือ ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่มีลักษณะไม่เป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า และมีมุมขยายไม่ถึง 60 องศา ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่น และ



สมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้ง ดังนั้นสำหรับการออกแบบขนาดเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้ง และ ส่วนต่างๆ ของเครื่องสำหรับทากาวเพื่อผลิตโครงสร้างรังผึ้งก่อนดึงขยาย ควรจะต้องปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ของขนาดและลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ และ ปรับปรุงเครื่องต้นแบบสำหรับทากาวที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้

2. สำหรับเครื่องต้นแบบสำหรับดึงขยาย เป็นเครื่องมือง่ายๆ ที่ผู้ทำการวิจัยได้ทำการ ออกแบบขึ้นเอง เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลอ้างอิงจากผู้ผลิตได้ ดังนั้นการปรับปรุงให้เครื่องมือมีความแม่นยำและเพิ่มเติมเทคนิคมากขึ้นจะทำให้การดึงขยายโครงสร้างรังผึ้งดีขึ้น

3. วัสดุหลักสำหรับผลิตโครงสร้างรังผึ้งด้วยวิธีเชื่อมติดด้วยกาวและดึงขยาย คือ วัสดุที่เป็นแผ่นเรียบ และกาวสำหรับใช้เชื่อมติดกัน เนื่องจากวัสดุที่สามารถนำมาผลิตเป็นโครงสร้างรังผึ้งมีหลากหลายชนิด หากนำมาศึกษาให้เหมาะสมจะได้โครงสร้างรังผึ้งที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่า โครงสร้างรังผึ้งที่ทำได้ในงานวิจัยนี้

4. ในการเพิ่มสมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิต โครงสร้างรังผึ้ง เรซินที่ใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งก็มีความสำคัญ การพัฒนาเรซินที่เหมาะสมสำหรับใช้เคลือบโครงสร้างรังผึ้งก็เป็นแนวทางที่จะได้โครงสร้างรังผึ้งที่มีสมบัติที่ดีขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

## รายการอ้างอิง

1. Tom Bitzer. Honeycomb Technology. London UK: Chapman & Hall., 1997.
2. Dagobert Budwig. Process of Manufacturing Honeycomb Paper. US.Patent No. 765,412 1904.
3. Roger C. Steel. Method of and Apparatus for Making Honeycomb Material. US. Patent No. 2,610,934 1952
4. Roger C. Steel. Method of Producing Honeycomb. US. Patent No. 2,734,843 1956.
5. Henry L. Knoll. Method of Making Honeycomb. US. Patent No. 2,983,640 1961.
6. H. Freeman Seebo. Apparatus and Method for Forming Honeycomb Core. US. Patent No. 5,354,394 1994.
7. Doyle G. Dixon. Method for Making Thermally Fused Thermoplastic Honeycomb Structures. US. Patent No. 5,421,935 1995.
8. 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 2003.
9. Maumus, et al.. Method of manufacturing honeycomb structures. US Patent No. 6,830,718 2004.
10. J.E. Shafizadeh and J.C. Seferis. Scaling of honeycomb compressive yield stresses. Composites Part A: applied science and manufacturing 2000.
11. Cawse, et al.. Particulate reinforcement for honeycomb core materials. US Patent No. 6,117,518 2000.
12. [www.netcomposites.com](http://www.netcomposites.com)
13. Ani Ural. Fracture mechanics approach to facesheet delamination in honeycomb: measurement of energy release rate of the adhesive bond. Engineering Fracture Mechanics 2003.
14. Encyclopedia of polymer science and engineering. Vol.7. Wiley Interscience, 1985.
15. นิต์สน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. เล่ม 1. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : หน่วยพิมพ์เอกสารและตำรา, 2543.
16. [www.users.globalnet.co.uk](http://www.users.globalnet.co.uk)
17. DuPont, Nomex Datasheet.
18. Encyclopedia of polymer science and engineering. Vol.6. Wiley Interscience, 1985.

19. WG Potter. Uses of epoxy resins. London : Newnes – Butter Worths, 1975.
20. www.vantico.com
21. Swaraj Paul. Surface Coating. John Wiley & Sons, 1996.
22. อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
23. www.plenco.com
24. www.dupont.com/nomex
25. Thai epoxy and allied products Co., Ltd.. Technical Data Sheet: EPOTEC YD582 / TH7278  
2003.
26. Thai GCI Resitop Co., Ltd.. Datasheet of Phenolic resin PL-2211.
27. www.hexcel.com
28. ASTM D 899 – 94, Standard Test Method for Applied Weight Per Unit Area of Liquid Adhesive.
29. ASTM D 2471 – 94, Standard Test Method for Gel Time and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting Resins.
30. ASTM C 365 – 94, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
31. ASTM C 273 – 94, Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้

ตาราง ก.1 ลักษณะเซลล์ของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้

โครงสร้างรังผึ้ง	ความหนาแน่น	มุม	ขนาดเซลล์	Node wall	Free wall
	kg/m <sup>3</sup>	องศา	mm	mm	mm
1. ค่าออกแบบ	< 50	60.0	9.87	5.70	5.70
2. ค่าออกแบบที่ปรับปรุง	< 50	52.0	9.90	5.40	6.60
3. โครงสร้างรังผึ้งหลังจาก heat setting	15.1	48.2	8.44	5.41	6.32
4. เวลา 3 วันหลังจาก heat setting (ไม่เคลือบ)	17.0	42.0	7.67	5.58	6.20
5. หลังจากเคลือบด้วยฟีนอลิกเรซิน (1-3 ครั้ง)	27.7 – 48.3	51.7	9.86	5.38	6.63

## ภาคผนวก ข.

## สมบัติทางกลของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้

ตาราง ข.1 ค่าความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ (ทดสอบด้วยเครื่อง LLOYD รุ่น LR10K บริษัท Intro Enterprise จำกัด)

Honeycomb density	Compressive strength
kg/m <sup>3</sup>	MPa
14.97	0.06
24.29	0.22
36.52	0.45
47.03	1.00

ตาราง ข.2 ค่าความทนแรงเฉือนของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้ (ทดสอบด้วยเครื่อง LLOYD รุ่น LR10K บริษัท Intro Enterprise จำกัด)

Honeycomb	Density	Shear strength
	kg/m <sup>3</sup>	MPa
L direction	15.65	0.32
	26.45	0.47
	42.46	0.70
W direction	21.21	0.16
	35.85	0.24
	45.30	0.44



## ภาคผนวก ค.

## การหาน้ำหนักกาวต่อพื้นที่ ASTM D 899 – 94 [28]

Standard Test Method for Applied Weight per Unit Area of Liquid Adhesive: D 899 – 94

คำนวณหาน้ำหนักของกาวที่เป็นของเหลวต่อพื้นที่ได้จาก

$$S = \frac{[(W_2 - W_1) \times 317.5]}{(N \times A)} \quad (7)$$

เมื่อ

$$S = \text{น้ำหนักกาวต่อพื้นที่ (ปอนด์ต่อ 1,000 ตารางฟุต)}$$

$$W_2 = \text{น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (Specimen) ทันทีหลังจากที่ทาากาว (กรัม)}$$

$$W_1 = \text{น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างก่อนทาากาว (กรัม)}$$

$$A = \text{พื้นที่ที่ทาากาวต่อครั้ง (ตารางนิ้ว)}$$

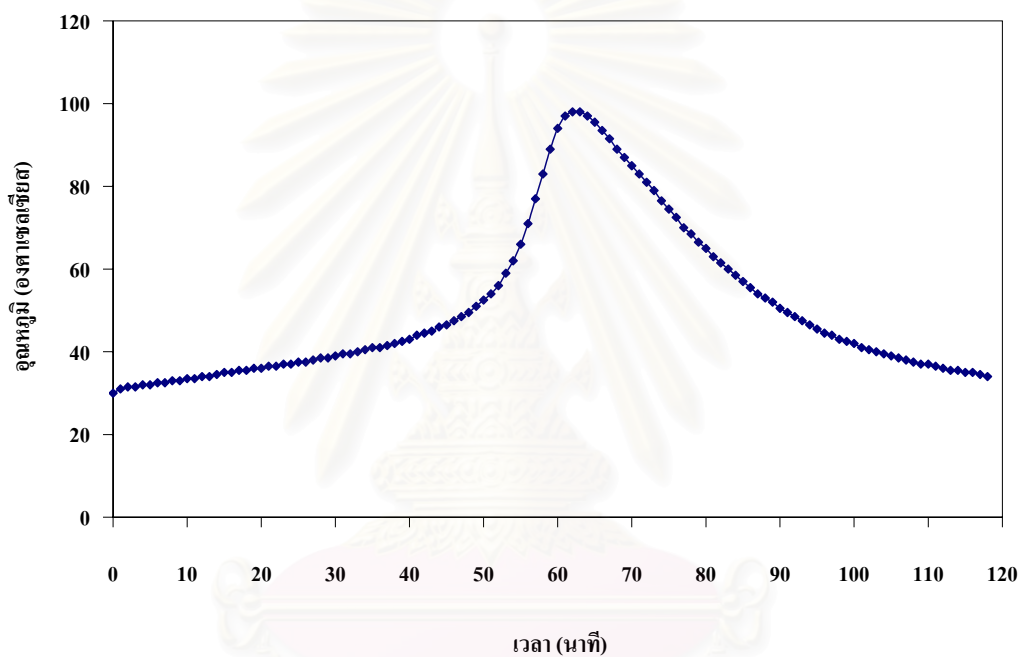
$$N = \text{จำนวนครั้งที่ทาากาว}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง.

การหาระยะเวลาที่เรซินเทอร์โมเซตเปลี่ยนสภาพเป็นเจล และระยะเวลา Pot – life  
ASTM D 2471 – 94 [29]

การทดลองหาระยะเวลาที่อีพอกซีเรซินเปลี่ยนสภาพเป็นเจล และระยะเวลา Pot – life ตาม  
มาตรฐาน ASTM D 2471 - 94



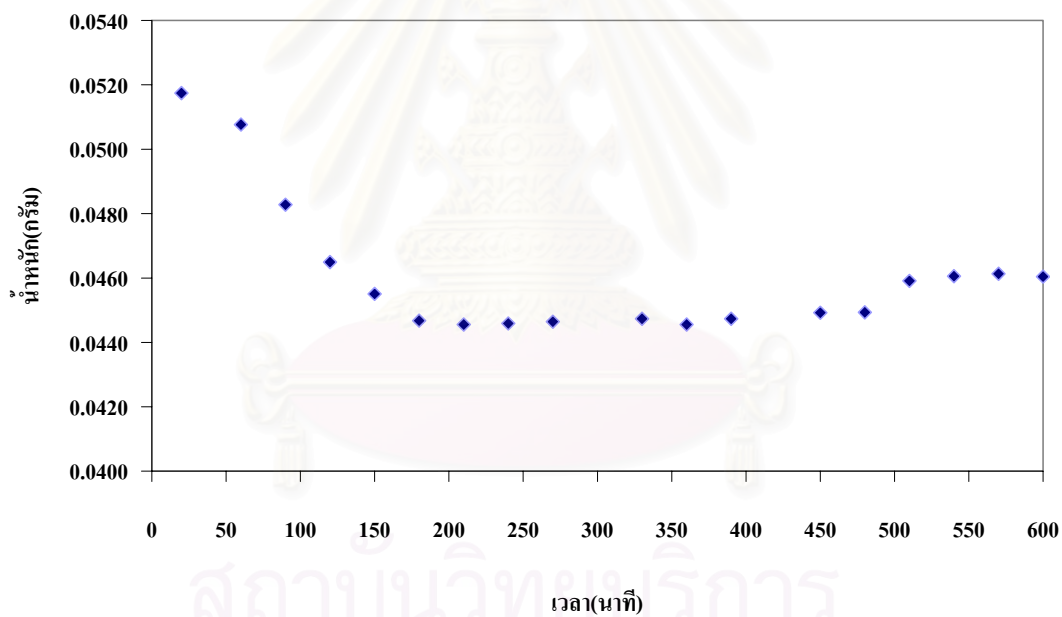
รูปที่ ง.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจึงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของอีพอกซีเรซิน  
YD582/TH7278

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจึงของอีพอกซีเรซิน YD582/TH7278 ที่  
เปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้ระยะเวลาที่อีพอกซีเรซินเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นเจล ณ เวลา 55 นาที และ  
ระยะเวลา Pot – life ของอีพอกซีเรซินสภาวะที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 60 นาที

## ภาคผนวก จ.

## การระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน

การระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซิน ใช้วิธีวางไว้บนโต๊ะที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกำหนดระยะเวลาที่ควรใช้จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอีพอกซีเรซินที่ทาบน โนเม็กซ์เทียบกับเวลา โดยในการทดลองทาอีพอกซีเรซิน (อัตราเรซินต่อตัวทำแข็ง 100 ต่อ 27 โดยน้ำหนัก) บนโนเม็กซ์ ให้น้ำหนักอีพอกซีเรซินต่อพื้นที่และสภาวะในการทดลองเหมือนกับการใช้กับเครื่องต้นแบบสำหรับทาขาว (ภาคผนวก ก.) จากนั้นวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง และชั่ง น้ำหนักอีพอกซีเรซินและโนเม็กซ์เทียบกับเวลา



รูปที่ จ.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของอีพอกซีเรซิน YD582/TH7278 ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอีพอกซีเรซินที่ทาบน โนเม็กซ์ เทียบกับเวลา โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยมาพลอตกราฟระหว่างน้ำหนักของอีพอกซีเรซินและเวลา พบว่าในช่วงแรกน้ำหนักของอีพอกซีเรซินจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนผ่านไป 3 ชั่วโมง น้ำหนักของอีพอกซีเรซินเริ่มคงที่ และคงที่ต่อไปเรื่อยๆ จนถึง 5 ชั่วโมง ดังนั้นในการผลิต

โครงสร้างรังผึ้งก่อนขยายตัว เมื่ออีพอกซีเรซินถูกทาบนโนเม็กซ์ด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับทากาว แล้ว จึงให้ระยะเวลาสำหรับระเหยตัวทำละลายส่วนเกินในอีพอกซีเรซินเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาวางซ้อนกันตามขั้นตอนต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ.

## การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟีนอลิกเรซินที่เคลือบบนโพลีเอทิลีน

การทดลองหาความเข้มข้นของฟีนอลิกเรซินที่เหมาะสมสำหรับจุ่มเคลือบโครงสร้างรังผึ้ง เพื่อให้ได้โครงสร้างรังผึ้งที่มีผิวเรียบ ไม่เกิดฟอง โดยทำการทดลองดังนี้

1. ทดลองปรับความหนืดของฟีนอลิกเรซินโดยเติมเอทานอล จากความเข้มข้นที่ซื้อ มา 58.99%w ปรับลดเป็น 20.23%w, 25.28%w และ 33.7%w ตามลำดับ และทดลองเคลือบ โครงสร้างรังผึ้งโดยวิธีการจุ่ม ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งน้ำหนักโครงสร้างรังผึ้งก่อนเคลือบฟีนอลิก
- ครั้งที่ 1 จุ่มโครงสร้างรังผึ้งในฟีนอลิก 10 วินาที
- ยกโครงสร้างรังผึ้งวางบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที
- เอาเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- จากนั้นนำออกมาที่อุณหภูมิห้องรอให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- ครั้งที่ 2 หลังจากพลิกกลับด้านโครงสร้างรังผึ้ง ทำการจุ่มโครงสร้างรังผึ้งใน

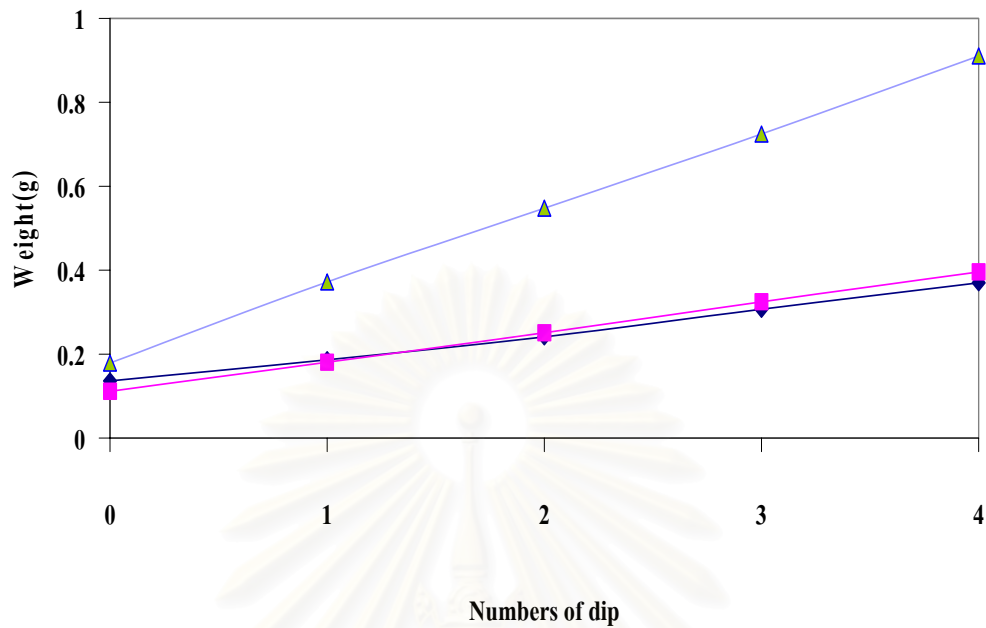
ฟีนอลิกซ้ำ 10 วินาที

- ยกโครงสร้างรังผึ้งวางบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที
- เอาเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- จากนั้นนำออกมาที่อุณหภูมิห้องรอให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- ครั้งที่ 3 หลังจากพลิกกลับด้านโครงสร้างรังผึ้ง ทำซ้ำเหมือนครั้งที่ 2

จากการทดลองพบว่า

- ที่ความเข้มข้นฟีนอลิก 20.23%w และ 25.28%w น้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ จ.1

- ที่ความเข้มข้นฟีนอลิก 33.7%w น้ำหนักของตัวอย่างในการจุ่มแต่ละครั้งเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก และเมื่อนำมาเทียบกับความหนาแน่นของโครงสร้างรังผึ้งที่ผลิตได้เมื่อจุ่มฟีนอลิก 3 ครั้ง มีค่ามากกว่าโครงสร้างรังผึ้งที่ต้องการ



รูปที่ ๑.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของโนเม็กซ์ที่เคลือบด้วยพอลิเอทรีนกับจำนวนครั้งที่จุ่มเคลือบ ( ◆ ความเข้มข้น 20.23%w, ■ ความเข้มข้น 25.28%w และ ▲ ความเข้มข้น 33.7%w)

2. เลือกใช้พอลิเอทรีนความเข้มข้น 25.28%w เคลือบโนเม็กซ์ที่พับเป็นรอยหยักแล้วบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อคุณลักษณะผิวและความแตกต่างของสีที่ได้ ผลที่ได้แสดงดังตาราง ๑.1 พบว่าตัวอย่างที่ 2 และ 4 ให้ลักษณะผิวที่มีฟองน้อยกว่า และตัวอย่างที่ 4 มีสีอ่อนกว่าตัวอย่างที่ 2 จึงเลือกสภาวะนี้ไปทดสอบสมบัติการบ่มด้วย DSC



ตาราง จ.1 ผลการจุ่มเคลือบโบนเม็กซ์ในฟีนอลิกเรซินและบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

No.	อุณหภูมิบ่มครั้งที่1 (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิบ่มครั้งที่2 และ3 (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาทีก)	ผลที่ได้
1	160	20	140	30	สีน้ำตาล ผิวไม่เรียบ(มีฟอง)
2	160	20	120	40	สีน้ำตาล ผิวเรียบ(มีฟองน้อยกว่า1และ3
3	140	30	140	30	สีน้ำตาล ผิวเรียบ(มีฟองน้อยกว่า1
4	140	30	120	40	สีน้ำตาลอ่อนกว่า1,2และ3 ผิวเรียบ(มีฟองน้อยกว่า1และ3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

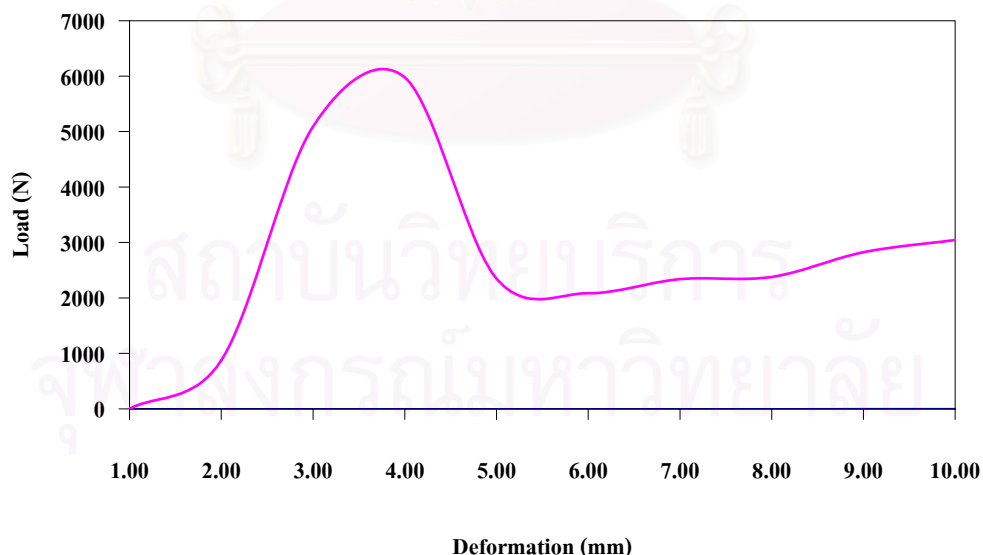
## ภาคผนวก ช.

## การคำนวณหาค่าความทนแรงอัด

สมบัติความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C365 – 94 [28] โดยชิ้นงานโครงสร้างรังผึ้งที่ถูกทดสอบมีขนาดกว้าง 76.2 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตร หนา 12.7 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ด้วยอัตราคงที่ความเร็ว 0.50 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นคำนวณค่าความทนแรงอัดจาก Load – deformation curve โดยสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\alpha = P / A \quad (3)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ความทนแรงอัดของโครงสร้างรังผึ้ง (เมกะปาสกาล)  
 $P$  = แรงกดที่ทนได้มากที่สุด (นิวตัน)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างรังผึ้งที่ทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร)



รูปที่ ช.1 ตัวอย่าง Load – deformation curve ของโครงสร้างรังผึ้งความหนาแน่น 48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ทดสอบความทนแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C365 – 94

# Test production of honeycomb structure using simple practical equipment

L. Suwannarungsri<sup>1</sup> and W. Tanthapanichakoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering,  
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, THAILAND

<sup>2</sup>National Nanotechnology Center,  
NSTDA, Pathumthani 12120, THAILAND

## 1. Abstract

The aim of this study was to develop simple practical equipment for producing honeycomb structures. Nomex® honeycomb structures with cell size of 9.9 mm and final density of 25 – 50 kg/m<sup>3</sup> were produced by adhesive bonding and expansion process. Epoxy resin was used to bond nodes of the honeycomb structure. Suitable viscosity and curing conditions of the epoxy resin were investigated. After the honeycomb structures were expanded and cured, they were not yet fully stable. To enhance structural strength and stability, a suitable liquid phenolic resin was used to dip – coat the honeycomb structure.

## 2. Introduction

Today, light - weight and high strength structures are indispensable to many hi-tech industries such as aircraft, sports equipment and vehicle. A super - light structure that has high strength – and stiffness – to – weight ratio is the honeycomb. It generally consists of an array of open cells, formed from sheets of suitable material, bonded together at controlled intervals and then expanded to form hexagonal cells. The honeycomb can be used as the central region of a composite panel [1]. Many ways of producing honeycomb structures are disclosed in Patents such as United States Patents No. 2,734,843 [2] and United States Patents No. 2,983,640 [3]. Many industries in

Thailand use expensive imported honeycomb structure. So the objective of this work is to develop simple practical equipment for producing honeycomb structures. Using the equipment, honeycomb structures with cell size of 9.9 mm and density of 25 - 50 kg/m<sup>3</sup> were produced from sheets of aromatic polyamide (Nomex®) [4] by the expansion process. Suitable viscosity and curing conditions (temperature and time) of the epoxy binder were experimentally obtained. Stability and density of the dip - coated honeycomb structure were investigated.

## 3. Experimental

In this work, the honeycomb structure was made of Nomex® 410 paper (50 micrometer thick). Nomex® is an aromatic polyamide which offers high mechanical toughness, flexibility and resilience. Adhesive for bonding the Nomex® was 2 - parts epoxy resin with viscosity of 1600 cP and long pot - life (upto 60 min). The simple practical equipment for producing honeycomb structure consisting of a device for applying adhesive patterns to produce HoBE (Honeycomb Before Expansion) and a device for expanding HoBE to form hexagonal honeycomb structures were designed and fabricated. Figure 1 is a schematic diagram of the method used for producing the honeycomb structure.

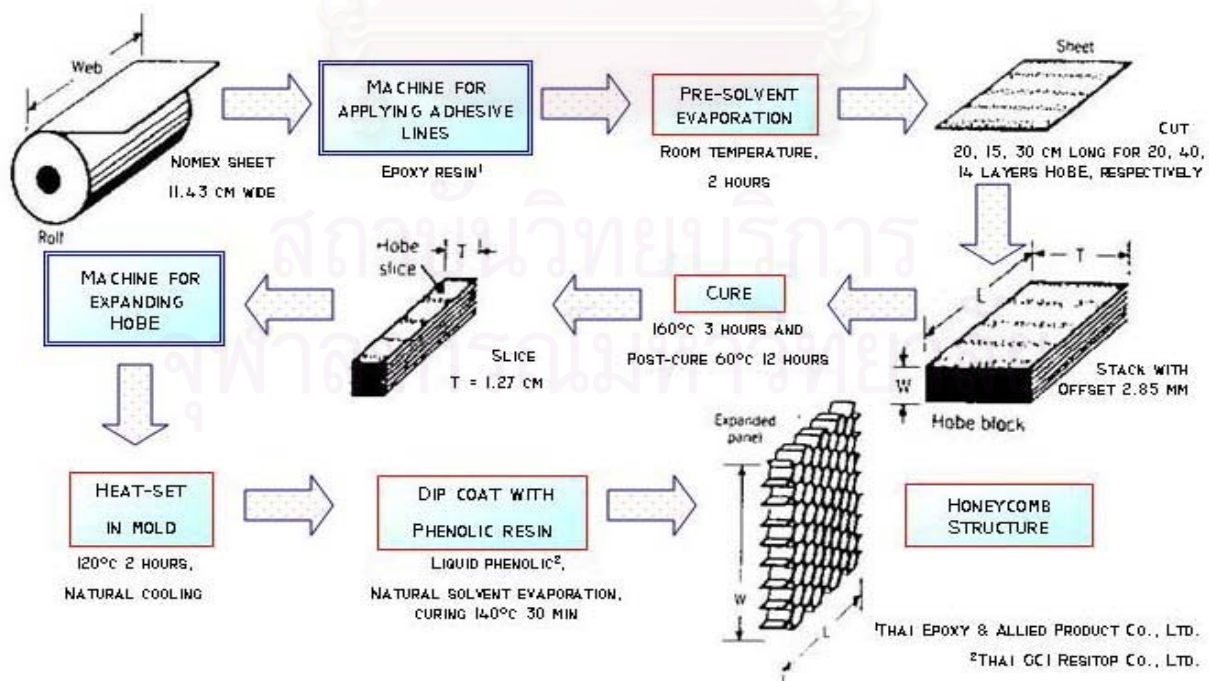


Fig. 1 Schematic diagram of the method used for producing honeycomb structure



**Fig. 2 A device for applying adhesive patterns**

The device for applying adhesive patterns (Figure 2) consisted of three rollers, 30 cm long. The top and bottom rollers were made of synthetic rubber, 82 mm diameter. The stainless steel middle roller, 86.75 mm diameter, was engraved longitudinally, the engraved portions being 10.1 mm wide and unengraved portions 5.7 mm. The bottom roller was partially immersed in a liquid adhesive tank, and, when rotated, it picked up and transferred the adhesive to the unengraved portions of the middle roller. Nomex® sheet was fed between the top and middle rollers. As the sheet passed between them its underside picked up the adhesive lines at designed intervals (width of node walls).

Figure 3 shows a simple device for expanding HoBE to form hexagonal honeycomb structure. Two sets of stainless steel rods were inserted between the adhesive lines inside both surface layers of the HoBE. When the middle screw in Fig.3 was turned counter - clockwise, the two sets of rods would be moved apart and the HoBE was expanded to form hexagonal honeycomb structure.



**Fig. 3 A device for expanding HoBE**

liquid phenolic resin was used to dip - coat the honeycomb structure while being set in a rack to enhance structural stability and strength.

### 5. Conclusions

Nomex® honeycomb structures were produced by using the simple practical equipment. Cell size of the honeycomb was not perfectly hexagonal but considered to be acceptable. Based on the obtained results, an improved design revision of the devices should yield essentially hexagonal structures. The suitable viscosity of the epoxy resin for the simple practical equipment was 1600 cP or lower and its curing conditions were 160°C for 3 hours. After reinforcing the honeycomb structure by phenolic coating, the honeycomb structure was completely stable. We are now testing the compressive strength and shear strength of the structure.

**Table1: Cell configuration of honeycomb structure**

Honeycomb structure	Density	Angle	Cell size	Node wall	Free wall
	kg/m <sup>3</sup>	degree	mm	mm	mm
1. Original design values	< 50	60.0	9.87	5.70	5.70
2. Modified design values	< 50	52.0	9.90	5.40	6.60
3. Honeycomb just after heat setting	15.1	48.2	8.44	5.41	6.32
4. 3 days later without dip-coating	17.0	42.0	7.67	5.58	6.20
5. After dip-coating with phenolic (1-3 coats)	27.7 – 48.3	51.7	9.86	5.38	6.63

### 4. Results and discussion

Up to now more than 40 samples of Nomex® honeycomb structures have been made using the simple practical equipment. Item 3 in Table 1 shows the mean values of cell configuration of honeycomb structures just after the heat-setting process. After 3 days without dip coating to reinforce the structure, the honeycomb structure was significantly deformed. So a suitable

### References

- [1] Tom Bitzer, 'Honeycomb Technology', Chapman & Hall, London UK (1997).
- [2] Roger C. Steele, Hexcel Products Inc., 'Method of Producing Honeycomb', United States Patents No. 2,734,843 (1956).
- [3] Henry L. Knoll, Hexcel Products Inc., 'Method of Making Honeycomb', United States Patents No. 2,983,640 (1961).
- [4] www.dupont.com



# Development of simple low-cost equipment for producing mechanically robust honeycomb structures

L. Suwannarungsri<sup>1</sup> and W. Tanthapanichakoon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, THAILAND

<sup>2</sup>National Nanotechnology Center ,NSTDA, Pathumthani 12120, THAILAND

\*Corresponding author, E-mail: wiwut@nanotec.or.th

**Abstract:** The aim of this study was to develop simple low-cost equipment for producing mechanically robust honeycomb structures. Nomex® honeycomb structures with cell size of 9.9 mm and final density of 25 – 50 kg/m<sup>3</sup> were produced by adhesive bonding and expansion process. Epoxy resin was used to bond nodes of the honeycomb structure. Suitable curing conditions of the epoxy resin were investigated. After the honeycomb structures were expanded and cured, they were not yet fully stable. To enhance structural strength and stability, a suitable liquid phenolic resin was used to dip – coat the honeycomb structure and curing conditions of the phenolic resin were investigated. Finally, mechanical properties of honeycomb structures were tested. For honeycomb density of 45 kg/m<sup>3</sup>, its compressive strength was 1 MPa, whereas the shear strengths were 0.7 and 0.44 MPa in the L and W directions, respectively.

**Keywords:** Honeycomb, Structural material, Production equipment

## Introduction

Today, light - weight and high - strength structures are indispensable to many hi-tech industries such as aircraft, sports equipment and vehicle. A super - light structure that has high strength – and stiffness – to – weight ratio is the honeycomb. It generally consists of an array of open cells, formed from sheets of suitable material, bonded together at controlled intervals and then expanded to form hexagonal cells. The honeycomb can be used as the central region of a composite panel.<sup>1</sup> Honeycomb structures was first introduced in the 1940s for the manufacture of furniture and aircraft structures, their initial applications. Many ways of producing honeycomb structures are disclosed in Patents such as United States Patents No. 2,734,843<sup>2</sup> and United States Patents No. 2,983,640.<sup>3</sup> Today honeycomb structures can be fabricated from most types of papers, plastics, metals and ceramics. The basic technology behind the manufacturing of honeycomb has been around over four decades and has not fundamentally changed during this time. As more companies have entered the honeycomb market, the differentiation between the different honeycomb producers has decreased. This diminishing product differentiation has caused honeycomb manufacturers to stringently protect the honeycomb production secrets.<sup>4</sup>

Many industries in Thailand use expensive imported honeycomb structures. So the objective of this work is to develop simple low-cost equipment for producing honeycomb structures. Using the equipment, honeycomb structures with density less than 50 kg/m<sup>3</sup> and high mechanical properties (compressive strength of 1 MPa and shear strength, L direction, of 0.7 MPa) were produced from sheets of aromatic polyamide (Nomex®)<sup>5</sup> by the expansion process. Suitable curing conditions (temperature and time) of the epoxy binder and phenolic coating were experimentally obtained. Stability and density of the dip - coated honeycomb structure were investigated. Finally, mechanical properties of honeycomb structures were tested for its compressive strength and shear strength.

## Materials and Methods

### Development of low-cost honeycomb production devices

In this work, the Nomex® honeycomb structures with cell size of 9.9 mm were produced by adhesion bonding and expansion process. A set of simple low-cost equipment for producing honeycomb structure consisting of a device for applying adhesive patterns to produce HoBEs (Honeycomb Before Expansion) and a device for expanding the HoBEs to form hexagonal honeycomb structures were designed and fabricated.

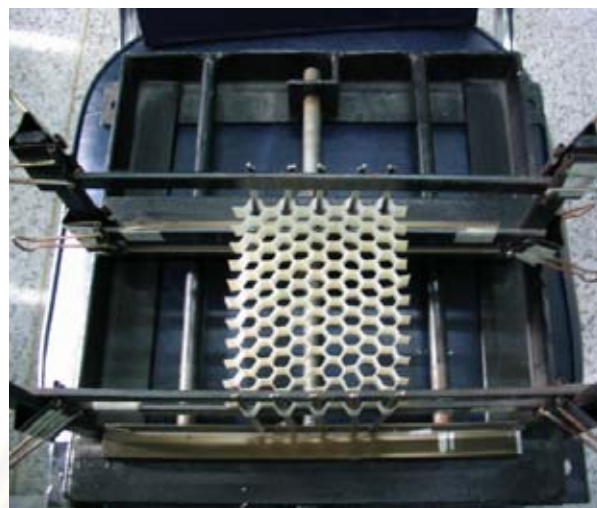


**Fig. 1 A device for applying adhesive patterns**

The device for applying adhesive patterns (Fig. 1) consisted of three rollers, 30 cm long. The top and bottom rollers were made of synthetic rubber, 82 mm diameter. The stainless steel middle roller, 86.75 mm diameter, was engraved longitudinally, the engraved portions being 17.1 mm wide and unengraved portions 5.7 mm. The bottom roller was partially immersed in a liquid adhesive tank, and, when rotated (40 rpm) it picked up and transferred the adhesive to the unengraved portions of the middle roller.

In manufacturing honeycomb structures, a roll of Nomex®, 11.43 mm wide and 30 m long, was fed between the top and middle rollers of the device for applying adhesive patterns. As the unrolled sheet passed between the rollers, its underside picked up the adhesive lines at designed intervals (width of node walls). The adhesive lines were 5.7 mm wide and spaced 17.1 mm apart. Then the long sheet was cut into 15, 20 and 30 cm long pieces to form HoBEs, 40, 20 and 14 pieces, respectively. The pieces were stacked on top of each other in such a way that the adhesive lines of every piece were offset from the adjacent pieces by 2.85 mm. Next, the HoBEs were cured in an electric oven. The suitable curing condition, temperature (100, 140 and 160°C) and time (range 1–24 h), was preliminarily investigated using differential scanning calorimeter (DSC). A sample HoBE mass of 5-10 mg was placed in an aluminium pan with lid. The experiment was performed in temperature of 30–300°C at a heating rate of 10°C/min under nitrogen purging.

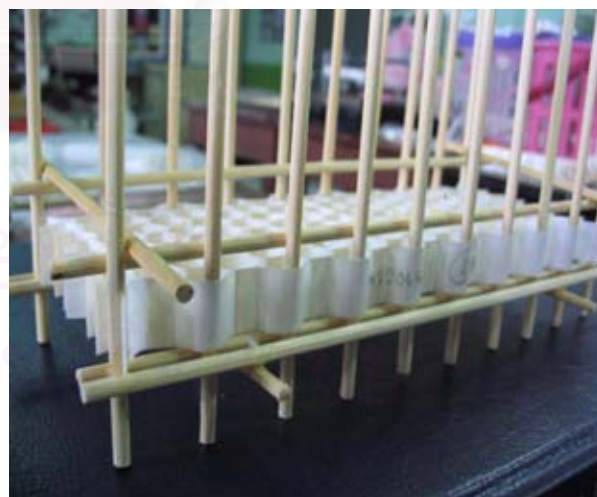
Following the cure of adhesive, the HoBEs were cut into strips, thickness 12.7 mm, and the strips were expanded by the device for expanding HoBEs to form hexagonal honeycomb structures as shown in Fig. 2. Two sets of stainless steel rods were inserted between the adhesive lines inside both surface layers of the HoBE. When the middle screw in Fig.2 was turned counter-clockwise, the two sets of rods would be moved apart and the HoBE was expanded to form hexagonal honeycomb structure.



**Fig. 2 A device for expanding HoBE**

The honeycomb structures were set between two engraved steel plates with hexagonal brass rods to maintain the expanded shape of the honeycomb, placed in the oven at 120°C for 2 hours and left for natural cooling to room temperature.

Next, to densify and reinforce the honeycomb structures, they were dip-coated in phenolic resin. To prevent shrinkage of the honeycomb structures during dipping and oven curing processes, the structures were placed in a holding rack (Fig. 3). After dipping, the structures were left at room temperature to evaporate excess solvent to prevent frothing in phenolic resin during curing. The correlation between evaporation time and curing conditions (temperature and time) were investigated. The whole process was repeated until the desired number of coats was obtained.



**Fig. 3 Honeycomb in holding rack**

#### **Raw material**

In this work, the honeycomb structure was made of Nomex® 410 paper (50 micrometer thick) manufactured by DuPont. Nomex® is an aromatic polyamide which offers high mechanical toughness,



flexibility and resilience. The 50 $\mu$ m Nomex® 410 had basic weight 41 g/m<sup>2</sup> and density 0.72 g/cm<sup>3</sup>.<sup>5</sup> Adhesive for bonding the Nomex® was a commercial 2-parts epoxy resin manufactured by Thai Epoxy and Allied Products Co., Ltd.. The resin EPOTEC YD582 was a modified bisphenol-A based epoxy resin with low viscosity 1500 $\pm$ 200 cPs (@ 25°C). The hardener EPOTEC TH7278 was a modified amine hardener with viscosity 80-150 cPs. This system provided low viscosity, good wettig property and long pot-life (upto 60 min @ 25°C, 100g mix). The resin-hardener ratio was 100:27 parts by weight.

Phenolic resin for dip-coating was a commercial liquid resin from Thai TGCI Resitop Co., Ltd.. The resole phenolic resin PL-2211 had viscosity of 161 cPs and solid contents of 58.99%. In producing honeycomb dip-coat resin, phenolic resin was solvated with 99% ethanol. The suitable final solvent content of phenolic resin and its curing conditions were investigated.

### Mechanical testing of honeycomb structures

The mechanical properties of the honeycomb structure were investigated for its compressive strength and shear strength according to ASTM C365-94<sup>6</sup> and C273-94<sup>7</sup>, respectively. The honeycomb specimens, 12.7 mm thick, 76.2 mm long and 76.2 mm wide, were compressed in an LLOYD Universal Testing Machine. The tests were performed at room temperature under a constant cross-head speed of 0.5 mm/min until failure. The load-deformation curves recorded during the compression test were analyzed for their compressive strength.

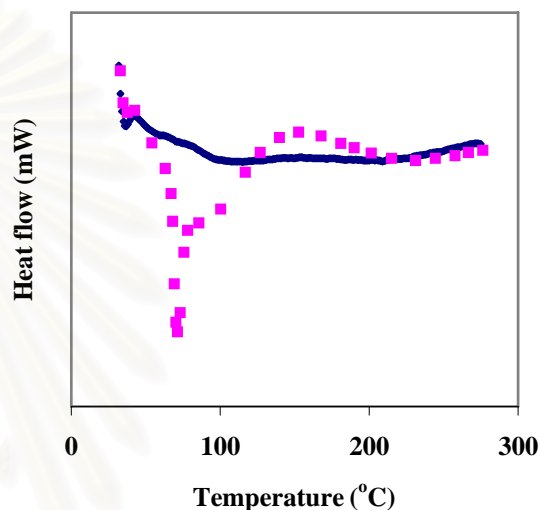
The shear properties of honeycomb structures were tested by the compressive plate shear method in 2 directions of honeycomb cells, parallel to the node walls (L direction) and across the node walls (W direction). The test specimens for shear strength testing were cut into 50.8 mm wide and 152.4 mm long. Then they were rigidly supported by 2 steel plates bonded to the facings by epoxy resin. The plates were designed so that the line of action of the direct compressive force passed through the diagonally opposite corners of the honeycomb specimens. The specimens were compressed in a LLOYD Universal Testing Machine at a rate of 0.5 mm/min at room temperature. The load-deformation curves were analyzed for their shear strength.

## Results

### Preliminary investigation to find suitable production conditions

The suitable production conditions for producing HoBEs and dip-coating honeycomb structures were preliminarily investigated. In manufacturing HoBEs by the device for applying adhesive patterns, after applying the adhesive patterns, the Nomex® sheets with adhesive lines had to evaporate excess solvent in the adhesive to eliminate swelling of HoBEs while curing in the oven. The evaporation time at room

temperature was investigated by simply observing the diminishing of epoxy resin weight versus time. After leaving the applied Nomex® sheets at room temperature for 2 hours, the weight of epoxy resin on the Nomex® was constant. From the experimentally obtained results, the Nomex® sheets with epoxy resin lines were left for 2 hours before stacking the sheets to form HoBEs. The suitable curing conditions of HoBEs were obtained from the DSC thermograms. Figure 4 shows curing reaction of the HoBE before and after curing in an electric oven. The complete reaction of curing process occurred for the HoBE cured at 160°C for 3 hours.



**Fig. 4 DSC thermogram of HoBE (•• before curing, and — HoBE cured at 160°C for 3 hours)**

The phenolic resin for dip-coating honeycomb structures was solvated with 99% ethanol to yield solid contents of 33.7%, 25.28% and 20.23%wt. The correlation between evaporated time and curing condition were investigated to find out a nice and unfrothy honeycomb surfaces. Lower solid contents phenolic resin (20.23%) yielded perfectly dip-coated honeycomb structure after 24 hours evaporation at room temperature and the suitable curing condition was at 140°C for 30 min.

### Honeycomb production devices

The device for applying adhesive patterns to produce HoBEs costed less than 25,000 baht and the device for expanding HoBEs to form hexagonal honeycomb structures costed 1,200 baht. In manufacturing cost of 12.7 mm thick and 1 m<sup>2</sup> Nomex® honeycomb structure was 1,715 baht (for cell size about 9.86 mm, and density about 48.3 kg/m<sup>3</sup>) excluding labor, electricity and maintenance costs.

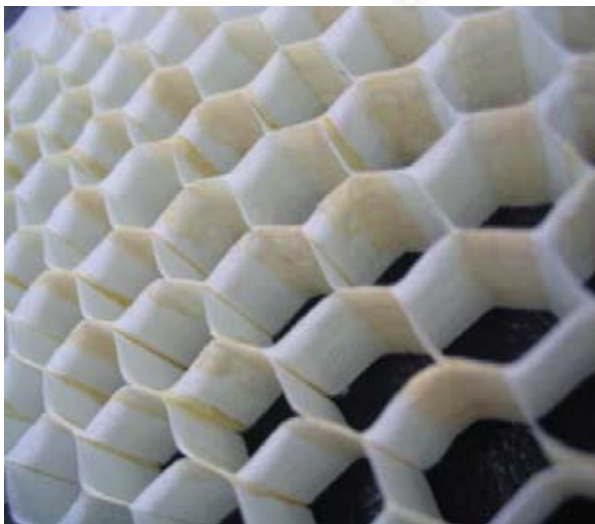
**Table 1: Cell configuration of honeycomb structure**

Honeycomb structure	Density	Angle	Cell size	Node wall	Free wall
	kg/m <sup>3</sup>	degree	mm	mm	mm
1. Original design values	< 50	60.0	9.87	5.70	5.70
2. Modified design values	< 50	52.0	9.90	5.40	6.60
3. Honeycomb just after heat setting	15.1	48.2	8.44	5.41	6.32
4. 3 days later without dip-coating	17.0	42.0	7.67	5.58	6.20
5. After dip-coating with phenolic (1-3 coats)	27.7 – 48.3	51.7	9.86	5.38	6.63

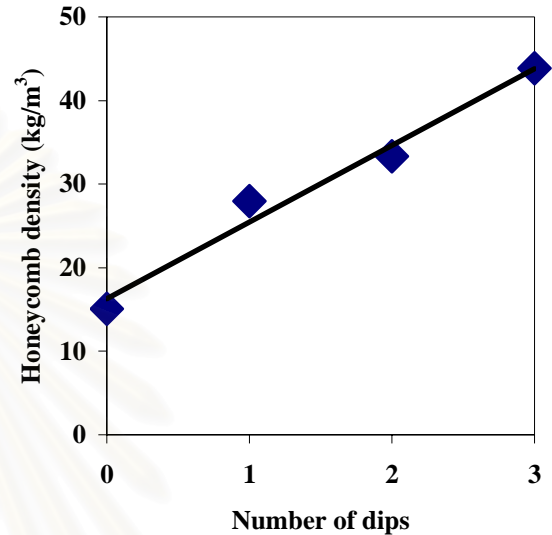
**Honeycomb structures**

More than 50 samples of Nomex® honeycomb structures (Fig. 5) were made using the simple low-cost equipment. Table 1 shows the mean values of cell configuration of the honeycomb structures. The original design values were determined by fixing the angle of honeycomb cell of 60° and the node wall equal to the free wall (5.7 mm) then its cell size (length between the node walls) was 9.87 mm.

The honeycomb structures made by the devices, after heat-setting in mold process, have the length of node wall and the angle of 5.41 mm ,and 48.2° respectively, which are smaller than the original design values. So the design values were modified to represent the actual values of honeycomb structure (Item 2 in Table 1). After 3 days without dip-coating to reinforce the structure, the honeycomb structure was significantly deformed and the angle was diminished from 48.2° to 42°. So the liquid phenolic resin was used to dip-coat the honeycomb structure while being set in a rack to enhance structural stability and strength. In Fig. 6, the density of honeycomb structure was plotted as a function of dip number. From this plot, a linear correlation could be established. The honeycomb structures without dip-coated phenolic resin have a density of 15.06 kg/m<sup>3</sup>. After dipping, the honeycomb density is linearly increased. The minimum and maximum density are 27.7 and 48.3 kg/m<sup>3</sup>.



**Fig. 5 Nomex® honeycomb structure**



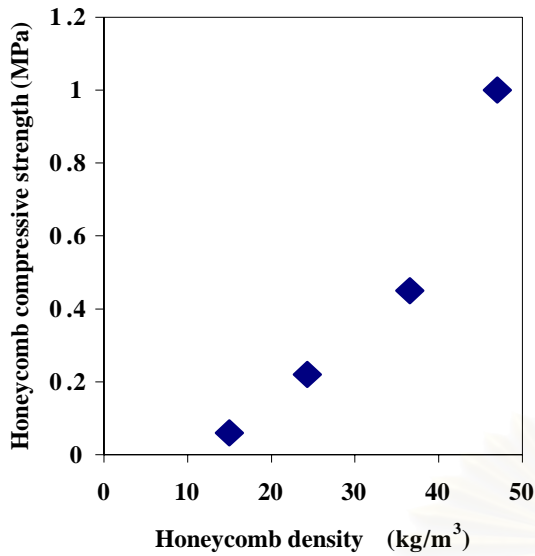
**Fig. 6 Honeycomb density as a function of dip number**

The mechanical properties of honeycomb structure for its compressive strength were obtained from the load-deformation curves. The honeycomb specimen was square, 5806.44 mm<sup>2</sup> cross-sectional area (A), and its thickness was 12.7 mm. The compressive strength of honeycomb structure might be calculated as follows:

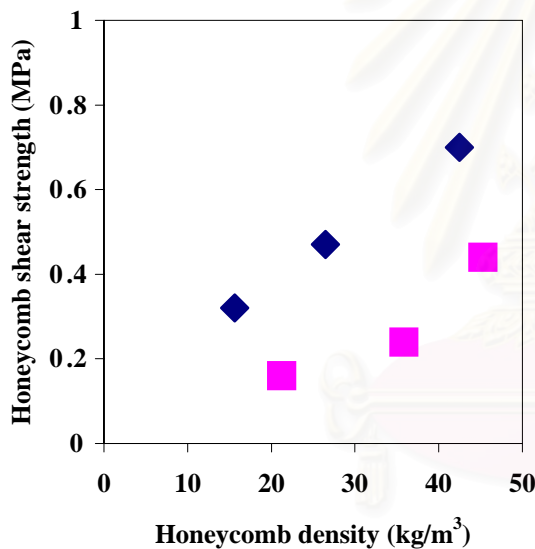
$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

where  $\sigma$  is the honeycomb compressive strength (MPa), and P is the ultimate load (N).

In Fig. 7, the mean compressive strength of honeycomb structure, was presented as a function of honeycomb density. Without dip-coated phenolic resin the honeycomb structures have a compressive strength of 0.06 MPa. After 1 and 2 dips, the honeycomb compressive strength is significantly increase and after 3 dips, it rapidly increases to 1 MPa.



**Fig. 7 Honeycomb compressive strength as a function of honeycomb density**



**Fig. 8 Honeycomb shear strength as a function of honeycomb density (■ W direction, ◆ L direction)**

The load-deformation curves of honeycomb structures during the shear test measured the maximum load on the honeycomb specimens. The 12.7 mm thick specimen was rectangular, its length (L) 152.4 mm and its width (W) 50.8 mm. The shear strength might be expressed as the following

$$\tau = \frac{P}{L \times W} \quad (2)$$

where  $\tau$  is the honeycomb shear stress (MPa), and  $P$  is the load on specimen. When  $P$  equals the maximum,  $\tau$  is the ultimate shear strength  $\tau_{\max}$ .

The shear strength of honeycomb structure in L direction is obviously higher than the shear strength in W direction, as shown in Fig. 8. The maximum honeycomb shear strengths in L and W direction are 0.7 and 0.44 MPa, respectively. But the changing of both shear strengths with their density are linear.

## Discussion

Nomex® honeycomb structures were produced by using the simple practical equipment. Cell size of the honeycomb was not perfectly hexagonal but considered to be acceptable. Based on the obtained results, an improved design revision of the devices should yield essentially hexagonal structures. After reinforcing the honeycomb structure by phenolic coating, the honeycomb structure was completely stable.

The mechanical properties of honeycomb structures depend on its density and cell geometry. For cell size of 9.86 mm and density around 45 kg/m<sup>3</sup>, the honeycomb compressive strength is 1 MPa. In comparison, the commercial Nomex® honeycomb, 9.53 mm cell size and 48 kg/m<sup>3</sup>, manufactured by Hexcel<sup>8</sup> has a compressive strength of 1.66 MPa. The main reasons for the difference between the experimental results and the commercial honeycombs may be attributed to the effects of cell size, density and cell geometry of honeycomb. The compression failure for structures manufactured from aramid materials is most often observed to result from buckling formation. The ability of the structure to resist this deformation is determined by the properties of the dip resin. The thickness of honeycomb walls is another important variable that determined the compressive properties. The cell-wall of dip-coated honeycomb is thicker at the node bond and thinner in the middle of the free wall. When a honeycomb buckles, it yields at the weakest point in the structure which is the center of the single free wall. When the center of the single wall begins to yield, the local area around the wall begins to crack.<sup>4</sup>

Comparing the average shear strengths of the manufactured honeycombs (0.7 and 0.44 MPa, L and W direction respectively) with Hexcel's honeycomb (1.1 and 0.55 MPa for L and W direction), the shear strengths of the former are less than the latter by 36.4% and 20%, respectively. The L direction shear strength is obviously higher than the W direction because, by considering one unit cell, it can be found that the shear strength of node wall is higher than the free wall. So the free wall will buckle ahead of the node wall.<sup>9</sup>

From Fig.6, it may be considered that each dip deposited an equal amount of resin. With increasing numbers of dips, the resin reinforcement at the intersection of the cell walls restricts the movement of the cell and effectively shortens the buckling length of the wall.<sup>4</sup> So the mechanical properties of the honeycomb increase.

## Acknowledgement

This present work was supported by a university – industry collaborative research project of Chulalongkorn University (CU), and MTEC Technology Unit fund given to Center of Excellence in Particle Technology (CEPT) of CU. W.T. was partially support by Thailand Research Fund (TRF-RTA)

## References

- [1] Tom Bitzer, ‘Honeycomb Technology’, Chapman & Hall, London UK (1997), 1-3.
- [2] Roger C. Steele, Hexcel Products Inc., ‘Method of Producing Honeycomb’, United States Patents No. 2,734,843 (1956).
- [3] Henry L. Knoll, Hexcel Products Inc., ‘Method of Making Honeycomb’, United States Patents No. 2,983,640 (1961).
- [4] J.E. Shafizadeh, J.C. Seferis, ‘Scaling of honeycomb compressive yield stresses’, Composites Part A: applied science and manufacturing 2000, Elsevier Science Ltd., 681-688.
- [5] [www.dupont.com](http://www.dupont.com)
- [6] ASTM C365-94, Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores.
- [7] ASTM C273-94, Standard test method for shear properties of sandwich core materials.
- [8] [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com)
- [9] Shi-Dong Pan, Lin-Zhi Wu, Yu-Guo Sun, Zheng-Gong Zhou, Jia-Lin Ou, ‘Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores’, Composite Structures 2004.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวลดาวัลย์ สุวรรณรังษี เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2524 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย