



ผลของสารเชื่อมประสาน ขนาดอนุภาค และสารเติมแต่งต่อสมบัติ  
ของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อย  
**Effect of Adhesives, Particle Sizes and Additives on Properties of  
Composite Materials from Sawdust**

ชนากานต์ เจริญวงษ์  
**Chanakan Charoenwong**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Packaging Technology  
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลของสารเชื่อมประสาน ขนาดอนุภาค และสารเติมแต่งต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เถ้า

ผู้เขียน นางสาวชนากานต์ เจริญวงษ์

สาขาวิชา เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....กรรมการ

(ดร.ศุภชัย ภิสิทธิ์เพ็ญ)

(ดร.วรัญญา ศรีเดช)

.....กรรมการ

(ดร.พรรณนิภา เขาวนนะ)

.....กรรมการ

(ดร.ศุภชัย ภิสิทธิ์เพ็ญ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

**ชื่อวิทยานิพนธ์** ผลของสารเชื่อมประสาน ขนาดอนุภาค และสารเติมแต่งต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อย

**ผู้เขียน** นางสาวชนากานต์ เจริญวงษ์

**สาขาวิชา** เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์

**ปีการศึกษา** 2553

### บทคัดย่อ

จากความต้องการใช้งานวัสดุเชิงประกอบจากไม้ที่มีสูงขึ้นเป็นอย่างมาก จึงมีความต้องการในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลของขนาดอนุภาคและสารเชื่อมประสานที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้มากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาแผ่นขึ้นไม้อัดที่มีความหนาแน่นปานกลางโดยเตรียมจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่มีขนาดอนุภาค 4 ระดับ ( $>2.00$  mm,  $0.84 - 2.00$  mm,  $0.50 - 0.84$  mm และ  $<0.50$  mm) ร่วมกับสารเชื่อมประสาน 3 ชนิด (Polymeric diphenylmethane diisocyanate (pMDI) หรือ Melamine-urea formaldehyde (MUF) หรือ Phenol formaldehyde (PF) จากการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำอย่างมีนัยสำคัญและแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ไม่เพียงแต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกาว MUF และ PF เท่านั้น แต่ยังมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีเยี่ยมอีกด้วย โดยสามารถสังเกตได้จากแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI จะมีการพองตัวหลังแช่น้ำและการดูดซึมน้ำต่ำกว่ากาว MUF และ PF เป็นอย่างมาก และแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมในระดับห้องปฏิบัติการจากขี้เลื่อยขนาดอนุภาค  $0.50 - 0.84$  mm ร่วมกับ 9% pMDI มีความเหมาะสมที่สุดโดยสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำของ EN 312 และ มอก. 876 - 2547 จากภาพรวมแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดทั้งทางด้านสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำ นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยสารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ Low density polyethylene (PE) และ Melamine molding compound (MEL) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE และ MEL ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดย MEL จะมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ในขณะที่ PE จะมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำ ซึ่งการใช้ 20% PE จะมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำและการเติม PE จะไม่ทำให้ลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบเปลี่ยนแปลงไปมากนัก และพบว่าสมบัติการต้านทานน้ำที่บริเวณพื้นผิวจะมีความแตกต่างกับ

สมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นวัสดุเชิงประกอบทั้งแผ่นอย่างมีนัยสำคัญ ในการศึกษาการใช้ ใยล่อนที่มีขนาดอนุภาคผสมและปริมาณกาว pMDI และการศึกษาการลดต้นทุนการผลิตใน กระบวนการเตรียมการผลิตเชิงการค้า พบว่าใยล่อนขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 โดยใช้ 10% pMDI สามารถใช้เตรียมวัสดุเชิงประกอบเชิงการค้าที่มี สมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำแตกต่างจากชุดการทดลองที่เตรียมในระดับห้องปฏิบัติการ (ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.84 และ 9% pMDI) เพียงเล็กน้อย และการลดปริมาณการใช้สีย้อมใยล่อน ลง 3 เท่าในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบให้ผลที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีได้ ซึ่งสามารถ ลดต้นทุนการผลิตแผ่นวัสดุเชิงประกอบและของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบได้ 45.28% และ 20.52% ตามลำดับ

**คำหลัก:** วัสดุเชิงประกอบ, ใยล่อน, ขนาดอนุภาค, สารเชื่อมประสาน, สารเติมแต่ง

**Thesis Title** Effect of adhesives, particle sizes and additives on properties of composite materials from sawdust

**Author** Miss Chanakan Charoenwong

**Major Program** Packaging Technology

**Academic Year** 2010

### ABSTRACT

The increased demand in using wood composites in particular applications results in a need for a better understanding of the effect of adhesives and particle sizes on the characteristics of wood composites. In this research, medium density particleboards from four levels of rubber wood sawdust particle sizes ( $>2.00$  mm,  $0.84 - 2.00$  mm,  $0.50 - 0.84$  mm and  $<0.50$  mm) were prepared with polymeric diphenylmethane diisocyanate (pMDI) or melamine-urea formaldehyde (MUF) or phenol formaldehyde (PF) adhesives. It was found that the particle size significantly affected mechanical and water resistant properties of boards. In addition, pMDI-bonded boards not only gave superior mechanical properties compared with MUF and PF-bonded boards but the water resistance properties were increased considerably as well. The significant increase in thickness swelling and water absorption was higher in MUF and PF bonded boards. The composite boards made in lab scale from  $0.50 - 0.84$  mm with 9% pMDI content fully satisfied the minimum requirements set by the EN 312 standards and TIS 876-2004 standards. Overall, pMDI-bonded boards gave superior mechanical performance and water resistance than MUF and PF-bonded composite boards. Besides, an improvement of pMDI-bonded boards by 2 types of additives: low density polyethylene (PE) or melamine molding compound (MEL) was investigated. It was found that mechanical and water resistant properties of boards were significantly affected by PE and MEL additives. MEL highly influenced on mechanical properties whereas PE considerably influenced on water resistance. Furthermore, an application of 20%PE as an additive was appropriate for improving water resistant properties with slightly interfering appearances of boards. Moreover, it was found that the water resistant properties of

top surface of board was substantially different from water resistant properties of whole board. Mixed sizes of sawdust particles, amount of pMDI adhesive and production cost reduction were conducted in a study of pilot scale production. It was found that mixed sizes of sawdust particles of 3-5 mm, 1 – 3 mm and < 1 mm in a ratio of 1:1:2 with 10%pMDI offered composite boards having mechanical and water resistant properties slightly different than a treatment prepared from lab scale (0.50 – 0.84 mm particle sizes and 9% pMDI). In addition, a reduction of amount of dye in sawdust dyeing process by 3 times could reduce production cost of composite boards and toys by 45.28% and 20.52% respectively with undifferentiated color.

**Keywords:** Composite, sawdust, particle sizes, adhesives, and additives

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของสารเชื่อมประสาน ขนาดอนุภาค และสารเติมแต่ง ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากซีเมนต์ สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณโครงการทักษะนักอุตสาหกรรมเกษตร ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาค้นคว้าวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมนัส สรรพศรี (วิศวกรพี่เลี้ยง), คุณศักดิ์ระพี วาณิชปกรณ์ (วิศวกรพี่เลี้ยง), คุณสมพร จีนประสม (ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม), คุณธวัชชัย จิตวิริยะ (ผู้จัดการฝ่ายผลิต 1) และบุคลากรฝ่ายวิศวกรรมผลิตทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ณ สถานฝึกปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสทรี จำกัด, บริษัท อีเทอนอลเรซิน จำกัด และ บริษัท เฟอร์มาเฟล็กซ์ จำกัด ในการอนุเคราะห์สารเคมีในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ดร.ศุภชัย ภิสิทธิ์เพ็ญ เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาต่างๆ ทั้งด้านงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ การวิจัยในสถานประกอบการ ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือด้านการตรวจ แก๊ส ให้คำชี้แนะเกี่ยวกับงานเอกสารต่างๆ อีกด้วย จนกระทั่งสามารถทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อนึ่งหากเอกสารฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ต้องขออภัยมา ณ ที่นี้

ชนากานต์ เจริญวงษ์

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(9)
รายการภาพประกอบ .....	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(16)
บทที่	
1    บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
การตรวจเอกสาร.....	2
วัตถุประสงค์.....	42
2    วิธีการวิจัย.....	43
วัสดุและอุปกรณ์.....	43
วิธีการดำเนินการ.....	45
3    ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	66
4    บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	124
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก .....	131
ประวัติผู้เขียน.....	135



## รายการตาราง

<b>Table</b>	<b>Page</b>
1. Chemical compositions of rubber wood.....	8
2. Category of adhesive type by structure integrity and service environment.....	14
3. Application of adhesives.....	15
4. Results of analysis of UF- and MUF-bonded particleboards.....	30
5. Comparison of properties of UF- and MUF-bonded particleboards.....	31
6. Properties of the various resins.....	33
7. Curing acceleration of phenolic resin effect obtained by applying various additives.....	33
8. The physical properties of the panel products produced while applying the hot-press method.....	37
9. Sample group of particleboards fabricated.....	38
10. Properties of tested particleboard sprayed with various pMDI/PF ratios.....	39
11. Properties of particleboards in different particle sizes.....	40
12. List of equipments used.....	44
13. Calculated composite materials mixture of part 1.....	48
14. Calculated composite materials mixture of part 2.....	56
15. Size distribution of sawdust collected from wood toys production process.....	67
16. The characteristics of adhesives.....	67
17. Standards of composite materials (medium density particle board) panels under TIS 876-2004 and EN 312 standards.....	68
18. Properties of the composite panel made from various particle sizes.....	76
19. Contact angle and water wettability on surface of material.....	84
20. Contact angle on surface of composite materials made from various adhesives..	85
21. Properties of the composite panel made from various adhesives.....	87
22. Properties of composite panels made from various additives.....	94

## รายการตาราง (ต่อ)

<b>Table</b>		<b>Page</b>
23.	Contact angle and percent reduction rate of contact angle on top surface of composite material prepared by using various additives.....	103
24.	Contact angle and percent reduction rate of contact angle on edge surface of composite material prepared by using various additives.....	103
25.	Size distribution of sawdust used in pilot scale.....	109
26.	Moisture content of materials used in pilot scale.....	110
27.	Temperature control of compression molding.....	111
28.	The differences of process between laboratory and pilot scale.....	111
29.	Properties of the composite panel made from pilot scale.....	113
30.	L, a and b -values of composite materials made in pilot scale.....	120
31.	Cost analysis.....	122
32.	The characteristic of low density polyethylene powder.....	133
33.	The characteristics of melamine molding compound.....	134

## รายการภาพประกอบ

<b>Figure</b>		<b>Page</b>
1.	Reinforcement composite materials.....	3
2.	Fiber reinforcement of composites materials.....	4
3.	Cellulose structure.....	6
4.	Model of fibrous structure.....	6
5.	Xylan structure.....	7
6.	Lignin structure.....	8
7.	Polymerization of Urea formaldehyde.....	9
8.	Melamine formaldehyde structure.....	10
9.	Polymerization of Melamine formaldehyde.....	11
10.	Polymerization of phenol formaldehyde.....	12
11.	Polymeric diphenylmethane diisocyanate structure.....	13
12.	Polymerization of diphenylmethane diisocyanate.....	13
13.	Melamine structure.....	17
14.	LDPE structure.....	18
15.	Unit cell of reinforcement.....	20
16.	Orientation of reinforcement unit cell in composite.....	20
17.	Orientalional of unit cell of reinforcement fiber.....	21
18.	Tension force in reinforcement composite.....	21
19.	Effect of deformation on the strain around a fiber in a low modulus matrix.....	23
20.	Reinforcement-Matrix Interface: Mechanical bonding.....	24
21.	Reinforcement-Matrix Interface: Electrostatic bonding.....	25
22.	Reinforcement-Matrix Interface: Chemical bonding.....	25
23.	Reinforcement-Matrix Interface: Coupling agent chemical bonding.....	25
24.	Reinforcement-Matrix Interface: Interaction bonding.....	26
25.	Wettability of wood and adhesive.....	26
26.	Schematic diagram of the changes in fiber orientation during flow.....	27
27.	Internal bond strength of UF- and MUF-bonded particleboards.....	28

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

Figure		Page
28.	Modulus of rupture mean values of the test panels.....	29
29.	Modulus of elasticity values of the test panels.....	29
30.	Thickness swelling (2 and 24 h) of UF- and MUF-bonded particleboards.....	30
31.	Gelation time reduction of phenolic resin effect according to sodium carbonate addition.....	34
32.	Correlation between sodium carbonate addition and wood failure ratio of attachment side.....	34
33.	Comparison of adhesion strength by hot-press time (135°C).....	35
34.	The correlation between gelation time and temperature according to sodium carbonate addition.....	36
35.	Process flow diagram for the commercial manufacturing of wood composite panel.....	42
36.	Rubber wood sawdust from wood toys production process.....	43
37.	Flow chart of overall research.....	45
38.	Flow process chart of Part 1.....	46
39.	Mixing process of composite materials in mixing tank.....	49
40.	Forming process of composite materials panels.....	50
41.	Sampling positions for density testing of composite materials.....	51
42.	Three points bending testing.....	53
43.	Relation of static load and deformation displacement.....	53
44.	Flow process chart of Part 2.....	55
45.	Flow process chart of Part 3.....	58
46.	Flow process chart of Part 4.....	60
47.	Sawdust particles sorter.....	61
48.	Sawdust drying in temperature control room.....	62
49.	Mixing process of composite materials in pilot scale.....	63
50.	Forming process of composite materials panels in pilot scale.....	64

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
51. SEM of sawdust particle.....	66
52. The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various particle sizes.....	68
53. Mechanical properties of the composite panel made from various particle sizes.....	70
54. Water resistance properties of the composite panel made from various particle sizes.....	73
55. SEM of composite materials prepared from sawdust particle size >2.00 mm.....	74
56. SEM of composite materials prepared from sawdust particle size 0.84-2.00 mm.	74
57. SEM of composite materials prepared from sawdust particle size 0.50-0.84 mm.	74
58. SEM of composite materials prepared from sawdust particle size <0.50 mm....	75
59. The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various adhesives.....	78
60. Mechanical properties of the composite panel made from various adhesives.....	80
61. Reaction of pMDI with hydroxyls group of cellulose.....	81
62. Reaction of formaldehyde with cellulose.....	81
63. Water resistance properties of the composite panel made from various adhesives.....	83
64. The four classes of surface wettability types of surface based on their interaction with aqueous droplets.....	84
65. Comparison of contact angle of composite materials made from various adhesives at 0 – 3 seconds.....	86
66. Contact angle of composite materials using 9%pMDI.....	86
67. The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various additives.....	89

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

Figure		Page
68.	The appearance of composite panel prepared by using 40% Polyethylene as an additive.....	90
69.	The FT-IR spectra of composite materials prepared by using Polyethylene as an additive.....	91
70.	The FT-IR spectra of composite materials prepared by using Melamine (MEL) as an additive.....	92
71.	Mechanical properties of the composite panel made from various additives.....	96
72.	Water resistance properties of the composite panel made from various additives.....	99
73.	Contact angle on top surface of composite materials made from various additives.....	101
74.	Percent reduction rate of contact angle on top surface of composite materials made from various additives.....	101
75.	Contact angle on edge of composite materials prepared by using various additives.....	102
76.	Reduction contact angle on edge of composite materials prepared by using various additives.....	102
77.	SEM graphs of the cross-section of composite from sawdust prepared by using polyethylene (PE) .....	105
78.	SEM graphs of the cross-section of composite from sawdust prepared by using Melamine (MEL) .....	106
79.	Compression molding in pilot scale.....	110
80.	Position of temperature measurement on compression molding plate.....	110
81.	Defects of toys product made from pilot scale of composite materials.....	112

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

<b>Figure</b>		<b>Page</b>
82.	Mechanical properties of the composite panel made in pilot scale.....	115
83.	Water resistance properties of the composite panel made in pilot scale...	117
84.	Porous defect of composite materials.....	118
85.	Composite panel from pilot scale prepared by 3% pMDI.....	118
86.	Composite panel from pilot scale prepared by 6% pMDI.....	118
87.	Heat transfer within materials during hot compression.....	119
88.	Sawdust toys product: Alphabet A –Z.....	123
89.	Sawdust toys product: Number 1 – 10.....	123

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

1. CA : Contact angle
2. EN : European standard
3. FT-IR : Fourier Transform Infrared Spectroscope
4. MEL : Melamine molding compound
5. MOR : Modulus of rupture
6. MOE : Modulus of elasticity
7. MUF : Melamine urea formaldehyde resin
8. PE : Low density polyethylene
9. PF : Phenol formaldehyde resin
10. pMDI : Polymeric diphenylmethane diisocyanate
11. RR : Reduction rate
12. SEM : Scanning electron microscope
13. TS : Thickness swelling
14. TIS : Thailand industrial standard
15. WA : Water absorption



## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ในทศวรรษที่ผ่านมาการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบมีความได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตจากเศษไม้และวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสที่มีมูลค่าต่ำ โดยการนำมาผสมกับสารเชื่อมประสานเพื่อผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบได้ (Ashori และ Nourbakhsh, 2008) ซึ่งผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบจากไม้มีอยู่หลายชนิด เช่น แผ่นฉันทไม้อัด (Particleboard), ไม้ฉันท (Plywood), แผ่นฉันทไม้เรียงเส้น (Orient strand board), กระดานอัด (Hardboard), แผ่นเส้นใยอัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density fiberboard), ไม้ฉันทวีเนียร์ (Veneer board) เป็นต้น (Seller, 2000) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบจากไม้ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดคือ แผ่นฉันทไม้อัด (Particleboard) มีปริมาณการใช้คิดเป็น 57% ของปริมาณการใช้วัสดุเชิงประกอบจากไม้ทั้งหมด (Ashori และ Nourbakhsh, 2008) จากรายงานขององค์การอาหารและการเกษตรของสหประชาชาติ (Food and Agricultural Organization, FAO) ได้รายงานไว้ในปี ค.ศ. 1998 ปริมาณการใช้แผ่นฉันทไม้อัดของโลกและประเทศไทยเท่ากับ  $56.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  และ  $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3$  ตามลำดับ และในปี ค.ศ. 2008 เท่ากับ  $104 \times 10^6 \text{ m}^3$  และ  $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$  ตามลำดับ (Zheng *et al.*, 2006; FAO, 2010) แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้แผ่นฉันทไม้อัดในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา มีปริมาณการใช้ของโลกสูงขึ้นเกือบ 2 เท่า และของประเทศไทยสูงขึ้นถึง 17 เท่า

จากความต้องการวัสดุเชิงประกอบจากไม้ที่มีสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรไม้เนื่องจากปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าและการเสื่อมโทรมของป่าไม้ ทำให้เกิดปัญหาทรัพยากรไม้ไม่เพียงพอสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบจากไม้ ทำให้เกิดการวิจัยเพื่อหาวัสดุอื่นมาใช้ทดแทนไม้มากขึ้น วัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ ของเล่นจากไม้ เป็นต้น จุดเด่นของขี้เลื่อยมีหลายประการ ได้แก่ มีปริมาณมาก มูลค่าต่ำ สามารถย่อยสลายได้ เป็นต้น (Çolak *et al.*, 2007) จากการทำกรณีศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพาราของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าในปี พ.ศ. 2551 มีเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ขี้กบ (Wood shavings) ปริมาณ 2500 ตันต่อปี, ขี้ฝุ่น (Wood dust) ปริมาณ 190 ตันต่อปี และเศษไม้ปริมาณ (Solid waste wood) 660 ตันต่อ

ปี ซึ่งเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนี้มีวัสดุเศษเหลือที่เป็นขี้เถ้ารวมทั้งหมดเท่ากับ 2,690 ตันต่อปี คิดเป็นประมาณ 20% ของวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก ในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพารามีวิธีการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตโดยการขายในมูลค่าต่ำ หรือนำไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง หากนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบจากขี้เถ้าแล้วจะสามารถมีมูลค่าเพิ่มขึ้นได้หลายเท่าตัว และยังเป็นการช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการกำจัดได้อีกด้วย

## การตรวจเอกสาร

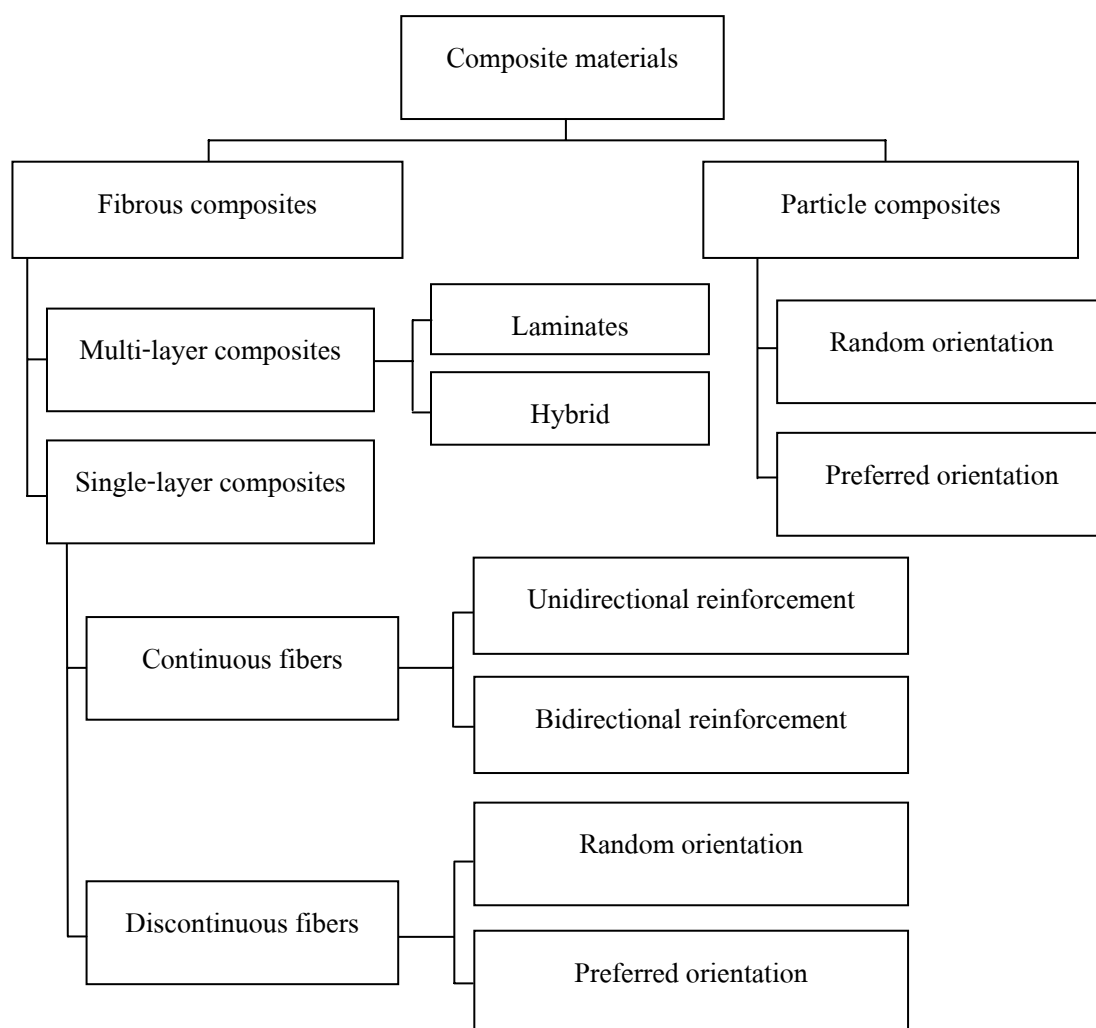
### 1. วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

#### 1.1 ความหมายและการแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบเป็นที่มืองค์ประกอบวัสดุหลักตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป โดยที่วัสดุเชิงประกอบจะต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยที่มีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นหลัก (Matrix phase) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจาย แทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลักเพื่อเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) (Beg, 2007) ทั้งนี้ยังสามารถแยกสถานะ (Phase) ของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อของวัสดุเชิงประกอบได้ การรวมกันของวัสดุที่เป็นตัวเสริมแรง (อนุภาคหรือเส้นใย) กับสารพื้นหรือวัสดุเชื่อมประสาน สารพื้นจะเชื่อมวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถเสริมแรงแก่วัสดุได้ (Vilaseca *et al.*, 2007) โดยวัตถุประสงค์โดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบคือ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความเหนียว ความเสถียรในรูปร่าง และลดต้นทุน มักจะมีการใช้ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของส่วนเสริมแรง (Matthews and Rawling, 1994) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามลักษณะของส่วนที่เป็นสารเสริมแรงได้ดัง Figure 1

การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามลักษณะของส่วนเสริมแรง จะสามารถแบ่งลักษณะของวัสดุเชิงประกอบได้ 2 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ (Fibrous composites) และวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคเป็นองค์ประกอบ (Particle composites) ซึ่ง Particle composite คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีขนาดค่อนข้างเท่ากันทุกทิศทาง รูปร่างของอนุภาคที่เป็นสารเสริมแรงนั้น อาจจะเป็นทรงกลม ลูกบาศก์ ลิ่ม หรือรูปทรงเลขาซึ่งอาจจะเป็นระเบียบหรือไม่ก็ได้ โดยการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงนั้น อาจจะเป็นทิศทางสุ่ม (Random orientation) หรือมีการกำหนดทิศทางใดทิศทางหนึ่ง (Preferred orientation) ก็ได้ และ Fibrous composites คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของหน้าตัดสูง ซึ่งจะเป็นค่าที่นำมาพิจารณาในการจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบแบบหลายชั้น (Multi-layer composites) และแบบชั้น

เดี่ยว (Single-layer composites) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบแบบหลายชั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Laminates และ Hybrids ส่วนวัสดุเชิงประกอบแบบชั้นเดียว จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Continuous fiber reinforcement composites ซึ่งจะมีความยาวต่อความกว้างของหน้าตัดสูง และ Discontinuous fiber reinforcement composites จะเป็นเส้นใยแบบสั้น มีค่าความยาวต่อความกว้างของหน้าตัดต่ำ ส่วนทิศทางของเส้นใยเป็นแบบ Discontinuous fiber reinforced composites ซึ่งอาจจะมีทิศทางแบบสุ่ม หรือมีทิศทางที่แน่นอนก็ได้ ส่วนในกรณีของการจัดเรียงตัวแบบ Continuous fiber จะมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบ 2 ประเภท คือ การจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียว (Unidirectional) กับการจัดเรียงตัวไปใน 2 ทิศทาง (Bidirectional woven reinforcement) (Matthews and Rawling, 1994)



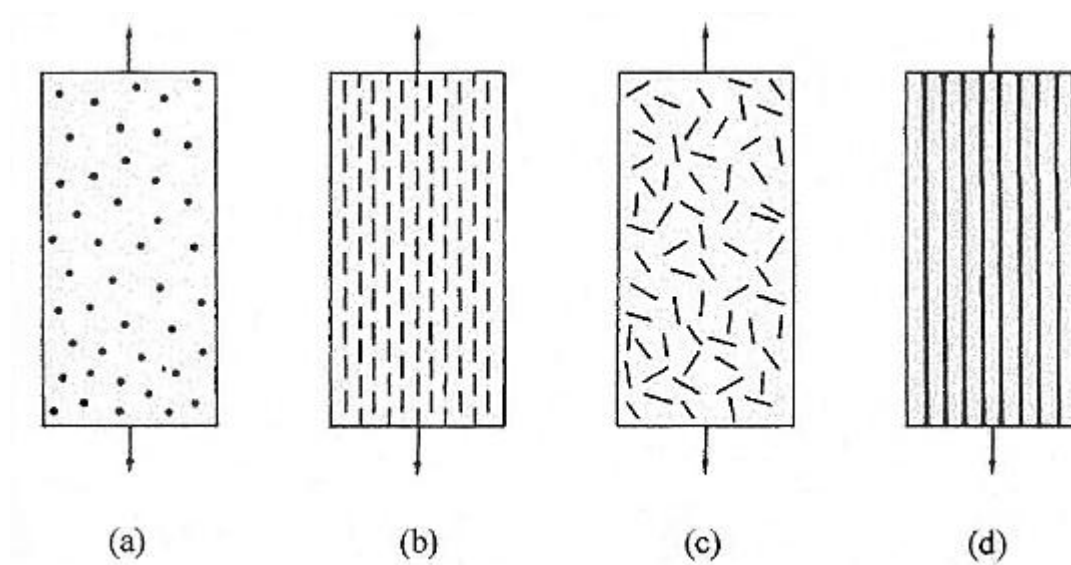
**Figure 1.** Reinforcement composite materials.

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

## 1.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

1.2.1 สารพื้น (Matrix) คือ ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุเชิงประกอบ โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าส่วนเสริมแรง สารพื้นจะเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่องและปกคลุมส่วนที่เป็นสารเสริมแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับภาระภายนอกกระทำภาระที่กระทำจะถูกส่งถ่ายจากสารพื้นไปสู่สารเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าเป็นผลให้เกิดการรับภาระได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุที่เป็นสารพื้นที่ไม่มีการเสริมแรง

1.2.2 สารเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนประกอบที่ช่วยทำให้สมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้น โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงมากกว่าสารพื้นเป็นส่วนรับแรงที่ส่งผ่านมาจากสารพื้น ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรงซึ่งจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงมากขึ้น สารเสริมแรงมีรูปร่างลักษณะได้หลายแบบ เช่น แบบแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ก็ได้ ดัง Figure 2 ซึ่งสารเสริมแรงส่วนใหญ่นิยมใช้ลักษณะที่เป็นเส้นใย (Fiber) โดยที่อาจจะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้นก็ได้ เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยธรรมชาติต่างๆ (Matthews and Rawling, 1994) ซึ่งสารเสริมแรงในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นไม่ต่อเนื่องเรียงตัวแบบสุ่มดัง Figure 2 (c)



**Figure 2.** Fiber reinforcement of composites materials: (a) Particulate (random distribution), (b) Discontinuous fibers (Unidirectional), (c) Discontinuous fibers (Random) and (d) Continuous fibers (unidirectional).

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

- 1.3 คุณสมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเสริมแรง (Matthews and Rawling, 1994)
  - 1.3.1 เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง เส้นใยควรมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง
  - 1.3.2 เพื่อสามารถรับแรงกระทำได้มาก เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
  - 1.3.3 เพื่อความสม่ำเสมอในการรับแรง เส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมากนัก
  - 1.3.4 เส้นใยควรมีความเสถียรและสามารถคงตัวได้ขณะจัดเก็บและระหว่างการขึ้นรูปได้
  - 1.3.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน
- 1.4 ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ (Matthews and Rawling, 1994)
  - 1.4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
  - 1.4.2 ความยาวของเส้นใย
  - 1.4.3 ปริมาตรของเส้นใย
  - 1.4.4 ลักษณะรูปร่างของเส้นใย
  - 1.4.5 การจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบ

## 2. วัตถุประสงค์ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัย

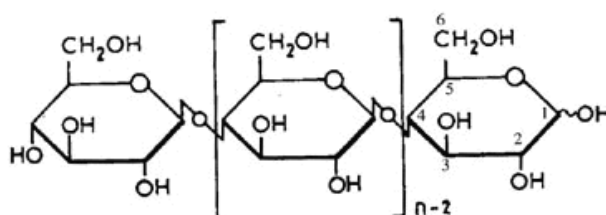
### 2.1 จีลีย

จีลียเป็นเส้นใยธรรมชาติ ที่ความเหมาะสมที่สามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcing material) ในวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) เนื่องจากมีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำซึ่งสามารถช่วยในการเพิ่มสมบัติเชิงกลซึ่งเหมาะต่อการใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางวิศวกรรมได้ นอกจากนี้การนำเอาจีลียมาใช้ประโยชน์ยังสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการกำจัดขยะที่เป็นวัสดุเศษเหลือจากพวกนี้ได้อีกด้วย (Sombatsompop and Chaochanchaikul, 2004) โดยทั่วไปแล้วจีลียซึ่งได้จากการแปรรูปไม้จะมีอยู่ราวร้อยละ 10 ถึง 16 ของเนื้อไม้ตอนที่เข้าแปรรูป จากข้อมูลของกรมป่าไม้ประเทศสหรัฐอเมริกา (2002 อ้างโดย McKeever and Falk, 2004) ได้รายงานว่าวัสดุเศษเหลือจากไม้จากแหล่งต่างๆ ในปี ค.ศ. 2002 มีประมาณ 178 ล้านตันและวัสดุเศษเหลือจากไม้ในจำนวนนี้ยังไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ถึง 86 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็น 48% ของวัสดุเศษเหลือจากไม้ทั้งหมด

#### 2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของจีลีย

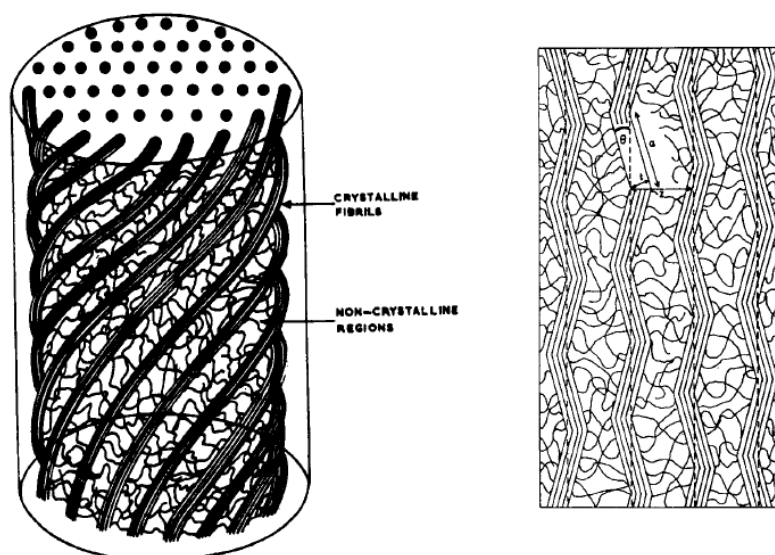
เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสต่อกันเป็นสายยาว โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลหนึ่งเชื่อมต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ถัดไปด้วยพันธะไกลโคซิดิก ( $\eta - 1, 4$ -glycosidic bonds) ไม่มีกิ่งก้านสาขา มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายค่างอ่อน แต่ละลายในสารละลายกรด และค่างแก่

ในพืชมีเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30 – 50 ของน้ำหนักแห้ง เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช โครงสร้างของเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  (Beg, 2007) ดัง Figure 3 เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 20,000 – 750,000 คาลตัน ซึ่งเท่ากับ 100 – 4,000 หน่วยกลูโคส (น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคสเท่ากับ 180.16 คาลตัน) โมเลกุลของเซลลูโลสจะเรียงกันเป็นมัด หรือเรียกว่า ไฟบริล (Fibril) ในแต่ละมัดของโมเลกุลเซลลูโลสพบว่ามีการจัดเรียงตัว 2 แบบ คือ แบบที่เป็นกระจุกอัดตัวกันแน่น (Crystalline fibrils) หรือแบบที่อยู่รวมกันแบบหลวมๆ (Amorphous or Non-crystalline regions) (Bledzki and Gassan, 1999) ดัง Figure 4



**Figure 3.** Cellulose structure.

Source : Beg (2007)



**Figure 4.** Model of fibrous structure.

Source : Bledzki and Gassan (1999)

เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) เป็นสารประกอบพวก Amorphous polymeric carbohydrate มีลักษณะเป็น Heterogeneous โดยเป็นโพลิเมอร์น้ำตาลหลายชนิดที่รวมตัวกัน พบในไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน และพืชตระกูลหญ้า โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ละลายได้ในด่าง ถูกย่อยสลายด้วยกรด มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งก้านสาขา น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส มักพบว่ายู่ร่วมกับเซลลูโลส และลิกนินทั่วไปมีโครงสร้างหลักเป็นโพลิเมอร์น้ำตาลดีไซโลส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1, 4  $\eta$ -linked โดยมี Branch chain เป็นน้ำตาลชนิดอื่น เช่น แอล-อะราบิโนฟูราโนส (L-arabinofuranose) เชื่อมต่อกับดีไซโลสที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 3 ดี-กลูคิวโรนิกแอซิด (D-glucuronic acid) และแอล-อะราบิโนฟูราโนส (L-arabinofuranose) ด้วยพันธะแอลฟา แต่ไม่มีหมู่อะซิทิลในโครงสร้างของไซแลน ดัง Figure 5 เฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็งได้แก่ไซแลน และเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ กลูโคแมนแนน

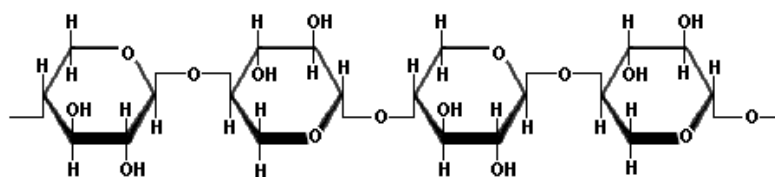


Figure 5. Xylan structure.

Source : Zamora (2008)

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารพอลิอะโรมาติกที่สลับซับซ้อนแบบ 3 มิติ เกิดจากการรวมตัวของพารา-ไฮดรอกซีซินนามิล แอลกอฮอล์ (p-Hydroxycinnamyl alcohol) และซินาปิล แอลกอฮอล์ (Cinaply alcohol) โครงสร้างภายในประกอบด้วยพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C – C bond) ซึ่งทนต่อการย่อยสลาย ทำให้การย่อยสลายลิกนินเป็นไปได้ยาก (Beg, 2007)

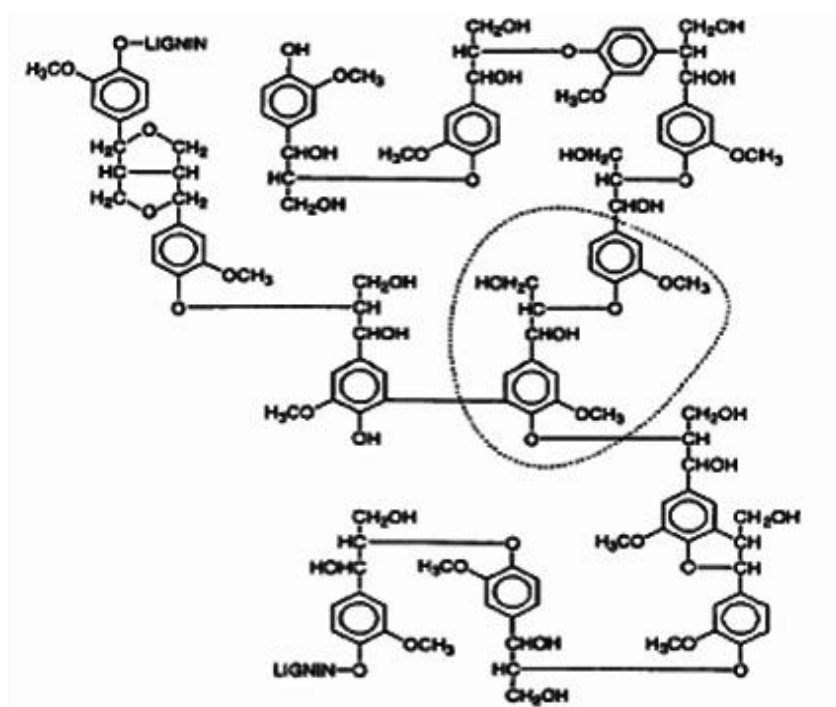


Figure 6. Lignin structure.

Source : Beg (2007)

Table 1. Chemical compositions of rubber wood.

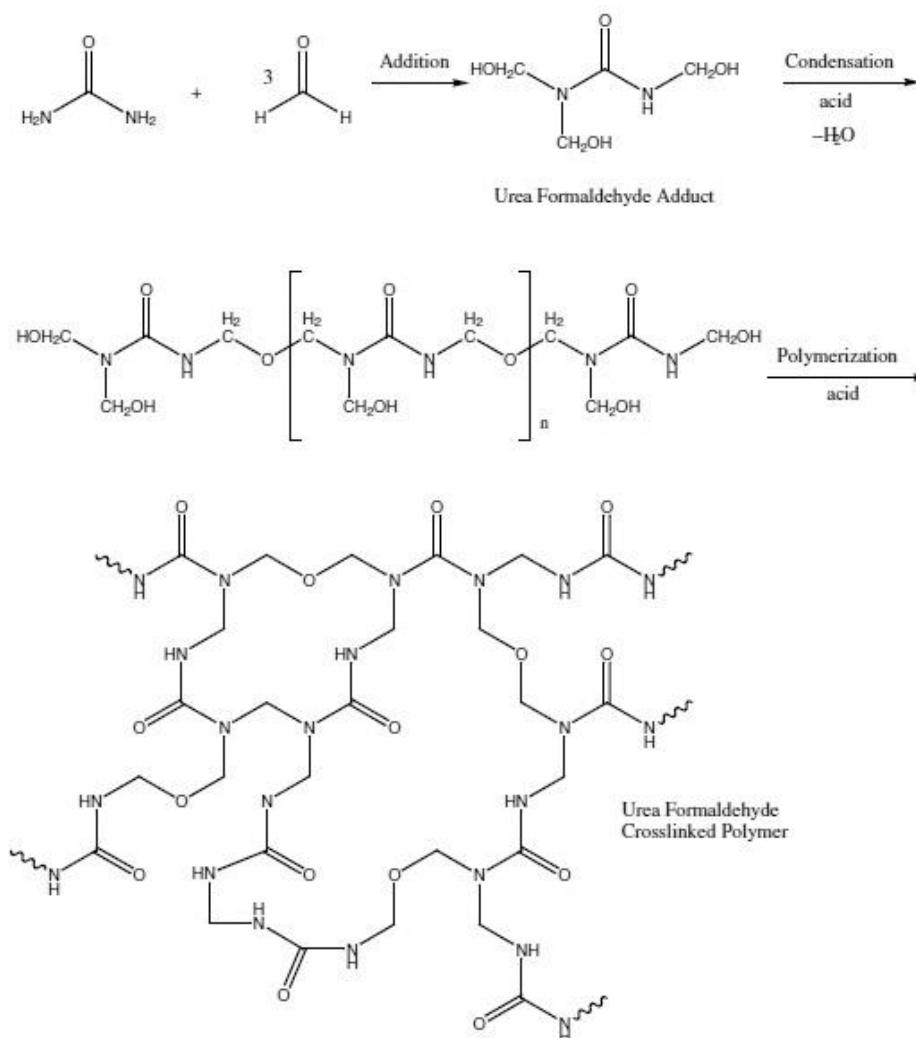
Chemical composition	Content (%)
1. Holocellulose	75.61 – 78.72
2. Cellulose	49.41 – 59.87
3. Pentosan	17.17 – 18.57
4. Lignin	18.06 – 19.03
5. Solubility in	
4 Alcohol-benzene	2.87 – 3.51
4 Hot water	1.08 – 7.91
4 Cold water	0.96 – 2.45
4 1% NaOH	17.54 – 19.92
6. Ash	0.42 – 0.86

Source: สมกิต ทองบุญ (2541)



## 2.2 สารพื้น (Matrix)

2.2.1 กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นกาวที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบจากไม้มากที่สุด โดยเฉพาะใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบประเภทแผ่นขึ้นไม้อัด เนื่องจากกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นกาวที่ใสเมื่อแห้ง ไม่มีสี แข็งตัวได้เร็ว และราคาถูก กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์มีค่า pH ระหว่าง 7-9 ขึ้นกับชนิดของกาว สามารถล้างความสะอาดได้ด้วยน้ำหรือน้ำอุ่น กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ผลิตจากวัตถุดิบหลักคือ ยูเรีย และ ฟอร์มาลดีไฮด์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการใช้งาน คือ กาวสำหรับทำไม้อัด (Plywood glue) กาวชนิดนี้จะมี Solid content ประมาณ 52-55% ความหนืด 150-400 cps และกาวสำหรับทำขึ้นไม้อัด (Chipboard glue) ซึ่งจะมี Solid content ประมาณ 65-69% ความหนืดตั้งแต่ 100-500 cps

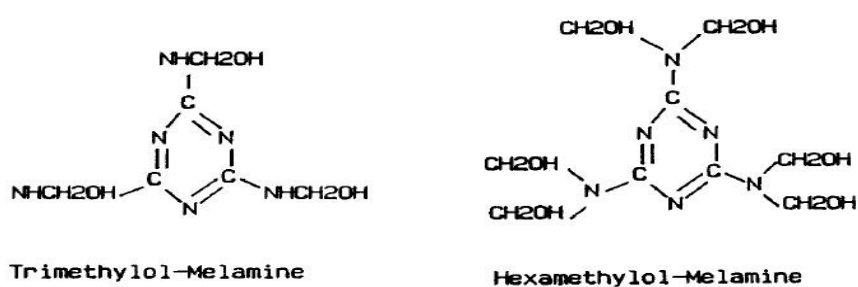


**Figure 7.** Polymerization of Urea formaldehyde.

**Source:** Frihart (2005)

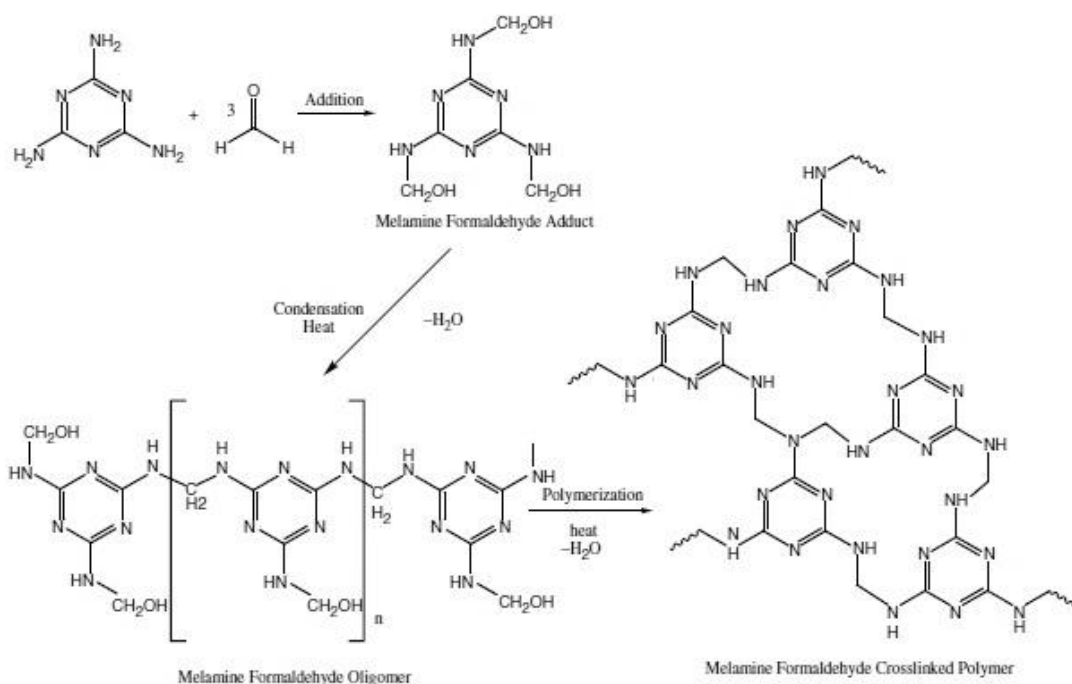
2.2.2 กาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine urea formaldehyde, MUF) เป็นกาวที่เกิดจากการผสมกันของกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และกาวเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ กาวชนิดนี้มีสมบัติใกล้เคียงกับกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ แต่มีข้อดีมากกว่าในด้านการต้านทานน้ำซึ่งเกิดจากการนำเอากาวเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มาผสม กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของส่วนอะมิโนกับสารฟอร์มัลดีไฮด์ ภายในสถานะที่ให้ความร้อนกับสารละลายผสมที่เหมือนกัน แต่ฟอร์มัลดีไฮด์จะทำปฏิกิริยารวดเร็วกับเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มากกว่ายูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยเหตุนี้การทำกาวเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์จึงมีการปลดปล่อยสารระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ที่น้อยกว่ากาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์

กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ใช้สารเร่งแข็งชนิดเดียวกัน ลักษณะของกาว มีลักษณะขาวใส ซึ่งก็จะทำให้แนวกาวที่ใส กาวเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่ทำให้แข็งตัวที่สูงกว่ายูเรียฟอร์มัลดีไฮด์แต่มีความต้านทานน้ำและอุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่า ข้อเสีย คือ ราคาเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์สูงกว่า ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ถึง 4-5 เท่า จึงมีการนำมาผสมกับกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เพื่อลดต้นทุนราคาลง เรียกว่ากาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งคุณสมบัติของกาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสมระหว่างเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ กาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์มักนิยมใช้ในการผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบจำพวกแผ่นชั้นไม้อัด (Particleboards) ที่ต้องการต้านทานต่อความชื้นและสภาพฝนฟ้าอากาศร้อน และยังมีการใช้ในการต่อไม้ที่ต้องการใช้ในงานในสภาพที่เปียกชื้น (กรมป่าไม้, 2552)



**Figure 8.** Melamine formaldehyde structure.

Source : Ibeh (1999)

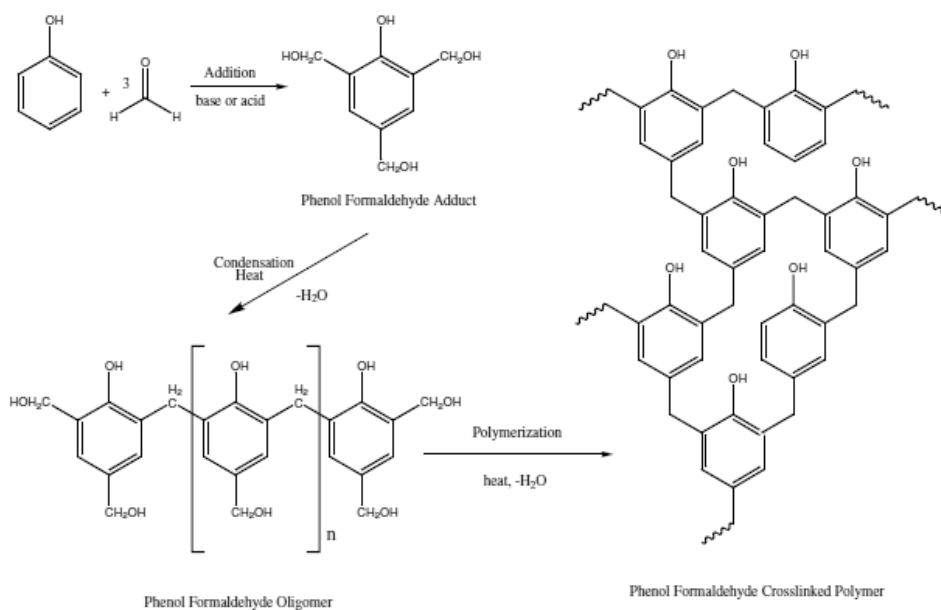


**Figure 9.** Polymerization of Melamine formaldehyde.

Source : Frihart (2005)

### 2.2.3 กาวฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde, PF)

ฟีนอลิเรซินหรือฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenolic resin or Phenol formaldehyde resin) มี 2 ชนิด คือ รีซอล (Resoles) และ โนวอลแลค (Novolacs) ชนิด รีซอล เป็นชนิดที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบชนิดอัดแผ่น เช่น ไม้อัด แผ่นขึ้นไม้อัด (Particleboard) แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density fiberboard) รีซอล เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ ฟีนอล ในสารละลายต่าง รีซอล ต้องใช้อุณหภูมิในการแข็งตัวที่สูงและได้แนว กาวที่มีความต้านทานน้ำและความร้อนและเชื้อรา สำหรับกาว ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โนวอลแลค สังเคราะห์ขึ้นในสถานะที่เป็นกรดและมีสัดส่วนของฟอร์มัลดีไฮด์ที่ต่ำ หากจะต้องทำให้เป็นกาวอัดร้อนจะใช้ Hexamethylene tetramine ผสม ส่วนใหญ่ใช้ในงานประดิษฐ์กรรมไม้เพื่อผลิตชิ้นงานที่พิเศษ ใช้ผลิตเวเฟอร์บอร์ด (Wafer board, WF) ชนิดพิเศษโดยใช้ โนวอลแลค และใช้ในการผลิต Densified wood (กรมป่าไม้, 2552)



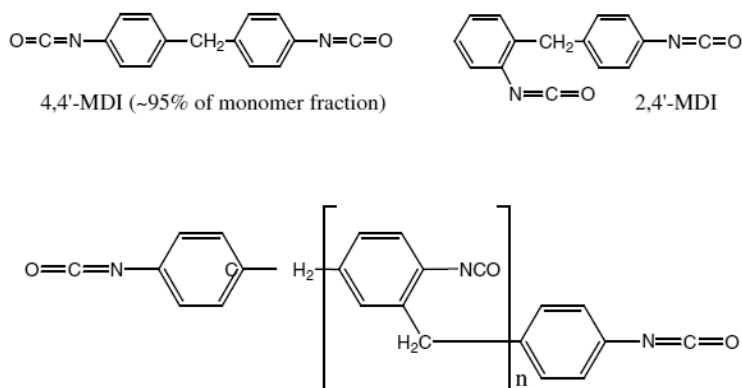
**Figure 10.** Polymerization of phenol formaldehyde.

**Source :** Frihart (2005)

2.2.4 กาวพอลิเมอร์ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานเนต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) ใช้เป็น Casting resins และตัวกลางของสี (Paint media) ตั้งแต่ราวปี ค.ศ.1950 แต่มีการใช้ทางด้านงานไม้้น้อยมาก เมื่อปี ค.ศ.1975 จนถึงปัจจุบันกาว pMDI ถูกใช้ในการผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ต้องการชิ้นงานที่มีความทนทานสูง เนื่องจากกาว pMDI จะสามารถเกิดการยึดเหนี่ยวทางเคมีกับลิกนินและเซลลูโลสในไม้ได้ดี แต่มีราคาสูง กาว pMDI มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ แต่ยังไม่นิยมใช้ในประเทศไทยเนื่องจากมีราคาสูง กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกาว pMDI จะทำปฏิกิริยากับหมู่ที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจน เช่น หมู่เอมีนและแอลกอฮอล์ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรซ์ได้ด้วยตัวเอง หรือสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมโนเมอร์อื่นๆ ได้หลายชนิด และซึ่งไอโซไซยานเนตสามารถใช้สังเคราะห์เป็นโพลียูรีเทนได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประเภทลพิดิไดออล (กรมป่าไม้, 2552; Preechatiwong, 2006)

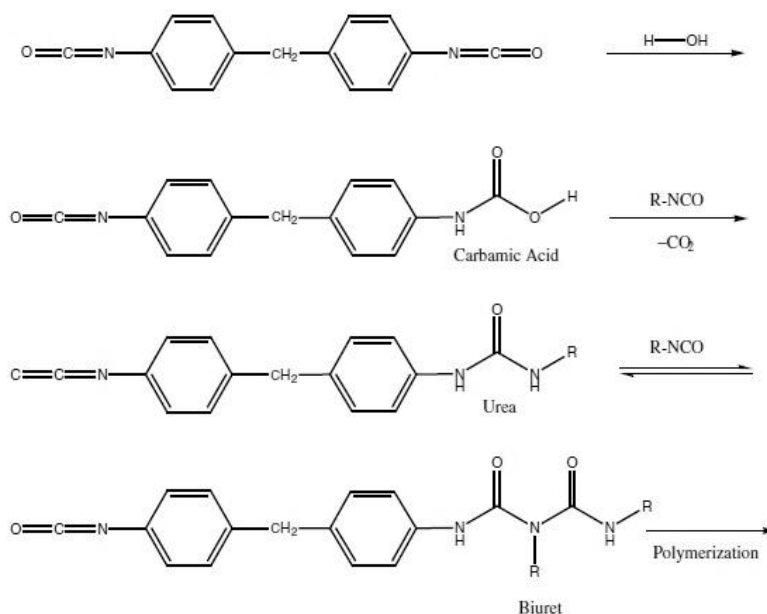
ข้อดีของกาว pMDI คือ ทนทานต่อความชื้น แห้งตัวได้เร็วทำให้ใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปน้อย ไม่มีส่วนผสมของฟอร์มาดีไฮด์ ไม่มีน้ำในระบบ และสามารถผสมกับแทนนิน กาวยูเรีย กาวเมลามีน และกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ได้ นอกจากนี้ยังใช้งานได้ดีกับวัสดุติดกาวชนิดอื่นๆ ได้ยาก ใช้แวกซ์ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไม้อัดไม้ประกอบน้อยลง เนื่องจากองค์ประกอบของกาวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ผลิตภัณฑ์ไม้ที่ใช้กาวไอโซไซยานเนตมีความคงขนาดสูง (Dimensional Stability) ให้พันธะการยึดติดที่แข็งแรง ขณะที่ใช้ในปริมาณน้อยเท่านั้น แต่ก็มีข้อเสียคือราคาสูง และสามารถอาจเกิดปัญหาต่อกระบวนการผลิตได้ เนื่องจากสามารถยึดติดกับบอลูมิเนียม

และโลหะได้ ทำให้เกิดปัญหาผลิตภัณฑ์ติดกับแผ่นรองอัด (Plates) ได้ แต่ทั้งนี้สามารถแก้ไขโดยใช้ กลีเซอริน กาวอะมิโนหรือกาวฟีนอลทาที่ผิวแผ่นรองอัด หรือใช้แผ่นเทปล่อนเพื่อไม่ให้กาวสัมผัส กับแผ่นรองอัดโดยตรง ก็จะสามารป้องกันการติดกับผิวของแผ่นรองอัดได้ (Preechatiwong, 2006)



**Figure 11.** Polymeric diphenylmethane diisocyanate structure.

**Source :** Preechatiwong (2006)



**Figure 12.** Polymerization of diphenylmethane diisocyanate.

**Remark:** The isocyanate needs water to start the polymerization process. This reaction ends up forming carbon dioxide that can cause bubbles in the adhesive, but once the amine forms, self-polymerization takes place rapidly).

**Source:** Frihart (2005)

**Table 2.** Category of adhesive type by structure integrity and service environment.<sup>a, b</sup>

Structural integrity	Service environment	Adhesive type
Structural	Fully exterior (withstands long-term water soaking and drying)	Phenol-formaldehyde
		Resorcinol-formaldehyde
		Phenol-resorcinol-formaldehyde
		Emulsion polymer/isocyanate
Structural	Limited exterior (withstands short-term water soaking)	Melamine-formaldehyde
		Melamine-urea-formaldehyde
		Isocyanate
Structural	Interior (withstands short-term high humidity)	Epoxy
		Urea-formaldehyde
Semistructural	Limited exterior	Casein
		Cross-linked polyvinyl acetate
Semistructural	Limited exterior	Polyurethane
Nonstructural	Interior	Polyvinyl acetate
		Animal
		Soybean
		Elastomeric construction
		Elastomeric contact
		Hot-melt
		Starch

<sup>a</sup>Assignment of an adhesive type to only one structural/service environment category does not exclude certain adhesive formulations from falling into the next higher or lower category.

<sup>b</sup>Priming wood surfaces with hydroxymethylated resorcinol coupling agent improves resistance to delamination of epoxy, isocyanate, emulsion polymer/isocyanate, melamine and urea, phenolic, and resorcinolic adhesives in exterior service environment, particularly bonds to CCA-treated lumber.

**Source:** Vick (1999)

**Table 3.** Application of adhesives.

Type	Form and color	Preparation and application	Strength properties	Typical uses
<b>Natural origin</b>				
Animal, protein	Solid and liquid; brown to white bondline	Solid form added to water, soaked, and melted; adhesive kept warm during application; liquid form applied directly; both pressed at room temperature; bonding process must be adjusted for small changes in temperature	High dry strength; low resistance to water and damp atmosphere	Assembly of furniture and stringed instruments; repairs of antique furniture
Blood, protein	Solid and partially dried whole blood; dark red to black bondline	Mixed with cold water, lime, caustic soda, and other chemicals; applied at room temperature; pressed either at room temperature or 120°C (250°F) and higher	High dry strength; moderate resistance to water and damp atmosphere and to microorganisms	Interior-type softwood plywood, some times in combination with soybean adhesive; mostly replaced by phenolic adhesive
Casein, protein	Powder with added chemicals; white to tan bondline	Mixed with water; applied and pressed at room temperature	High dry strength; moderate resistance to water, damp atmospheres, and intermediate temperatures; not suitable for exterior uses	Interior doors; discontinued use in laminated timbers
Soybean, protein	Powder with added chemicals; white to tan, similar color in bondline	Mixed with cold water, lime, caustic soda, and other chemicals; applied and pressed at room temperatures, but more frequently hot pressed when blended with blood adhesive	Moderate to low dry strength; moderate to low resistance to water and damp atmospheres; moderate resistance to intermediate temperatures	Softwood plywood for interior use, now replaced by phenolic adhesive. New fast-setting resorcinol-soybean adhesives for fingerjointing of lumber being developed
Lignocellulosic residues and extracts	Powder or liquid; may be blended with phenolic adhesive; dark brown bondline	Blended with extender and filler by user; adhesive cured in hot-press 130°C to 150°C (266°F to 300 °F) similar to phenolic adhesive	Good dry strength; moderate to good wet strength; durability improved by blending with phenolic adhesive	Partial replacement for phenolic adhesive in composite and plywood panel products
<b>Synthetic origin</b>				
Cross-linkable polyvinyl acetate emulsion	Liquid, similar to polyvinyl acetate emulsions but includes copolymers capable of cross-linking with a separate catalyst; white to tan with colorless bondline	Liquid emulsion mixed with catalyst; cure at room temperature or at elevated temperature in hot press and radio-frequency press	High dry strength; improved resistance to moisture and elevated temperatures, particularly long-term performance in moist environment	Interior and exterior doors; moulding and architectural woodwork; cellulose overlays
Elastomeric contact	Viscous liquid, typically neoprene or styrene-butadiene elastomers in organic solvent or water emulsion; tan to yellow	Liquid applied directly to both surfaces, partially dried after spreading and before pressing; roller-pressing at room temperature produces instant bonding	Strength develops immediately upon pressing, increases slowly over a period of weeks; dry strengths much lower than those of conventional wood adhesives; low resistance to water and damp atmospheres; adhesive film readily yields under static load	On-the-job bonding of decorative tops to kitchen counters; factory lamination of wood, paper, metal, and plastic sheet materials
Elastomeric mastic (construction adhesive)	Putty like consistency, synthetic or natural elastomers in organic solvent or latex emulsions; tan, yellow, gray	Mastic extruded in bead to framing members by caulking gun or like pressure equipment; nailing required to hold materials in place during setting and service	Strength develops slowly over several weeks; dry strength lower than conventional wood adhesives; resistant to water and moist atmospheres; tolerant of outdoor assembly conditions; gap-filling; nailing required to ensure structural integrity	Lumber to plywood in floor and wall systems; laminating gypsum board and rigid foam insulating; assembly of panel system in manufactured homes
Emulsion polymer/isocyanate	Liquid emulsion and separate isocyanate hardener; white with hardener; colorless bondline	Emulsion and hardener mixed by user; reactive on mixing with controllable pot-life and curing time; cured at room and elevated temperatures; radio-frequency curable; high pressure required	High dry and wet strength; very resistant to water and damp atmosphere; very resistant to prolonged and repeated wetting and drying; adheres to metals and plastics	Laminated beams for interior and exterior use; lamination of plywood to steel metals and plastics; doors and architectural materials

Source: Vick (1999)

**Table 3.** Application of adhesives. (Cont.)

Type	Form and color	Preparation and application	Strength properties	Typical uses
Epoxy	Liquid resin and hardener supplied as two parts; completely reactive leaving no free solvent; clear to amber; colorless bondline	Resin and hardener mixed by user; reactive with limited pot-life; cured at room or elevated temperatures; only low pressure required for bond development	High dry and wet strength to wood, metal, glass, and plastic; formulations for wood resist water and damp atmospheres; delaminate with repeated wetting and drying; gap-filling	Laminating veneer and lumber in cold-molded wood boat hulls; assembly of wood components in aircraft; lamination of architectural railings and posts; repair of laminated wood beams and architectural building components; laminating sports equipment; general purpose home and shop
Hot melt	Solid blocks, pellets, ribbons, rods, or films; solvent-free; white to tan; near colorless bondline	Solid form melted for spreading; bond formed on solidification; requires special application equipment for controlling melt and flow	Develops strength quickly on cooling; lower strength than conventional wood adhesives; moderate resistance to moisture; gap-filling with minimal penetration	Edge-banding of panels; plastic lamination; patching; film and paper overlays; furniture assembly; general purpose home and shop
Isocyanate	Liquid containing isomers and oligomers of methylene diphenyl diisocyanate; light brown liquid and clear bondline	Adhesive applied directly by spray; reactive with water; requires high temperature and high pressure for best bond development in flake boards	High dry and wet strength; very resistant to water and damp atmosphere; adheres to metals and plastics	Flakeboards; strand-wood products
Melamine and melamine-urea	Powder with blended catalyst; may be blended up to 40% with urea; white to tan; colorless bondline	Mixed with water; cured in hot press at 120°C to 150°C (250°F to 300°F); particularly suited for fast curing in high-frequency presses	High dry and wet strength; very resistant to water and damp atmospheres	Melamine-urea primary adhesive for durable bonds in hardwood plywood; end-jointing and edge-gluing of lumber; and scarf joining softwood plywood
Phenolic	Liquid, powder, and dry film; dark red bondline	Liquid blended with extenders and fillers by user; film inserted directly between laminates; powder applied directly to flakes in composites; all formulations cured in hot press at 120°C to 150°C (250°F to 300°F) up to 200°C (392°F) in flakeboards	High dry and wet strength; very resistant to water and damp atmospheres; more resistant than wood to high temperatures and chemical aging	Primary adhesive for exterior softwood plywood, flakeboard, and hardboard
Polyvinyl acetate emulsion	Liquid ready to use; often polymerized with other polymers; white to tan to yellow; colorless bondline	Liquid applied directly; pressed at room temperatures and in high-frequency press	High dry strength; low resistance to moisture and elevated temperatures; joints yield under continued stress	Furniture; flush doors; plastic laminates; panelized floor and wall systems in manufactured housing; general purpose in home and shop
Polyurethane	Low viscosity liquid to high viscosity mastic; supplied as one part; two-part systems completely reactive; color varies from clear to brown; colorless bondline	Adhesive applied directly to one surface, preferably to water-misted surface; reactive with moisture on surface and in air; cures at room temperature; high pressure required, but mastic required only pressure from nailing	High dry and wet strength; resistant to water and damp atmosphere; limited resistance to prolonged and repeated wetting and drying; gap-filling	General purpose home and shop; construction adhesive for panelized floor and wall systems; laminating plywood to metal and plastic sheet materials; specialty laminates; installation of gypsum board
Resorcinol and phenol-resorcinol	Liquid resin and powdered hardener supplied as two parts; phenol may be copolymerized with resorcinol; dark red bondline	Liquid mixed with powdered or liquid hardener; resorcinol adhesives cure at room temperatures; phenol-resorcinols cure at temperatures from 21°C to 66°C (70°F to 150°F)	High dry and wet strength; very resistant to moisture and damp atmospheres; more resistant than wood to high temperature and chemical aging.	Primary adhesives for laminated timbers and assembly joints that must withstand severe service conditions.
Urea	Powder and liquid forms; may be blended with melamine or other more durable resins; white to tan resin with colorless bondline	Powder mixed with water, hardener, filler, and extender by user; some formulations cure at room temperatures, others require hot pressing at 120°C (250°F); curable with high-frequency heating	High dry and wet strength; moderately durable under damp atmospheres; moderate to low resistance to temperatures in excess of 50°C (122°F)	Hardwood plywood; furniture; fiberboard; particleboard; underlayment; flush doors; furniture cores

Source: Vick (1999)



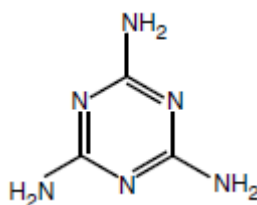
### 2.3 สารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัย

2.3.1 เมลามีน (Melamine) เป็นสารอินทรีย์ เรียกทางเคมีว่า 1, 3, 5-Triazine-2, 4, 6-triamine โดยมี Trimer ของ Cyanamine ต่อเข้ากับโครงสร้างของ 1, 3, 5-triazine ซึ่งจะมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบถึง 66% การผลิตเมลามีนนิยมผลิตรวมกับฟอร์มัลดีไฮด์ เพื่อใช้ผลิตเป็นเมลามีนเรซิน ซึ่งเป็นพลาสติกประเภท Thermosetting ชนิดหนึ่ง โดยจะมีการใช้มากเพื่อผลิตเป็นวัสดุปิดผิวหรือฟอร์มิกา (Formiga) โฟมเมลามีน เป็นต้น อีกทั้งเมลามีนยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการผลิตสีและพลาสติกอีกด้วย

การสังเคราะห์เมลามีน เมลามีนถูกสังเคราะห์ครั้งแรกในเยอรมันโดยนักเคมีชื่อ Justus von Liebig ในปี ค.ศ. 1834 เมลามีนถูกเตรียมขึ้นจาก Calcium cyanamide เพื่อเปลี่ยนเป็น dicyandiamide แล้วให้ความร้อนเกิดเป็นเมลามีน แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการเปลี่ยนมาใช้ยูเรียเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเมลามีน ในปัจจุบันนี้การผลิตเมลามีนมีฐานการผลิตหลักอยู่ในประเทศจีน

เมลามีนเรซินหรือเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสายสั้น ซึ่งยังอยู่ในรูปของเมลามีน เป็นพลาสติกประเภท Thermosetting ที่มีความแข็ง ซึ่งเมื่อให้ความร้อนจะทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Cross-link) ของโครงสร้างโมเลกุลได้อย่างรวดเร็ว มีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรงสามารถเกิดการแตกหักได้

เมลามีนสามารถใช้ในการผลิตเป็นเมลามีนโพลีซัลโฟเนต (Melamine polysulfonate) ซึ่งใช้เป็น Superplasticizer ในการทำคอนกรีตความต้านทานสูง Sulfonated melamine formaldehyde (SMF) เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นน้ำยาผสมปูนเพื่อลดปริมาณน้ำในคอนกรีตขณะที่การเพิ่มการไหลและความสามารถทำงานได้ของผสมระหว่างการจัดการและเท จะส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนลดลงและความแข็งแรงเชิงกลสูง มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้สูงขึ้นอีกด้วย (Michigan State University Extension, 2003)

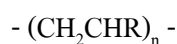


**Figure 13.** Melamine structure.

**Source :** Frihart (2005)

2.3.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพลาสติกประเภท Thermoplastic มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายยาว ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ของเอทิลีน ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) โดยทั่วไปแล้ว พอลิเอทิลีนมีสี่ขบวนการ โพร่งใส มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสรู้สึกลื่น ยืดหยุ่นตัวได้ดี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียวทนความร้อนไม่มากนัก สามารถทนต่อความเป็นกรด กร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงสามารถลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น จะทำให้มีความแข็ง และเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลาย ของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกกร่อนได้ง่ายขึ้น นิยมใช้ในการใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีนมีการผลิตขึ้นทั้งในรูปแบบที่มีความหนาแน่นต่ำและสูง พอลิเอทิลีนมีหลายชนิด เช่น LDPE (Low density polyethylene), HDPE (High density polyethylene), LLDPE (Linear low density polyethylene) และ UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene) ซึ่งพอลิเอทิลีนที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในงานวิจัยคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $0.910\text{-}0.925 \text{ g/cm}^3$  สมบัติที่สำคัญของ LDPE คือ มียืดหยุ่นได้ดีกว่า ซึ่งงานจะใส นิยมใช้ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงเย็น ซองใส่อาหาร เป็นต้น



**Figure 14.** LDPE structure.

**Remark:** R may be  $-\text{H}$ ,  $-(\text{CH}_2)_m\text{CH}_3$ , or a more complex structure with sub-braching

**Source:** Selke (1997)

### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

3.1 สัดส่วนผสมของสารพื้กับสารเสริมแรงมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติและลักษณะของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งสัดส่วนผสมของสารพื้และสารเสริมแรงสามารถแสดงได้จากสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction;  $v$ ) หรือจากสัดส่วนโดยน้ำหนัก (Weight fraction;  $w$ ) (Matthews and Rawling, 1994)

$$\text{Volume fractions; } v_f = V_f / V_c \quad \text{และ} \quad v_m = V_m / V_c$$

$$\text{Weight fractions; } w_f = W_f / W_c \quad \text{และ} \quad w_m = W_m / W_c$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของส่วนประกอบ  
 $W$  = น้ำหนักของส่วนประกอบ  
 และตัวห้อย  $m$  = สารพื้น (Matrix)  
 $f$  = เส้นใยหรือสารเสริมแรง (Reinforcement)  
 $c$  = วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

จะได้  $v_f + v_m = 1$  และ  $w_f + w_m = 1$

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรและสัดส่วนโดยน้ำหนักได้ด้วย  
 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ (Density;  $\Psi$ ) ดังนี้

จาก  $w_c = w_f + w_m$

เนื่องจาก  $W = \Psi V$

จะได้  $\Psi_c V_c = \Psi_f V_f + \Psi_m V_m$

$\Psi_c = \Psi_f (V_f / V_c) + \Psi_m (V_m / V_c)$

$\alpha \quad \Psi_c = \Psi_f v_f + \Psi_m v_m$

จากสมการ แสดงความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบสามารถหาได้จากสัดส่วนโดยปริมาตรและความหนาแน่นของแต่ละส่วนประกอบ ซึ่งสมบัติอื่นๆ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการเดียวกันในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$X_c = X_f v_f + X_m v_m$

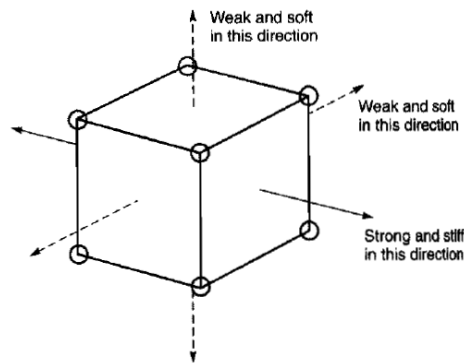
เมื่อ  $X$  แทนสมบัติใดๆ ของวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งสมการนี้เรียกว่ากฎของของการผสม (The law of mixtures) ใช้สำหรับหาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากสมบัติของวัสดุที่นำมาประกอบกัน ซึ่งสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ตัวแปรหลักคือสมบัติของวัสดุที่นำมาประกอบกัน นอกจากนี้สมบัติทางด้านเคมีและค่าความแข็งแรงของหน้าสัมผัสระหว่างสารพื้นและเส้นใย รวมถึงคุณลักษณะ ขนาด การจัดเรียงตัว การกระจายของสารเสริมแรงหรือเส้นใยเสริมแรงและลักษณะของสารพื้น เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางด้านความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเช่นกัน (Matthews and Rawling, 1994)

### 3.2 กลศาสตร์ของวัสดุเชิงประกอบ (Hyer, 1998)

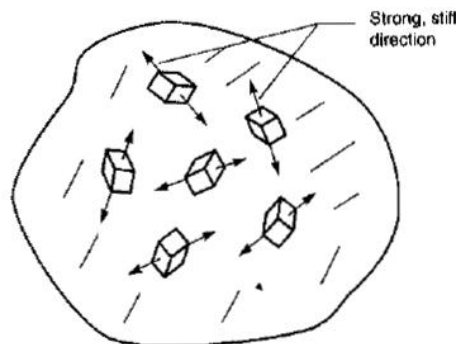
วัสดุเชิงประกอบสามารถอธิบายได้ จากความเข้าใจทางกลศาสตร์ของวัสดุ เช่น การยึดเกาะของโมเลกุลที่สามารถทำให้รวมกันเป็นวัสดุ จาก Figure 15 แสดงถึงหน่วยเซลล์คืออะตอมหรือโมเลกุลเกาะกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวอะตอมหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในแต่ละ

ทิศทาง ทิศทางที่มีแรงยึดเหนี่ยวแข็งแรงกว่าก็จะทำให้หน่วยเซลล์มีสมบัติแข็งแรงในทิศทางนั้นๆ ส่วนใหญ่ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีทิศทางที่มีความแข็งแรงตั้งฉากกับทิศทางที่มีความอ่อนแอ และจาก Figure 16 แสดงถึงการกระจายตัวแบบสุ่มของหน่วยเซลล์ที่เป็นสารเสริมแรงในเนื้อของสารพื้น จะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสมบัติโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบเหมือนกันในทุกทิศทาง (Hyer, 1998)



**Figure 15.** Unit cell of reinforcement.

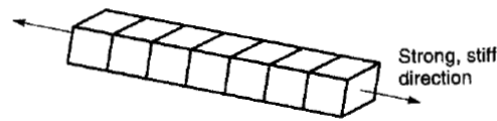
Source: Hyer (1998)



**Figure 16.** Orientation of reinforcement unit cell in composite.

Source: Hyer (1998)

และเมื่อนำหน่วยเซลล์มาเรียงต่อกัน โดยให้ทิศทางที่มีความแข็งแรงเป็นไปในทิศทางเดียวกันจะได้เซลล์ที่ยาวขึ้นและมีความแข็งแรงสูงในทิศทางนั้น เมื่อแท่งที่เกิดจากการเรียงต่อกันของหน่วยเซลล์มีความยาวที่เหมาะสม เรียกว่า เส้นใยเสริมแรง (Hyer, 1998) ดัง Figure

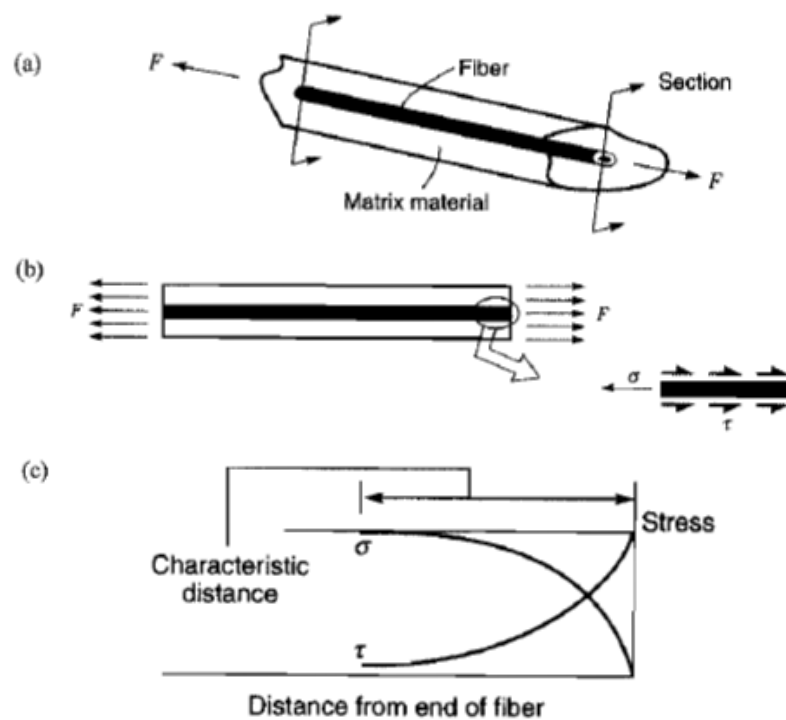


**Figure 17.** Orientational of unit cell of reinforcement fiber.

**Source:** Hyer (1998)

### 3.2.1 ความแข็งแรงของเส้นใยเสริมแรง (Matthews and Rawling, 1994)

การเรียงตัวต่อกันของเซลล์ย่อยๆ จนเกิดเป็นเส้นใย ทำให้เส้นใยมีประสิทธิภาพในการเสริมแรง เมื่อผสมอยู่ในวัสดุเส้นใยเสริมแรงจะต้องวางตัวอยู่ในทิศทางขนานกับแรงที่กระทำ จากนั้นแรงที่กระทำจะถูกส่งผ่านไปเส้นใย ซึ่งเส้นใยจะสามารถคงตัวอยู่ได้ภายใต้แรงกระทำนั้น ดัง Figure 18 แสดงกระบวนการส่งผ่านแรงดึง ( $F$ ) ที่กระทำต่อวัสดุเชิงประกอบเสริมเส้นใยเสริมแรง



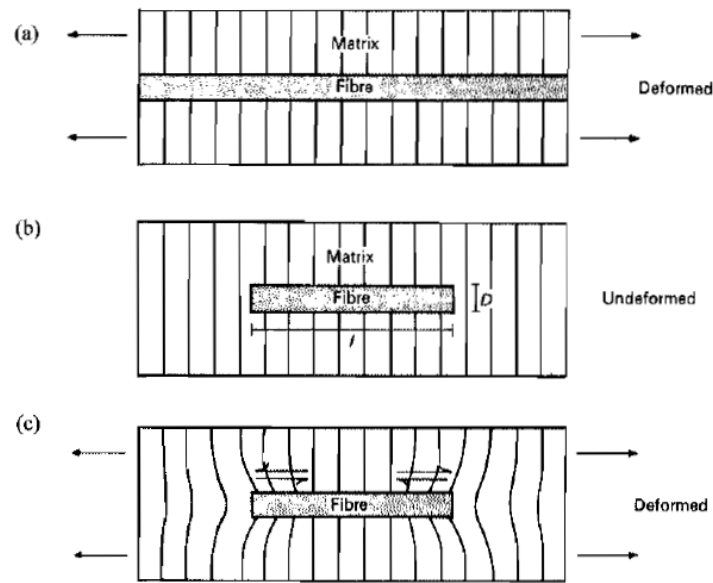
**Figure 18.** Tension force in reinforcement composite.

**Source:** Hyer (1998)

เส้นใยเสริมแรงของถูกเคลือบหรือปกคลุมด้วยสารพื้น ดัง Figure 19 (a) วัสดุที่เป็นสารพื้นจะส่งถ่ายแรงไปยังเส้นใยเสริมแรงในรูปของความเค้น (Shear stress;  $\tau$ ) ดัง Figure 19 (b) เมื่อพิจารณาตามแนวความยาวของเส้นใย แรงดึง (F) ที่กระทำจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นที่ผิวของเส้นใย และเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นดึง (Tensile stress;  $\sigma$ ) ภายในเส้นใย บริเวณใกล้กับปลายของเส้นใยความเค้นเฉือนบนผิวของเส้นใยจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนความเค้นดึงภายในเส้นใยจะมีค่าต่ำลง ดัง Figure 19 (c) หากระยะทางจากปลายทางของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น ความเค้นเฉือนก็จะมีค่าลดลงและความเค้นดึงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงความยาวเจาะจงค่าหนึ่ง (Characteristic distance) ที่ทำให้ความเค้นเฉือนมีค่าน้อยมากๆ และความเค้นดึงมีค่าสูงสุดที่ตรงกลางความยาวของเส้นใย โดยทั่วไปค่าความยาวเจาะจงนี้ ควรมีค่าน้อยกว่าความยาวของเส้นใยจึงจะสามารถเสริมแรงให้กับวัสดุได้

การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดบนเส้นใย สามารถเกิดขึ้นได้กับเส้นใยเสริมแรงแบบต่อเนื่อง (Continuous fibers) จะไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากปลายเส้นใยเนื่องจากอิทธิพลของความเค้นเฉือนมีค่าน้อยมาก แต่เมื่ออัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรงมีค่าลดลง ผลกระทบที่เกิดจากปลายเส้นใยจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของเส้นใยเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบจะลดลงทั้งด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ในกรณีของเส้นใยสั้นผลกระทบจากปลายเส้นใยจะมีบทบาทอย่างมากในการเกิดการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบ

เมื่อพิจารณาเส้นใยที่มีความยาวหนึ่งหน่วยในสารพื้นที่วางตัวอยู่ในทิศทางขนานกับแรง เมื่อกำหนดให้การยึดเกาะระหว่างสารพื้นและสารเสริมแรงเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ความเค้นที่เกิดขึ้นในสารพื้นจะถูกส่งผ่านบริเวณผิวหน้าสัมผัสไปยังเส้นใยเสริมแรง ความเครียดที่เกิดขึ้นกับสารพื้นและเส้นใยจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีค่ามอดูลัสแตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่ามอดูลัสของสารพื้นจะมีค่าน้อยกว่ามอดูลัสของเส้นใยเสริมแรง ดังนั้นบริเวณปลายเส้นใยค่าความเครียดบริเวณปลายเส้นใย ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเส้นใยเสริมแรงจะน้อยกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับสารพื้น ดัง Figure 19



**Figure 19.** Effect of deformation on the strain around a fiber in a low modulus matrix:

- (a) Deformation on continuous fiber, (b) Undeformation on short fiber and
- (c) Deformation on short fiber

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

จาก Figure 19 แสดงผลของความแตกต่างของเครียดที่ทำให้เกิดความเค้นขึ้นรอบๆ เส้นใยในทิศทางตามแกนของเส้นใย และเกิดแรงดึงในเส้นใย จะทำให้ความต้านทานแรงเค้นที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสของเส้นใยและสารพื้นลดลง อย่างไรก็ตามหากบริเวณผิวหน้าสัมผัสที่มากเพียงพอร่วมกับความยาวที่เหมาะสมของเส้นใย จะสามารถทำให้เส้นใยรับแรงที่ถูกส่งถ่ายจากสารพื้นได้ในระดับหนึ่งจนกระทั่งแรงนั้นทำให้เกิดการแตกหักของเส้นใย (Matthews and Rawling, 1994)

### 3.3 กลไกในการยึดติดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับสารพื้น (Reinforcement-Matrix Interface) (Matthews and Rawling, 1994)

แรงที่กระทำบนสารพื้นจะถูกส่งผ่านไปยังสารเสริมแรงโดยผ่านบริเวณผิวสัมผัส ดังนั้นเส้นใยเสริมแรงจะต้องถูกเชื่อมต่อดีกับสารพื้น เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) สูง ลักษณะของการแตกหักเสียหายก็ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของบริเวณผิวสัมผัสเช่นเดียวกัน ผิวสัมผัสที่ไม่แข็งแรงจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งลดลง ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานในการแตกหักลดลงด้วย นอกจากนี้ ลักษณะของบริเวณผิวสัมผัสจะมีผลต่อสมบัติอื่นๆ ของวัสดุเชิงประกอบด้วย เช่น การ

คืบ (Creep), การล้า (Fatigue) และการเสื่อมเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งพันธะที่เชื่อมระหว่างสารพื้นกับสารเสริมแรงจะเกิดบริเวณผิวหน้าสัมผัสดังนี้

### 3.3.1 พันธะระหว่างหน้าสัมผัส (Interfacial bonding)

เนื่องจากสารพื้นกระจายตัวปกคลุมสารเสริมแรง ซึ่งทำให้เกิดการขัดกันของหน้าสัมผัสระหว่างสารพื้นกับสารเสริมแรงเป็นผลให้เกิดพันธะแบบต่าง ๆ ขึ้น เช่น พันธะทางกลและพันธะทางไฟฟ้า พันธะทางกลสามารถเปลี่ยนไประหว่างขั้นตอนการผลิตหรือช่วงของการใช้งานได้ ชนิดของพันธะขึ้นกับประเภทของสารหรือเส้นใยเสริมแรงกับสารพื้นและยังขึ้นกับรายละเอียดอื่น ๆ เช่น สิ่งสกปรกบนผิวหรือสารเติมแต่งต่าง ๆ ด้วย

## 4 พันธะทางกล (Mechanical bonding)

การยึดกันทางกลหรือการยึดกันระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองด้าน ดังแสดงใน Figure 20 ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ความขรุขระและการยึดเกาะที่ดีจะส่งผลให้พันธะทางกลมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การหดตัวของสารพื้นบนสารเสริมแรงจะช่วยสนับสนุนให้พันธะแข็งแรงขึ้น พันธะทางกลมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อการกระทำในแนวนานกับหน้าสัมผัสหรือสามารถต้านทานแรงเฉือนได้ดีที่สุดในทางตรงกันข้ามความแข็งแรงของหน้าสัมผัสในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวหน้าสัมผัสจะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปพันธะระหว่างหน้าสัมผัสในวัสดุเชิงประกอบจะเป็นแบบพันธะทางกลผสมกับพันธะแบบอื่น



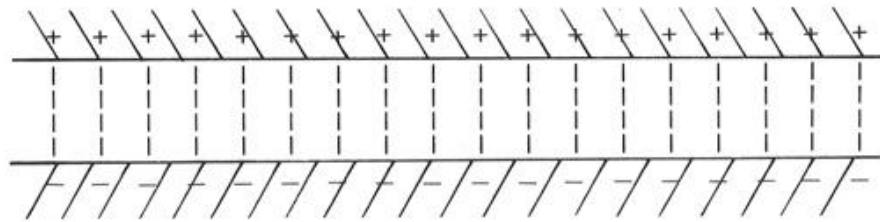
**Figure 20.** Reinforcement-Matrix Interface: Mechanical bonding.

**Source :** Matthews and Rawling (1994)

## 4 พันธะทางไฟฟ้า (Electrostatic bonding)

พันธะทางไฟฟ้าระหว่างสารพื้นกับสารเสริมแรงจะเกิดขึ้นเมื่อผิวหนึ่งมีประจุบวกและผิวอีกด้านหนึ่งมีประจุลบ ดัง Figure 21 ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างแต่ละส่วนประกอบในวัสดุเชิงประกอบ ปฏิริยาทางไฟฟ้านี้จะเกิดในช่วงแคบ ๆ และจะเกิดกับหน้าสัมผัสที่มีระยะในระดับอะตอมที่ไม่ห่างกันมากนัก โดยปกติหน้าสัมผัสระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับสารพื้นจะอยู่ติดกันแต่ถ้าหากมีสารปนเปื้อนหรือก๊าซไปกีดขวางระหว่างหน้าสัมผัสแล้วก็จะทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าลดลง



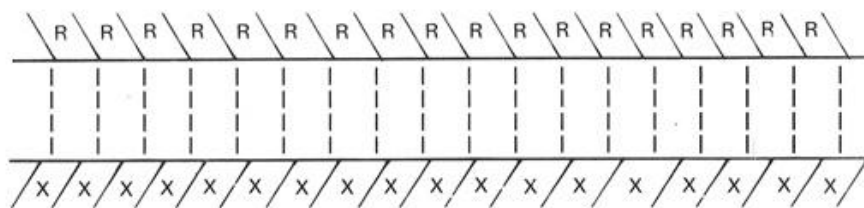


**Figure 21.** Reinforcement-Matrix Interface: Electrostatic bonding.

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

#### 4 พันธะทางเคมี (Chemical bonding)

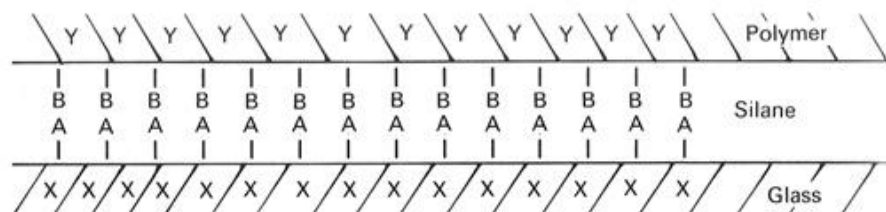
พันธะทางเคมีถูกสร้างระหว่างสารเคมีบนผิวของสารเสริมแรง (X) กับสารที่มีความเข้ากันได้ของสารพื้น (R) ดัง Figure 22 ความแข็งแรงของพันธะทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะ และจำนวนพันธะต่อหน่วยพื้นที่



**Figure 22.** Reinforcement-Matrix Interface: Chemical bonding.

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

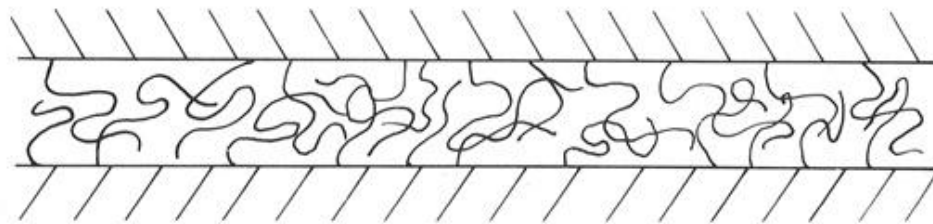
พันธะทางเคมีสามารถทำให้เกิดได้โดยการเติมสารช่วยในการยึดเกาะ (Coupling agent) เช่น ไซเลน (Silanes) ซึ่งนิยมใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะสำหรับวัสดุเชิงประกอบเสริมใยแก้ว ดัง Figure 23 โมเลกุลของไซเลนด้านหนึ่ง (A) จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับผิวของเส้นใยแก้ว และโมเลกุลอีกด้านหนึ่ง (B) จะทำปฏิกิริยากับสารพื้น



**Figure 23.** Reinforcement-Matrix Interface: Coupling agent chemical bonding.

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

4 พันธะจากอันตรกิริยา (Interaction bonding) หรือการเชื่อมด้วยสารตัวกลางอะตอม หรือ โมเลกุลของส่วนประกอบสองส่วนของวัสดุเชิงประกอบ เป็นพันธะที่เกิดจากโมเลกุลของแต่ละส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบที่ทำการแพร่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะเกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัส ซึ่งสามารถเกิดในวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ ดัง Figure 24

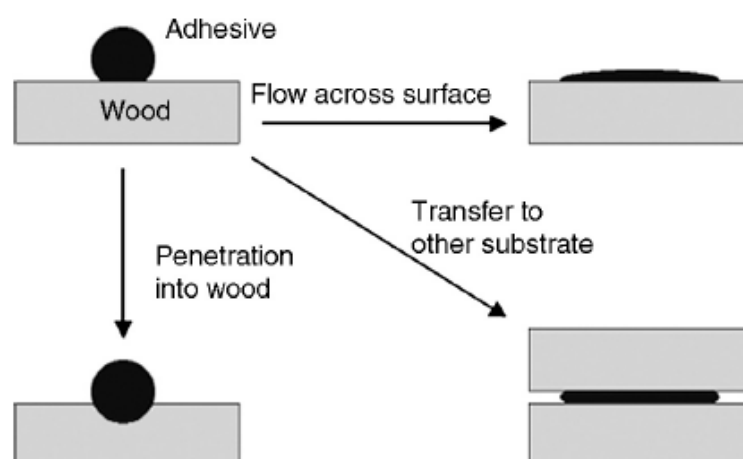


**Figure 24.** Reinforcement-Matrix Interface: Interaction bonding.

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

### 3.4 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ความสามารถในการเปียก เป็นความสามารถของของเหลวที่สัมผัสอยู่บริเวณผิวหน้าของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลที่ทั้งสองเกิดขึ้นซึ่งกันและกัน ซึ่งความสามารถในการเปียกมีความสำคัญต่อพันธะหรือการยึดเกาะของวัสดุทั้งสอง ซึ่งเป็นการที่สารพื้นสามารถแผ่กระจายตัวบนผิวของสารเสริมแรงในทุกๆ ระดับพื้นผิวและสามารถเข้าแทนที่อากาศได้หมด (Philip, 2006)



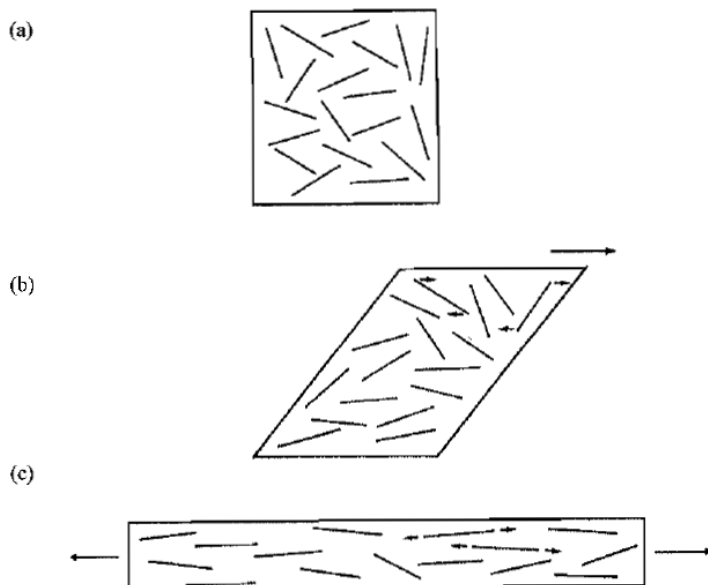
**Figure 25.** Wettability of wood and adhesive.

**Source:** Frihart (2005)

### 3.5 การจัดเรียงตัวของเส้นใย (Matthews and Rawling, 1994)

ปัจจัยนี้มีความสำคัญเท่าๆ กับความยาวของเส้นใยเสริมแรง ซึ่งการจัดเรียงตัวของเส้นใยขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ การควบคุมความยาวของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบจะทำให้สามารถคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตได้ เช่น ความแข็งแรง (Strength) และความแข็งเกร็ง (Stiffness) ซึ่งทิศทางการไหลของวัสดุจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของเส้นใย โดยที่เส้นใยสั้นจะเกิดการไหลของวัสดุได้มากกว่าเส้นใยยาว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแม่พิมพ์ได้

การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเส้นใยมีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะรูปร่างของเส้นใย สมบัติความหนืดของสารพื่นเมื่อมีการเติมเส้นใย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเส้นใยมักเกิดจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการยืด (Elongation) และแรงเฉือน (Shear force) ดัง Figure 26



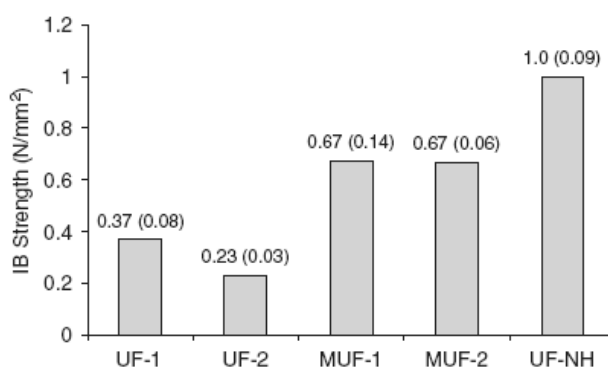
**Figure 26.** Schematic diagram of the changes in fiber orientation during flow: (a) Initial random distribution; (b) Rotation during shear flow; (c) Alignment during elongational flow

**Source:** Matthews and Rawling (1994)

#### 4. ผลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

4.1 สารยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินและสารเมลามีนยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Urea-formaldehyde resin and Melamine urea – formaldehyde resin)

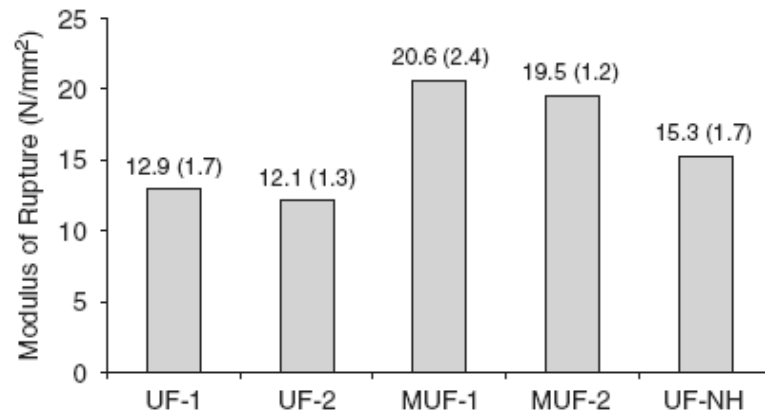
Colak และคณะ 2007 ได้ทำการศึกษาสมบัติของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเศษชิ้นไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับสารยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea formaldehyde resin, UF) และสารเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine urea formaldehyde resin, MUF) โดยนำเศษชิ้นไม้ยูคาลิปตัสนำเข้าเครื่องแยกด้วยตะแกรงให้ได้ขนาด 3, 1.5 และ 0.8 mm เป็นส่วนของแกนกลาง (Core layer) และส่วนผิวหน้า (Surface layer) อบชิ้นไม้ให้มีความชื้นลดลงเหลือ 3% นำมาผลิตเป็นแผ่นชิ้นไม้อัด 3 ชั้น (ขนาด 50 x 50 cm) โดยการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดนี้จะมีการควบคุมสภาวะดังนี้ (1) ใช้ความดันในการกดอัดแผ่นชิ้นไม้อัด 2.5 N/mm<sup>2</sup> และใช้อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที (2) ใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 25% เป็นสารเร่งแข็ง ปริมาณ 1% สำหรับชั้นไม้ด้านนอก (Outer layer) และ 2% (โดยคิดจากน้ำหนักเศษชิ้นไม้แห้ง) สำหรับชั้นไม้ด้านใน (Inner layer) (3) ปริมาณการใช้เรซินในชั้นไม้ด้านนอก (Outer layer) และชั้นไม้ด้านใน (Inner layer) มีปริมาณการใช้เท่ากับ 10% และ 8% (โดยคิดจากน้ำหนักเศษชิ้นไม้แห้ง) ตามลำดับ (4) แผ่นชิ้นไม้อัดมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.65 g/cm<sup>3</sup> และก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ จะเก็บไว้ที่สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 20 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 65%RH ซึ่งมีผลค่ามอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR), มอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity; MOE), แรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond; IB) และความหนาเมื่อพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling; TS) ดังใน Figure 27-30



**Figure 27.** Internal bond strength of UF- and MUF-bonded particleboards

**Remark:** 1 is the logs were stored indoor condition for 2 months. 2 is the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15).

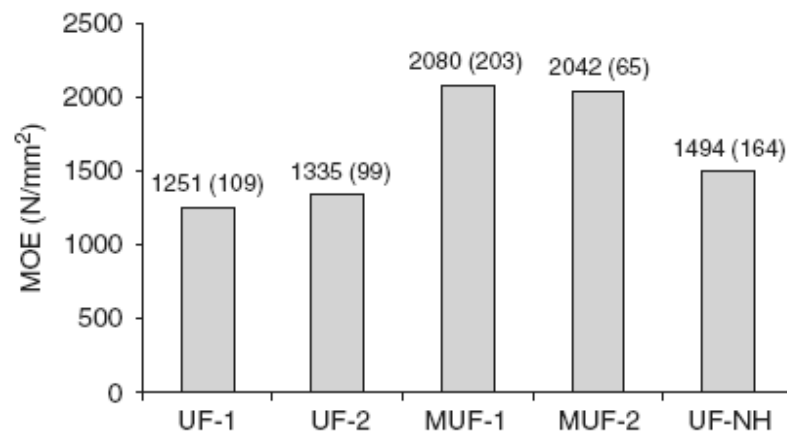
**Source :** Colak *et al.* (2007)



**Figure 28.** Modulus of rupture mean values of the test panels.

**Remark:** 1 is the logs were stored indoor condition for 2 months. 2 is the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15).

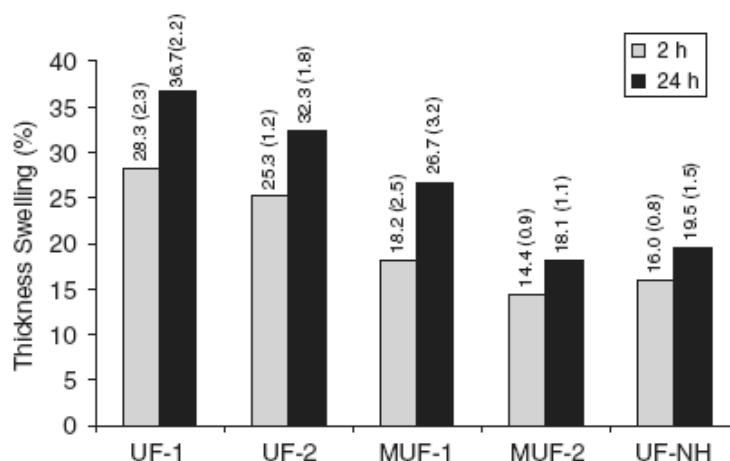
**Source :** Colak *et al.* (2007)



**Figure 29.** Modulus of elasticity values of the test panels.

**Remark:** 1 is the logs were stored indoor condition for 2 months. 2 is the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15).

**Source :** Colak *et al.* (2007)



**Figure 30.** Thickness swelling (2 and 24 h) of UF- and MUF-bonded particleboards.

**Remark:** 1 is the logs were stored indoor condition for 2 months. 2 is the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15).

**Source :** Colak *et al.* (2007)

เมื่อนำค่าของสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากเศษไม้ยูคาลิปตัส ร่วมกับการใช้สารยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และสารยูเรียเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมประสาน สามารถนำมาวิเคราะห์ทางสถิติได้ดัง Table 4

**Table 4.** Results of analysis of UF- and MUF-bonded particleboards.

Properties	Unit	UF-1	MUF-1	UF-2	MUF-2	UF-NH
Internal bond test	N/mm <sup>2</sup>	0.37 <sup>a</sup>	0.67 <sup>c</sup>	0.23 <sup>b</sup>	0.67 <sup>c</sup>	1.01 <sup>d</sup>
Modulus of rupture	N/mm <sup>2</sup>	12.9 <sup>a</sup>	20.6 <sup>b</sup>	12.10 <sup>a</sup>	19.50 <sup>b</sup>	15.30 <sup>c</sup>
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	1,251 <sup>a</sup>	2,080 <sup>b</sup>	1,335 <sup>a</sup>	2,042 <sup>b</sup>	1,494 <sup>c</sup>
Thickness swelling at 2 hours	%	28.3 <sup>a</sup>	18.2 <sup>c</sup>	25.30 <sup>b</sup>	14.40 <sup>d</sup>	15.00 <sup>e</sup>
Thickness swelling at 24 hours	%	36.7 <sup>a</sup>	26.7 <sup>b</sup>	32.30 <sup>a</sup>	18.10 <sup>c</sup>	19.50 <sup>d</sup>

**Remark:** Different letters denote a statistically significant difference. 1, the logs were stored indoor condition for 2 months; 2, the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15)

**Source :** Colak *et al.* (2007)

จาก Table 4 พบว่าผลค้ำมอดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture; MOR) ที่มีการลดลงของแผ่นชิ้นไม้อัด (Particleboard) ที่ผลิตจากท่อนไม้ที่มีการอบไอน้ำ ซึ่งเมื่อดูจากค่าแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond) และค่าของมอดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture; MOR) ของแผ่นชิ้นไม้อัดที่เตรียมจากสารเมลามีนยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์นั้นมีค่าสูงกว่าสารยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เรซินทั้งที่มีการเติมและไม่เติมสารเร่งแข็งอย่างชัดเจน อีกทั้งเมื่อสังเกตดูผลที่ได้จากการใช้สารยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมประสานและมีการเติมสารเร่งแข็งนั้น พบว่าการใช้ท่อนไม้ที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำมีผลทำให้ค่าของมอดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture; MOR) ลดลงด้วยซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับค่าแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond) ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติความแข็งแรงของไม้จะลดลงเมื่อมีการใช้กระบวนการที่มีความร้อนสูง (Thermal process) ซึ่งเป็นผลมาจากการ Hydrolysis และ Extraction ที่เกิดขึ้นกับเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดการเสื่อมสลายตัว โดยทั่วไปการเสื่อมสลายนี้จะเกิดขึ้นในอุณหภูมิสูง (200°C) แต่การเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลสสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น การอยู่ในอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ความกดอากาศที่เปลี่ยนแปลง ปริมาณความชื้นที่มากเกินไป และความดันสูง เช่น ไม้สามารถเกิดการเสื่อมสลายได้เร็วเมื่อมีการสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำ ซึ่งจะเกิดการเสื่อมสลายได้เร็วกว่าการที่สัมผัสกับความร้อนในขณะที่แห้ง และปริมาณของโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ลดลงอย่างรวดเร็ว และการตอบสนองต่อการเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลสที่มีความไวกว่าเซลลูโลสมาก เนื่องจากพันธะ C-C และ C=O ที่เกิดการแตกออกภายในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสเกิดได้ดีกว่าภายในโมเลกุลของเซลลูโลส

**Table 5.** Comparison of properties of UF- and MUF-bonded particleboards.

Properties	Unit	MUF-1/	UF-1/	MUF-1/	UF-NH/
		UF-1	UF-2	MUF-2	UF-2
Internal bond test	N/mm <sup>2</sup>	28.85	23.33	0	62.9
Modulus of rupture	N/mm <sup>2</sup>	22.99	3.2	2.74	11.68
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	24.89	-3.25	0.92	5.62
Thickness swelling at 2 hours	%	-21.72	5.6	11.66	-25.56
Thickness swelling at 24 hours	%	-15.77	6.38	19.2	-24.71

**Remark:** Different letters denote a statistically significant difference. 1, the logs were stored indoor condition for 2 months; 2, the logs were steamed for 16 h at 60°C. NH, without hardener. Values in parenthesis are standard deviations (n = 15)

**Source :** Adapted from Colak *et al.* (2007)

จาก Table 5 พบว่าผลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารเมลามีนยูเรีย พอร์มาลดีไฮด์มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์โดยเมื่อเปรียบเทียบจะมีค่าของแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond; IB), ค่ามอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) ของสารเมลามีนยูเรียพอร์มาลดีไฮด์จะมากกว่าสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ประมาณ 29%, 23% และ 25% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาเมื่อพองตัว (Thickness swelling, TS) เมื่อแช่น้ำเป็นเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง พบว่าการใช้สารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมประสานมีค่าความหนาเมื่อพองตัวหลังแช่น้ำสูงกว่าการใช้สารเมลามีนยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ และการใช้สารเชื่อมประสานยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ที่ไม่ได้มีการเติมสารเร่งแข็งแต่ใช้ท่อนไม้ที่ผ่านการอบไอน้ำก็มีค่าต่ำกว่าการใช้สารเชื่อมประสานยูเรียพอร์มาลดีไฮด์เรซินที่มีการเติมสารเร่งแข็ง ทั้งนี้เป็นเพราะสารเมลามีนยูเรียพอร์มาลดีไฮด์เรซินมีสมบัติการต้านทานน้ำดีกว่าสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์เรซิน และจากการศึกษาของ Hsu และคณะ (1988 อ้างโดย Colak และคณะ 2007) พบว่าค่าการพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling) ของเศษชิ้นไม้ที่ผ่านการการอบไอน้ำ โดยการอบไอน้ำมีผลให้เกิดการลดความเครียด (Stress) ภายในเศษชิ้นไม้ในขั้นตอนการกดอัดด้วยความร้อน ซึ่งจากการใช้อบไอน้ำท่อนไม้มีผลให้ค่าการพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling) ทั้งในการใช้สารเมลามีนยูเรียพอร์มาลดีไฮด์และสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์มีค่าต่ำลง และการไม่เติมสารเร่งแข็งในสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ก็มีค่าลดลงเช่นกัน

สามารถสรุปได้ว่าในวัสดุเชิงประกอบจากเศษไม้ยูคาลิปตัสการใช้สารเมลามีนยูเรียพอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมประสานจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าและค่าความหนาเมื่อพองตัวหลังแช่น้ำต่ำกว่าสารยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ และมีความสามารถรักษาคุณสมบัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้ (Colak *et al.*, 2007)

#### 4.2 สารฟีนอลพอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Phenol – formaldehyde resin)

สารเมลามีนยูเรีย-พอร์มาลดีไฮด์เรซินมีความนิยมใช้มากในการผลิตไม้อัด แต่ในปัจจุบันมีการนำเอาไม้อัดมาใช้งานที่หลากหลาย ทำให้มีความต้องการสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพที่ดีมากขึ้น เช่น การต้านทานความชื้น จึงได้มีการปรับปรุงสารฟีนอลพอร์มาลดีไฮด์เพื่อพัฒนาสารเชื่อมประสานในการผลิตไม้อัดที่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น ซึ่งสารฟีนอล-พอร์มาลดีไฮด์เรซินเป็นสารเชื่อมประสานหลักที่ใช้กันในการผลิตไม้อัดชนิดที่สามารถป้องกันน้ำได้ ถึงแม้ว่าการใช้สารฟีนอล-พอร์มาลดีไฮด์เรซินจะสามารถป้องกันน้ำได้ แต่มีต้องใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวในการอัดร้อนนานกว่าการใช้พลาสติกอะมิโนเรซิน แต่เนื่องด้วยสารเชื่อมประสานกลุ่มอะมิโนเรซินนี้มีข้อด้อย เช่น ข้อจำกัดในการใช้งาน, การป้องกันน้ำ อีกทั้งมีการปลดปล่อยสารพอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นสารที่อันตรายต่อมนุษย์ได้ โดยทั่วไปมีการใช้สารรีซอลฟีนอล-



ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินเพื่อใช้ในการผลิตไม้อัดที่ใช้กับงานโครงสร้าง ซึ่งสารนี้มีการยึดติดอย่างดีเยี่ยม แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูง และใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปนาน ซึ่งอุณหภูมิและเวลาในการผลิตไม้อัดของ สารรีซอลฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินนี้จะมากกว่าการใช้สารกลุ่มอะมีโนเรซิน จึงมีการพัฒนา สารฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินเพื่อลดอุณหภูมิและระยะเวลาการเกิดเจลซึ่งมีความสำคัญต่อการ ประหยัดพลังงานและการเพิ่มผลผลิต (Kim *et al.*, 2008) ซึ่ง Kim และคณะ (2008) ได้ทำการ ทดสอบเปรียบเทียบสารฟีนอลิกเรซินที่ทำการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการได้ผลดัง Table 6 และระยะเวลาการเกิดเจลของฟีนอลิกเรซิน โดย เปรียบเทียบการเกิดเจลของเรซินเมื่อทำการเติม สารประกอบโนโวแลคและสารเร่งแข็งแสดงใน Table 7

**Table 6.** Properties of the various resins.

Resins	pH	Viscosity (25 °C, cp)	Solid content (%)
PF-A	8.8	78	46.4
PF-B	9.6	104.5	47.5
PMF	8.6	33	48.7
UMF	7.6	67	53.2

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.0:0.1 (molar ratio)

PF-B: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.2:0.25 (molar ratio)

PMF: PF(phenol:formaldehyde:NaOH=1:2.5:0.1)+MF(melamine:formaldehyde=1:2.5)

**Source:** Kim *et al.* (2008)

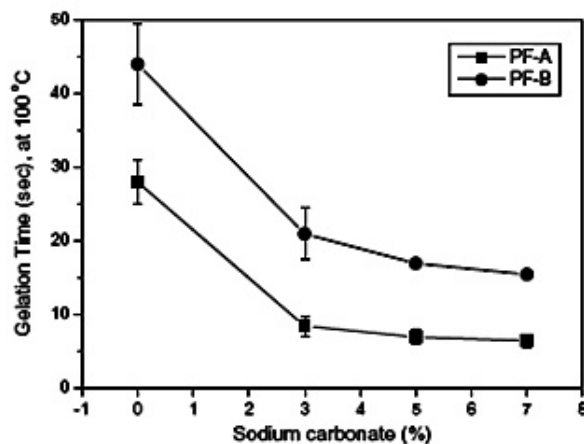
**Table 7.** Curing acceleration of phenolic resin effect obtained by applying various additives.

Additives	Addition level (%)	Viscosity (25 °C, cp)	Solid content (%)
		PF-A	PF-B
Condition	–	42.8	24.8
Novlac-A	10	28.4	21.5
Novlac-B	10	27.6	20.8
Novlac-C	10	27.6	21.1
Sodium carbonate	5	8.2	6.8
Resorcinol	10	22.4	24.4

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1: 2.0: 0.1 (molar ratio)

PF-B: phenol:formaldehyde:NaOH = 1: 2.2: 0.25 (molar ratio)

**Source :** Kim *et al.* (2008)



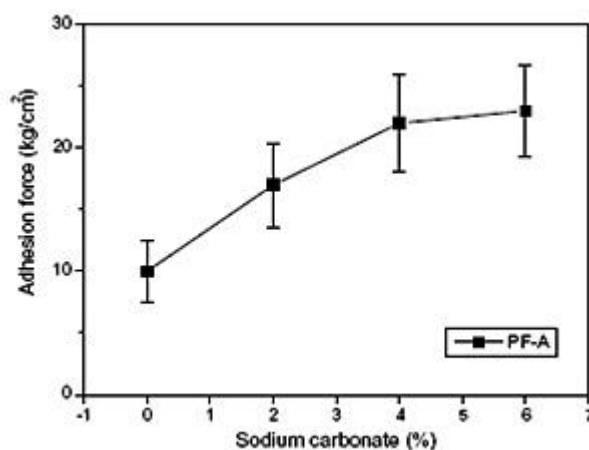
**Figure 31.** Gelation time reduction of phenolic resin effect according to sodium carbonate addition.

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1: 2.0: 0.1 (molar ratio)

PF-B: phenol:formaldehyde:NaOH = 1: 2.2: 0.25 (molar ratio)

**Source :** Kim *et al.* (2008)

จาก Figure 31 แสดงระยะเวลาการเกิดเจลของสารฟีนอลิกเรซินที่ทำการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณ 3% สามารถลดระยะเวลาในการเกิดเจลของสารฟีนอลิกเรซิน (PF-A และ PF-B) ที่อุณหภูมิ 100°C ลงได้ถึง 63% และ 52% ตามลำดับ เมื่อเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะสามารถลดระยะเวลาการเกิดเจลได้มากขึ้น แต่มีความแตกต่างไม่มากนัก

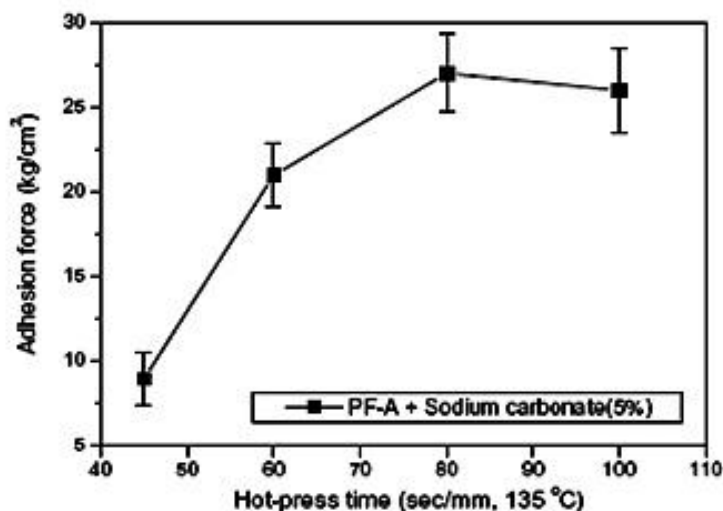


**Figure 32.** Correlation between sodium carbonate addition and failure ratio of attachment side.

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.0:0.1 (molar ratio)

**Source :** Kim *et al.* (2008)

จาก Figure 32 พบว่าเมื่อมีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตมากขึ้นจะมีค่าแรงยึดติดของการที่ใช้ผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดตัวอย่างมากขึ้น ซึ่งค่าที่ได้จะมีแรงยึดติดของกาวเพิ่มขึ้น 80% ถึง 130%

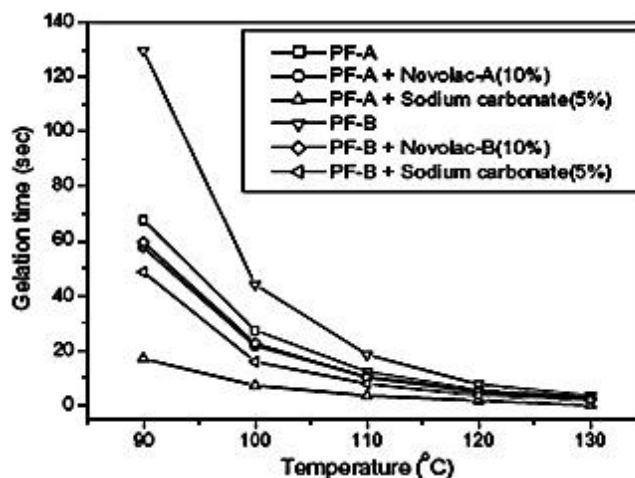


**Figure 33.** Comparison of adhesion strength by hot-press time (135°C).

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.0:0.1 (molar ratio)

**Source :** Kim *et al.* (2008)

Kim และคณะ (2008) ได้ทำการทดลองหาเวลาในการอัดร้อนที่เตรียมจากสารฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินจาก Figure 33 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มเวลาในการอัดร้อนค่าแรงการยึดติดของกาวจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากมีการเพิ่มเวลามากกว่า 80 sec/mm ค่าแรงการยึดติดของกาวจะมีแนวโน้มลดลง



**Figure 34.** Correlation between gelation time and temperature according to sodium carbonate addition.

**Remark:** PF-A: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.0:0.1 (molar ratio)

PF-B: phenol:formaldehyde:NaOH = 1:2.2:0.25 (molar ratio)

**Source :** Kim *et al.* (2008)

จาก Figure 34 เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาการเกิดเจลของกาวที่มีการเติมสารเร่งแข็งที่แตกต่างกัน พบว่าสารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด A ที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณ 5% สามารถลดระยะเวลาการเกิดเจลได้มากที่สุด รองลงมาคือ สารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด B ,สารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด A ที่มีการเติมสาร โนวอลแลค-A ปริมาณ 10%, สารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด B ที่มีการเติมสาร โนวอลแลค- B ปริมาณ 10% สารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด A และสารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิด B ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าการผสมด้วยสาร โนวอลแลคฟีนอลิกเรซินทำให้ระยะเวลาในการเกิดเจลลดลง 20 – 50% เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 100°C ส่วนสาร โซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารเร่งแข็งที่สำคัญของสารฟีนอลิกเรซิน โดยเมื่อเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณ 5% จะสามารถลดเวลาในการเกิดเจลของสารฟีนอลิกเรซินลงได้ 65 – 80% ที่อุณหภูมิ 100°C โดยเปรียบเทียบกับสารฟีนอลิกเรซินที่ไม่ได้เติม ซึ่งสารโซเดียมคาร์บอเนตมีผลต่อระยะเวลาการเกิดเจลอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิการอัดร้อนต่ำมากกว่าอุณหภูมิสูงมี ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันความสามารถของสาร โซเดียมคาร์บอเนตในการเป็นสารเร่งแข็งของสารฟีนอลิกเรซินได้เป็นอย่างดี

**Table 8.** The physical properties of the panel products produced while applying the hot-press method.

Work condition	Dimension		
	9mm $\Delta$ 4ft $\Delta$ 8ft	12mm $\Delta$ 4ft $\Delta$ 8ft	18mm $\Delta$ 4ft $\Delta$ 8ft
<b>(a) Glue type</b>	Phenol+4% sodium carbonate (curing accelerator)		
Veneer moisture ratio (%)	7-9	7-9	7-9
Hot-press temperature (°C)	135	135	135
Hot-press time	9 min $\Downarrow$ 6 min	12 min $\Downarrow$ 8 min	16 min $\Downarrow$ 12min
<b>(b) Waterproof adhesion strength (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
Waterproof adhesion strength	14.0	14.3	11.7
Boiling for 24 h	12.8	11.8	9.5

Source : Kim *et al.* (2008)

จากการศึกษา Kim และคณะ (2008) กล่าวโดยสรุปคือ การศึกษาสารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินที่มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้ 3 วิธีการ ได้แก่ การผสมด้วยโนโวแล็คฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Novolac phenol formaldehyde resin), การเติมสารกลุ่มอะมิโนเรซินและการใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ

ซึ่งผลการทำให้สารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินแข็งตัวในระยะเวลาสั้นและมีความแข็งแรงในการยึดติดของกาว พบว่าเวลาในการเกิดเจลลาติโนเซชันของฟีนอลิกเรซินที่ผสมด้วยโนโวแล็คเรซินสามารถลดระยะเวลาการแข็งตัวได้ 20 – 50% เมื่อเปรียบเทียบกับฟีนอลิกเรซินที่ไม่ได้มีการผสม (ที่อุณหภูมิ 100°C) เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการอัดร้อนของการใช้ฟีนอลิกเรซินในการอัดวัสดุเชิงประกอบพบว่าการใช้สารกลุ่มอะมิโนเรซินสามารถลดเวลาในการอัดร้อนลงมากที่สุด แต่การใช้สารกลุ่มนี้จะมีปัญหาในเรื่องความแข็งแรงพันธะของชั้นป้องกันน้ำของแผ่นไม้อัดต่ำ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวเร่งเพื่อช่วยในการแข็งตัวของฟีนอลิกเรซินพบว่าสารโซเดียมคาร์บอเนตสามารถลดเวลาการแข็งตัวได้มากที่สุดถึง 30% ซึ่งการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตนี้สามารถเร่งการแข็งตัวของสารฟีนอลิกเรซินได้และยังมีความแข็งแรงพันธะของชั้นป้องกันน้ำ เท่ากับสารฟีนอลิกเรซินที่ไม่ได้มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนต อีกทั้งยังสามารถลดเวลาในการอัดร้อนลงได้ประมาณ 30 วินาทีต่อตารางมิลลิเมตร (ที่อุณหภูมิ 135°C) ซึ่งผลการทดลองนี้แนะนำให้ปริมาณการเติมที่เหมาะสมของสารโซเดียมคาร์บอเนตที่ 4 – 5% ของสารฟีนอลิกเรซินที่ใช้

4.3 สารพอลิเมอร์ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานเนต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI)

Wang และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาผลของการผสมกาวพอลิเมอร์ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานเนต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) กับกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน ที่มีอัตราส่วนผสมต่างๆ ดัง Table 9

**Table 9.** Sample group of particleboards fabricated.

Sample group	Chip content (%)	
	pMDI	PF
A	100	0
B	80	20
C	70	30
D	50	50
E	30	70
F	20	80
G	0	100
MD	50	50
MC	70	30
MA	100	0

**Remark:** Sample groups A–G: particleboards. Sample groups MD, MC and MA: MF resin-impregnated paper-overlaid particleboards. pMDI was used for the core layer of the particleboard. pMDI resin absorption was 4% of the oven-dried weight of the chips. PF was used for the face and back layers of the particleboard. PF resin absorption was 6% of the oven-dried weight of the chips.

**Source:** Wang *et al.* (2007)

**Table 10.** Properties of tested particleboard sprayed with various pMDI/PF ratios.

Sample group	Air-dried density (g/cm <sup>3</sup> )	MOR (MPa)	MOE ( $\Delta 10^2$ MPa)	VI (m/s)	IB (MPa)	SH (N)	TS (%)	V <sub>t</sub> (m/s)
G	0.81±0.03	11.4±0.8	20.8±1.0	2112±52.6	0.56±0.02	507.6±64.0	18.1±2.3	823±37.6
D	0.82±0.02	16.1±1.2	25.1±1.8	2271±177.4	0.62±0.02	638.0±45.7	14.2±2.5	865±50.1
C	0.82±0.02	17.0±0.9	26.5±1.2	2302±30.6	0.65±0.01	740.9±46.8	11.8±1.9	873.51.1
B	0.79±0.03	21.2±1.1	27.9±1.1	2446±26.3	0.68±0.03	799.7±37.5	10.6±1.4	891±52.2
A	0.81±0.04	23.2±1.8	30.9±0.7	2520±122.8	0.73±0.02	848.7±55.1	7.1±1.1	938±67.1
MD	0.83±0.02	18.9±1.6	28.9±1.8	2367±36.0	0.62±0.03	752.6±42.1	13.8±2.3	836±47.6
MC	0.83±0.02	19.6±1.9	31.1±2.9	2451±83.2	0.65±0.03	847.7±46.3	10.1±1.5	851±53.0
MA	0.82±0.04	27.9±1.2	34.5±1.6	2533±77.9	0.73±0.03	936.9±50.4	7.0±1.6	939±63.3

**Remark:** Sample groups A, B, C, D and G: particleboards. Sample groups MD, MC and MA: MF resin-impregnated paper-overlaid particleboards.

**Source:** Wang *et al.* (2007)

จาก Table 10 พบว่าการใช้สารพอลิเมอร์ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) เพียงชนิดเดียว ตัวอย่างกลุ่ม A มีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่ามอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR), ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE), ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic wave velocity, VI), ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bonding strength, IB), ค่าความแข็งแรงต่อการยึดสกรู (Screw holding strength, SH), ค่าการพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling, TS) และค่าความเร็วอัลตราโซนิค (Ultrasonic velocity, V<sub>t</sub>) ดีมากกว่าการผสมกับสารฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน และการทำให้ชิ้นไม้ อิ่มตัวด้วยสารพอลิเมอร์ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาตสามารถทำให้สมบัติต่างๆ มีค่าสูงขึ้น (Wang *et al.*, 2007)

## 5. ผลของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

Pan และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาค (Particle sizes) ของไม้ยูคาลิปตัสที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นชิ้นไม้อัด (Particleboard) โดยการนำแผ่นชิ้นไม้อัดที่เตรียมจากชิ้นไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 10 – 20 mesh, 20 – 40 mesh และ 40 – 60 mesh ซึ่งใช้ปริมาณกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เรซินเท่ากันปริมาณ 7% มาทำการทดสอบเพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) ค่ามอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) ค่าการต้านทานแรง

ดึง (Tensile strength) ค่าการแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond, IB) ค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) และค่าพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling) พบว่าแผ่นชิ้นไม้อัดที่เตรียมจากชิ้นไม้ที่มีขนาด 20 – 40 mesh มีผลการทดสอบเชิงกลสูงที่สุด โดยมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE), ค่ามอดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) และค่าการแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bond, IB) (Table 11) ยกเว้นค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และยังมีค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) และค่าพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling) ต่ำที่สุดอีกด้วย เนื่องจากชิ้นไม้ที่มีขนาด 20 – 40 mesh มีความเหมาะสมกับปริมาณกาวที่ใช้ทำให้เกิดพันธะในการยึดเกาะที่มีความแข็งแรงดี ส่วนชิ้นไม้ที่มีขนาด 40 – 60 mesh นั้นมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากกว่าในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งพื้นที่ผิวอาจมีมากเกินไปที่กาวจะสามารถปกคลุมได้อย่างทั่วถึงเมื่อใช้อัตราส่วนผสมที่เท่ากัน และชิ้นไม้ที่มีขนาด 10 – 20 mesh นั้นอาจมีขนาดของชิ้นไม้ใหญ่เกินไปทำให้เกิดช่องว่างที่ไม่ได้ปกคลุมด้วยกาว ซึ่งช่องว่างนั้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมต่อได้ไม่ดี ทำให้มีความแข็งแรงต่ำ

**Table 11.** Properties of particleboards in different particle sizes.

Particle size (mesh)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Tensile Strength (MPa)	IB (MPa)	Water absorption		Thickness swelling	
					(%)		(%)	
					2h	24h	2h	24h
10-20	11.1 c	1406.1 b	6.1 c	1.20 b	72.39 b	86.22 b	37.00 a	43.91 a
20-40	13.6 a	1564.2 a	7.1 b	1.31 a	69.89 c	81.86 c	31.26 c	38.28 b
40-60	12.7 b	1352.5 c	8.5 a	1.05 c	85.03 a	98.36 a	36.05 b	39.12 b

**Remark:** Values within the same column followed by different letters (a–c) are significantly different at  $P < 0.05$ . The particleboards were made with 7% UF and particles without bark.

**Source:** Pan *et al.* (2007)

## 6. กระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบจากไม้ทางการค้า (Wood-Based Panel Products, 2001)

ขั้นตอนการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด (Particleboard) เชิงการค้า (Figure 35) มีดังนี้

### 6.1 การเตรียมชิ้นไม้ (Particle preparation)

ไม้ที่ใช้ในการผลิตมักนิยมใช้ไม้ยางพาราในการผลิตเนื่องจากมีราคาถูก ซึ่งไม้จะถูกส่งเข้าเครื่องตัด (Drum fraker) ได้เป็นชิ้นไม้ (Flaker) ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.3-0.5 mm และมีความชื้นประมาณ 60% หลังจากนั้นจะถูกส่งไปเก็บไว้ในไซโลเก็บชิ้นไม้เปียก (Wet flake silo)



## 6.2 การอบและคัดขนาดชิ้นไม้ (Drying and Classifying)

ชิ้นไม้จากไซโลไม้สดส่งเข้าเครื่องอบ อบให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 1-3% หลังจากนั้นส่งเข้าเครื่องร่อนเพื่อคัดขนาด (Suspension type gyratory screen) ชิ้นไม้ที่มีขนาดละเอียดจะส่งไปเก็บไว้ในไซโลผิว (Surface silo) ส่วนชิ้นไม้ที่มีขนาดใหญ่จะถูกส่งไปเข้าเครื่องบด (Hammer mill) เมื่อบดชิ้นไม้แล้วจะผ่านเครื่องคัดขนาดด้วยกระแสลม (Air grader) เพื่อให้ได้ชิ้นไม้ที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับเป็นชิ้นไม้ส่วนไส้ซึ่งจะถูกส่งไปเก็บไว้ในไซโลส่วนไส้ (Core silo) และชิ้นไม้ส่วนที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะถูกส่งเข้าเครื่องตัดย่อยขนาด (Knife ring flake) เพื่อย่อยให้ได้ชิ้นขนาดละเอียดและจะถูกส่งไปเก็บไว้ในส่วนของไซโลผิวต่อไป

## 6.3 การผสมกาวกับชิ้นไม้ (Resin blending)

ชิ้นไม้ส่วนผิวและส่วนไส้จากไซโลถูกลำเลียงผ่านเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วส่งเข้าเครื่องผสมกาวกับชิ้นไม้ซึ่งเป็นแบบ Ring mixture ซึ่งเครื่องผสมกาวกับชิ้นไม้จะทำการควบคุมสัดส่วนในการผสมโดยอัตโนมัติ

## 6.4 การทำแผ่นชิ้นไม้ (Mat formation)

ชิ้นไม้ส่วนผิวและส่วนไส้ที่ผ่านการผสมกาวแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องทำแผ่น (Forming machine) และโรยลงบนสายพาน (Press belt) โดยใช้กระแสลม (Win sifting) การทำแผ่นด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้แผ่นชิ้นไม้อัดที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีชิ้นไม้ขนาดลดหลั่น (Graduated-layer particle board)

## 6.5 การอัดรีด (Hot pressing)

แผ่นชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าเครื่องอัดรีด เพื่ออัดให้ได้ขนาดความหนาของแผ่นตามที่ต้องการ ซึ่งความหนาที่ผลิตโดยทั่วไปมีตั้งแต่ 3-35 mm

## 6.6 การผึ่งให้เย็นและการตัดแบ่งให้ได้ตามขนาด (Cooling and Trimming)

แผ่นชิ้นไม้อัดที่ออกจากเครื่องอัดรีดจะนำตรวจสอบน้ำหนักแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องผึ่งให้เย็น (Star cooler) และทำการตัดริมและตัดแบ่งให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งขนาดมาตรฐานคือ 4×8 ft. หลังจากนั้นจะส่งเข้าเครื่องจัดกอง (Stacker)

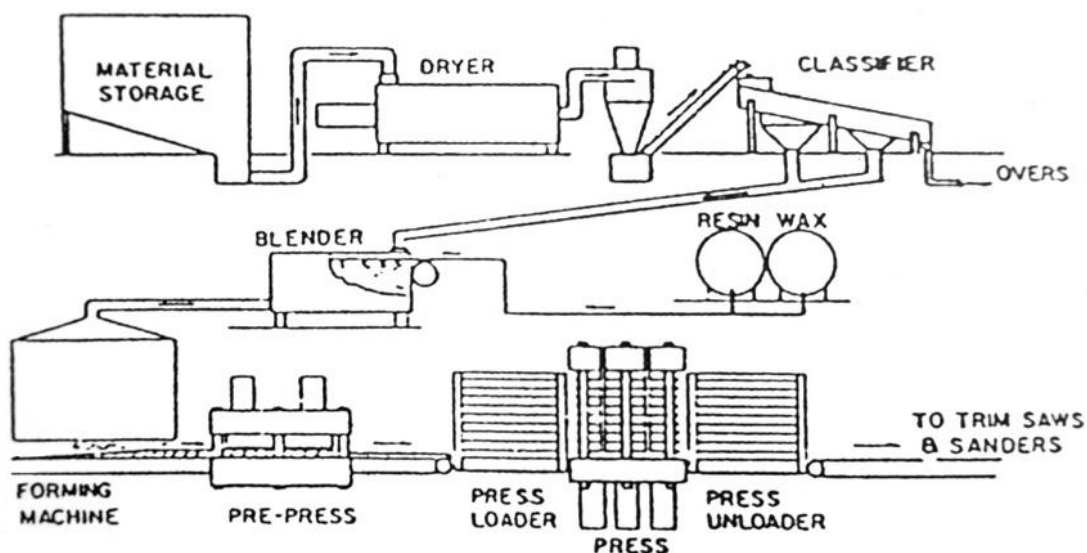
## 6.7 การปรับสภาพความชื้นและอุณหภูมิของแผ่น (Conditioning)

แผ่นชิ้นไม้ที่ออกจากเครื่องจัดกองจะถูกขนย้ายไปเก็บในโรงเก็บประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อให้ความชื้นและอุณหภูมิภายในแผ่นกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นก่อนนำไปขัดผิว

## 6.8 การขัดผิวและคัดเกรด (Finishing)

แผ่นชิ้นไม้อัดที่ปรับสภาพความชื้นและอุณหภูมิแล้วจะถูกนำไปขัดผิวทั้ง 2 หน้า ด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายชนิดหน้ากว้าง (Wide-belt sanders) การขัดผิวชิ้นไม้อัดเพื่อให้ผิว

เรียบและมีความหนาของแผ่นที่สม่ำเสมอ นอกจากนั้นการขัดจะเป็นการเอาส่วนผิวที่ยุบเนื่องจากการ Pre-cure อีกด้วย จากนั้นแผ่นชิ้นไม้อัดจะถูกตรวจสอบเพื่อคัดเกรดและจะถูกย้ายไปเก็บไว้ในคลังสินค้าต่อไป



**Figure 35.** Process flow diagram for the commercial manufacturing of wood composite panel.

Source: Maloney, T. M. (1977)

### วัตถุประสงค์ (Objectives)

1. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมประสานที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อย
2. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคขี้เลื่อยที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อย
3. ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อย
4. ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการสู่กระบวนการเตรียมผลิตทางการค้า

## บทที่ 2

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

#### 1. วัสดุอุปกรณ์ (Materials)

##### 1.1 วัตถุดิบ (Raw material)

ขี้เลื่อย (Sawdust) ที่ใช้ในการวิจัย (Figure 36) เป็นขี้เลื่อยไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากระบวนการผลิตของเล่นจากไม้ยางพาราจากของบริษัทกรณีศึกษา



**Figure 36.** Rubber wood sawdust from wood toys production process.

##### 1.2 สารเคมี (Chemical reagents)

###### 1.2.1 สารเชื่อมประสาน (Adhesives)

4 พอลิเมอร์ิก ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) ของบริษัท ฮันท์แมน (ประเทศไทย) จำกัด

4 ฟีนอล ฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde, PF) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สยาม เคมีคอล อินดัสทรี จำกัด

4 เมลามีน-ยูเรีย ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine-urea formaldehyde, MUF) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท อีเทอนัล เรซิ่น จำกัด

## 1.2.2 สารเติมแต่ง (Additives)

4 Melamine molding compound powder (ME 5669) ชื่อย่อ MEL ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยเอ็มเอฟซี จำกัด (ภาคผนวก)

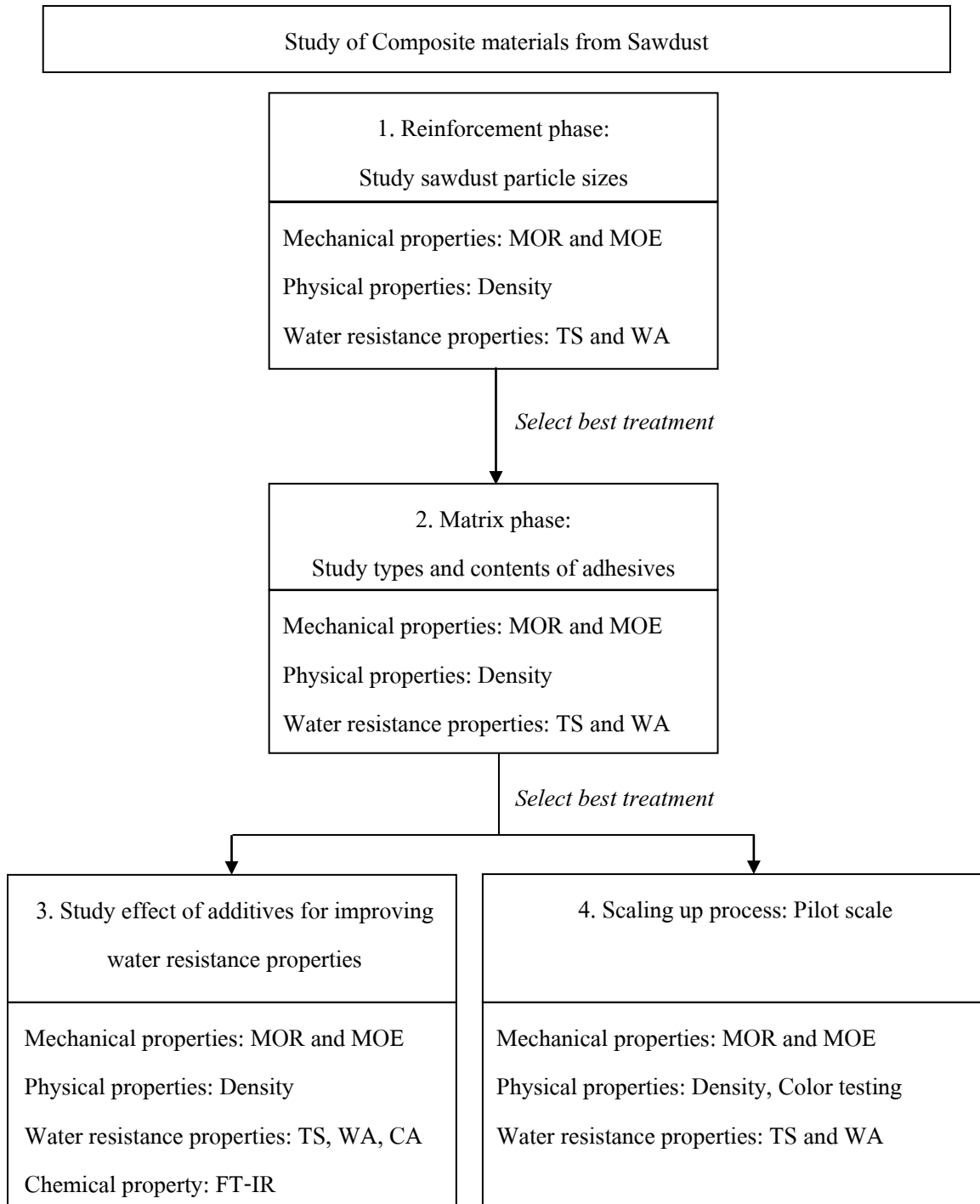
4 Low Density Polyethylene powder ชื่อย่อ PE ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ทีพีโอโพลีน จำกัด (ภาคผนวก)

**Table12.** List of equipments used.

No.	Equipments	Model	Company/Country
1.	CIE colorimeter	Color Flex	HunterLab Reston, Virginia, USA
2.	Compression molding	HP-40T No.0760	บริษัท ช.ช่าง จำกัด, Thailand
3.	Contact angle meter	200 Standard	Ramé-hart, USA
4.	Environmental chamber	KBF 115	WTB Binder, Tuttlingen, Germany
5.	Electronic digital caliper	-	KOVET, Thailand
6.	Electronic balance (2 decimals)	PG 5002	Mettler Toledo, Switzerland
7.	Electronic balance (4 decimals)	BP 210S	Sartorius, Goettingen, Germany
8.	Fourier transform infrared spectrometer	Equinox 55	Bruker Co., Ettlingen, Germany
9.	Infrared Thermometer	561	Fluke, USA
10.	Mixing tank	-	-
11.	pH meter	pH/Ion 510	Eutech Instruments Ltd., Singapore
12.	Scanning electron microscope	Quanta 400	FEI, Netherland
13.	Sputter coater	SPI-Module	PA, USA
14.	Universal testing machine	LR 30 K	LLOYD Instruments Ltd., Hampshire, UK
15.	Viscometer	LVT	Brookfield viscometer, Middleboro, USA

## 1. วิธีดำเนินการ (Methods)

สำหรับการวิจัยประกอบด้วย 4 การทดลองหลัก



**Figure 37.** Flow chart of overall research.

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคไม้เลื่อยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

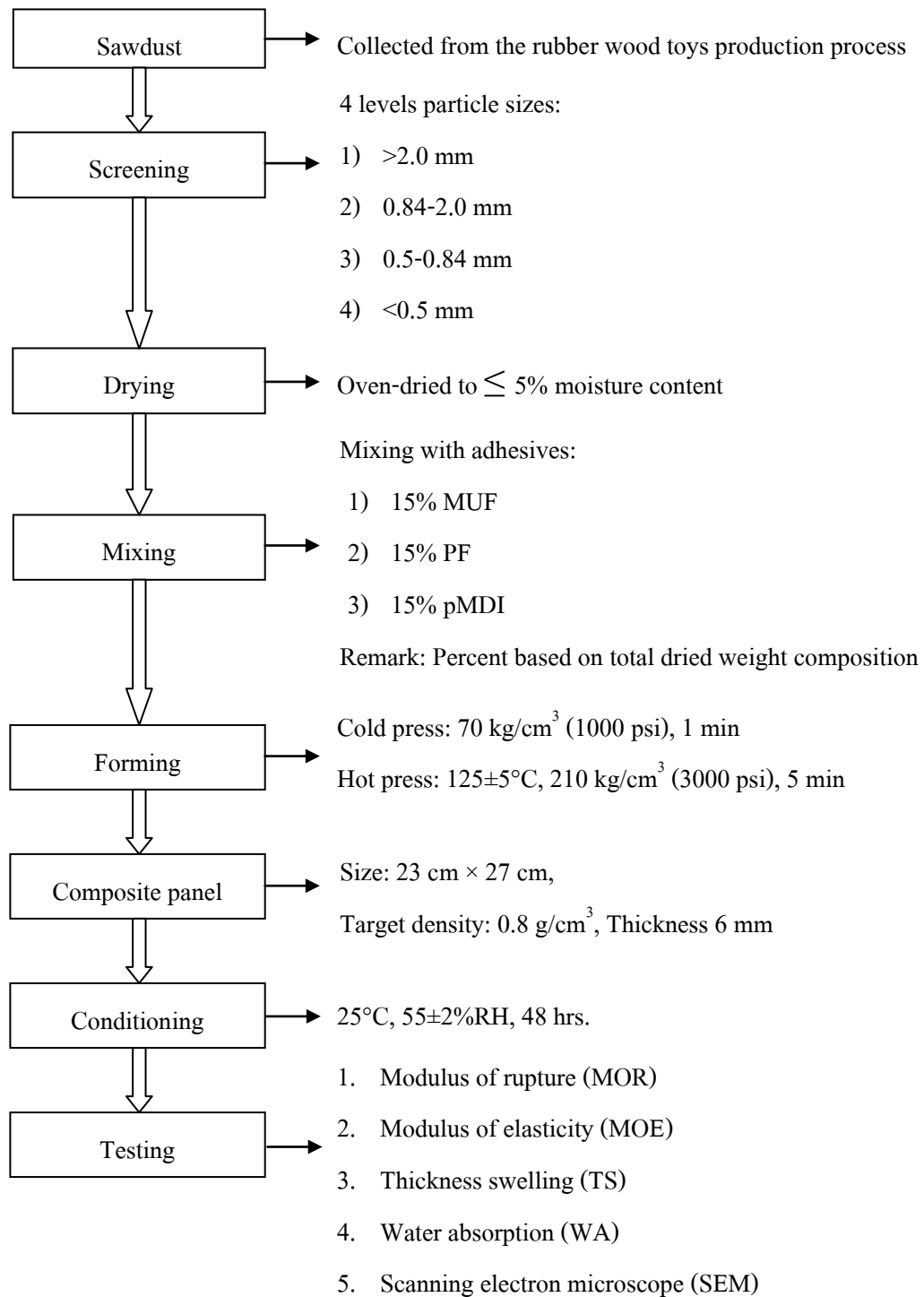


Figure 38. Flow process chart of Part 1.

## 1. การศึกษาส่วนผสมเบื้องต้น

### 1.1 จี๊ลี่

ทำการร่อนแยกขนาดจี๊ลี่ เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจี๊ลี่ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีตาม ASTM E828-81

### 1.2 สารเชื่อมประสาน

#### 1.2.1 การทดสอบความหนืด (Viscosity) (ASTM D2196-1981)

วิเคราะห์ความหนืดของสารเชื่อมประสานแต่ละชนิดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer LVT โดยใช้ Spindle No.2 และความเร็วรอบ 60 rpm ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  คำนวณความหนืด

$$\text{สูตร } \text{Viscosity (cps)} = F \times S$$

เมื่อ F = ค่าคงที่ (Scale factor) ของ Spindle และความเร็วรอบที่ใช้ (ภาคผนวก)

S = ค่าตัวเลขที่อ่านได้บนหน้าปัดเครื่องวัดความหนืด

#### 1.2.2 การวัดค่า pH

วัดค่า pH ของสารเชื่อมประสานด้วย pH indicator strip non bleeding ช่วงการทดสอบ pH 0-14 ยี่ห้อ Merck (Germany) รุ่น ColorpHast<sup>®</sup>

#### 1.2.3 การหาค่า Solid content (ASTM D1490-1993)

ชั่งน้ำหนัก Moisture can เพื่อหา % Solid content แล้วบันทึกเป็นค่า  $W_1$  ใส่สารตัวอย่างลงใน Moisture can ประมาณ 1-1.5 กรัม แล้วบันทึกเป็นค่า  $W_2$  อบด้วย Hot air oven ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$  ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำจนน้ำหนักคงที่ ค่าน้ำหนักที่ได้เป็น  $W_3$  และคำนวณ % Solid content จากสูตร

$$\text{Solid content (\%)} = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} \Delta 100$$

#### 1.2.4 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) (ASTM D891-1989)

วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารเชื่อมประสานแต่ละชนิดด้วย Hydrometer ที่อุณหภูมิ  $30 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$

#### 1.2.5 การหาค่า Gelation time (Kim และคณะ, 2008)

Gelation Time เป็นเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสารเชื่อมประสานเกิดเป็นเจลที่ไม่สามารถไหลได้ โดยการกวนสารเชื่อมประสานตัวอย่างปริมาณ 1 ml ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วย Water bath

## 2. การเตรียมวัสดุดิบ

2.1 การเตรียมขี้เลื่อยจากโรงงานแปรรูปของเล่นจากไม้ยางพารา

2.1.1 วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของขี้เลื่อยเริ่มต้น

2.1.2 คัดแยกขนาดผงขี้เลื่อยจากกระบวนการผลิตของเด็กเล่น จากกรณีศึกษาโดยนำขี้เลื่อยมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh (รูเปิดขนาด 2.00 mm), 20 mesh (รูเปิดขนาด 0.85 mm) และ 35 mesh (รูเปิดขนาด 0.50 mm) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ขี้เลื่อย 4 ขนาด ดังนี้

- (1) ขี้เลื่อยขนาดใหญ่กว่า 2.00 mm
- (2) ขี้เลื่อยขนาด 0.84-2.00 mm
- (3) ขี้เลื่อยขนาด 0.50-0.84 mm
- (4) ขี้เลื่อยขนาดเล็กกว่า 0.50 mm

2.1.3 นำขี้เลื่อยไปอบด้วยตู้อบลมร้อนให้มีความชื้นไม่เกิน 5% ก่อนใช้ในการผลิตเพื่อลดผลกระทบซึ่งเกิดจากความชื้น (วรรณม อุ๋นจิตติชัย และคณะ, 2550)

## 3. การผสม (Mixing)

3.1 สารเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ใช้กาว 3 ชนิด ได้แก่ กาวเมลามีน-ยูเรีย ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine-urea formaldehyde; MUF), กาวฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde; PF) และกาวพอลิเมอร์ไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Polymeric diphenyl diisocyanate; pMDI) ปริมาณ 15% wt (15 g of solid resin/100 g of dry sawdust particles)

**Table 13.** Calculated composite materials mixture of part 1.

Adhesive types	Adhesives Content (%wt)	Weight of solid resin (g)	Solid content (%)	Weight of liquid resin (g)	Weight of dry sawdust particles (g)	Total weight (g)
MUF	15	44.71	62.67	61.40	253.37	314.77
PF	15	44.71	41.45	70.89	253.37	324.26
pMDI	15	44.71	100	44.71	253.37	298.08

**Remark:** ความหนาแน่น = 0.8 g/cm<sup>3</sup>  
 ขนาดกว้าง×ยาว = 23×27 cm<sup>2</sup>  
 ความหนา = 0.6 cm  
 น้ำหนักแห้งของวัสดุทั้งหมดต่อแผ่น = 298.08 g



### 3.2 วิธีการผสม (คัดแปลงจาก วรรณกรรม อุ๋นจิตติชัยและคณะ, 2550)

3.2.1 ใส่ซีลี้อยลงในถังผสมหลังจากนั้นเปิดสวิตซ์ถังผสม

3.2.2 นำกาวที่ซึ่งน้ำหนักตามอัตราส่วนใส่ลงในกระบอกสเปรย์กาว

3.2.3 พ่นกาวที่เตรียมไว้เป็นละอองฝอยผสมลงในซีลี้อยจนกาวที่ซึ่งน้ำหนักในกระบอก

หมด หลังจากนั้นผสมต่อไปอีก 2 นาที รวมเวลาในการผสมทั้งหมดประมาณ 15 นาที



**Figure 39.** Mixing process of composite materials in mixing tank.

## 4. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ (คัดแปลงจาก วรรณกรรม อุ๋นจิตติชัยและคณะ, 2550)

4.1 วิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่อง Compression molding

4.1.1 นำแผ่นสแตนเลส รองอัดวางลงบน โต๊ะและวางทับด้วยแผ่นเทปลอน

4.1.2 นำกรอบไม้สี่เหลี่ยมขนาด 23 cm × 27 cm มาวางทับบนแผ่นเทปลอน

4.1.3 โรยวัสดุให้ตกอย่างอิสระจนวัสดุที่เตรียมไว้หมด

4.1.4 ใช้แผ่นไม้กดลงบนชั้นวัสดุแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเย็น (Cold press) ด้วยความดัน 1,000 psi เป็นเวลา 1 นาที

4.1.5 นำเอากรอบไม้สำหรับอัดขึ้นรูปเย็นออก

4.1.6 นำเอาแท่งเหล็กสำหรับกำหนดความหนา วางลงบนแผ่นเหล็กรองแผ่นล่างโดยให้อยู่ด้านข้างซ้าย-ขวาของวัสดุ

4.1.7 นำเอาแผ่นเทปลอนอีกแผ่นมาวางด้านบน และวางทับด้วยแผ่นสแตนเลส

4.1.8 อัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิ  $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ความดัน 3,000 psi และเวลา 5 นาที

4.1.9 พักแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่ทำการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนย้ายไปควบคุมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์  $55\pm 5\%$  RH อุณหภูมิ  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

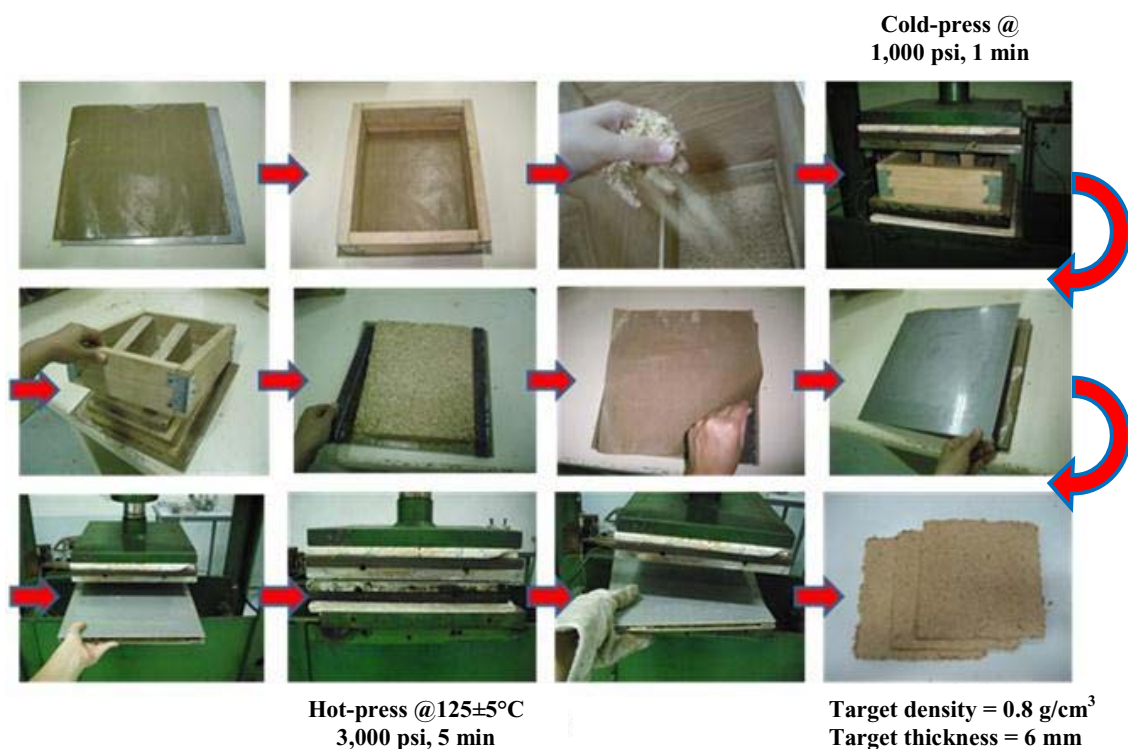


Figure 40. Forming process of composite materials panels.

## 5. การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

### 5.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

#### 5.1.1 ความหนาแน่น (Density)

(1) สุ่มตัวอย่างแผ่นขึ้นวัสดุเชิงประกอบ 3 ชิ้นจากตำแหน่งดัง Figure 41 โดยตัดขึ้นตัวอย่างทดสอบให้มีความยาว 76.2 mm (3 in) ความกว้าง 25.4 mm (1 in)

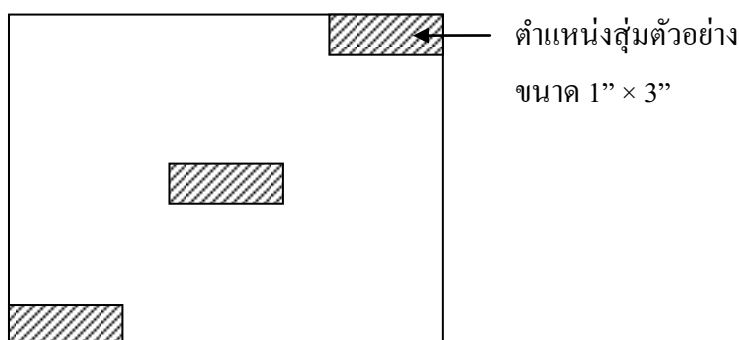
(2) ชั่งน้ำหนักขึ้นตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

(3) วัดความกว้าง ความยาว และความหนา โดยใช้เวอร์เนีย

(4) วัดความหนา 3 จุดบนตัวอย่างทดสอบ

(5) หาค่าเฉลี่ยคำนวณหาความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{Density (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Dried weight (g)}}{\text{Dried volume (cm}^3\text{)}}$$



**Figure 41.** Sampling positions for density testing of composite materials.

## 5.2 สมบัติการต้านทานน้ำ (Water resistance properties)

การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบทำการทดสอบด้วย ASTM D 570-98 โดยอ้างอิงตามการศึกษา Wu (2009), Adhikary และคณะ (2007) และ Tserki และคณะ (2006)

### 5.2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption, WA) (ดัดแปลงจาก ASTM D570)

- (1) ตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบให้มีความยาว 76.2 mm (3 in) ความกว้าง 25.4 mm (1 in)
- (2) ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบเริ่มต้น ( $w_0$ )
- (3) แช่ตัวอย่างทดสอบลงในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง
- (4) ชั่งน้ำหนักส่วนเกินด้วยผ้าหรือกระดาษ ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ( $w_t$ )

- (5) คำนวณค่าการดูดซับน้ำจากสูตร

$$\text{Water absorption, } \div WA \mid \frac{w_t - w_0}{w_0} \Delta 100$$

เมื่อ  $\Delta WA$  = Water absorption or weight gain, %

$w_t$  = Weight of wet specimen at t time, g.

$w_0$  = Weight of dry specimen, g.

### 5.2.2 การพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling, TS) (ดัดแปลงจาก ASTM D570)

- (1) ตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบให้มีความยาว 76.2 mm (3 in) ความกว้าง 25.4 mm (1 in)
- (2) วัดความหนาของตัวอย่างทดสอบเริ่มต้น ( $TS_0$ )
- (3) แช่ตัวอย่างทดสอบลงในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง
- (4) ชั่งน้ำหนักส่วนเกินด้วยผ้าหรือกระดาษ วัดความหนาของตัวอย่างที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ( $TS_t$ )

(5) คำนวณค่าการพองตัวของตัวอย่างตามความหนาหลังแช่น้ำจากสูตร

$$\text{Thickness swelling, } \div TS \mid \frac{TS_t - 4 TS_0}{TS_0} \Delta 100$$

เมื่อ  $\div TS$  = Thickness swelling, %

$TS_t$  = Thickness of wet sample at t time, mm.

$TS_0$  = Thickness of dry specimen, mm.

### 5.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบทำการทดสอบด้วย ASTM D 790 โดยอ้างตามการศึกษา Karmarkar และคณะ (2007), Sanadi และคณะ (1995)

5.3.1 ทดสอบมอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) (ASTM D 790)

(1) ตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาด 24 mm × 165 mm และกำหนดจุดกึ่งกลางบนตัวอย่างที่จะใช้เป็นจุดให้แรงกด

(2) ทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR30KN โดยวางบน Rider ให้ระยะระหว่าง Rider ทั้งสองตัวห่างกัน 96 มิลลิเมตร ทำการทดสอบแรงดัดโค้งโดยการกดด้วยความเร็วคงที่ 5 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการแตกหัก

(3) อ่านค่า Breaking load และบันทึกผล

(4) คำนวณค่า Modulus of rupture

$$MOR \mid \frac{3 \Delta P \Delta L}{2 \Delta b \Delta d^2}$$

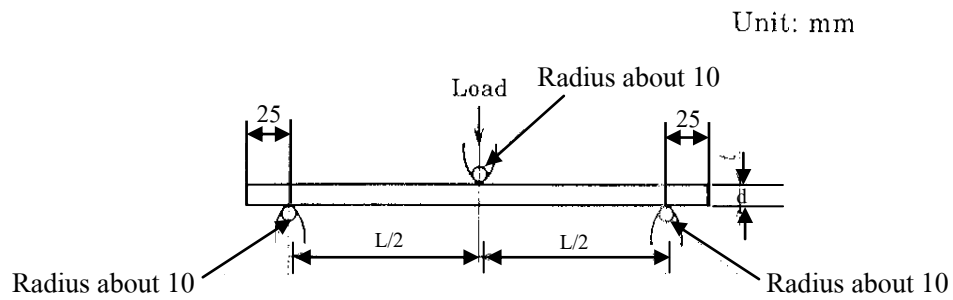
เมื่อ MOR = Modulus of rupture, N/mm<sup>3</sup>

P = Breaking load, N

L = Span length, mm

b = Width of testing specimen, mm

d = Height of testing specimen, mm

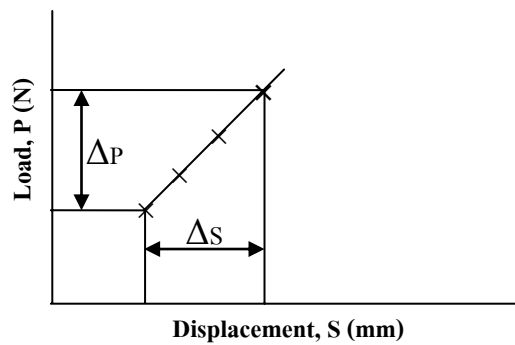


**Figure 42.** Three points bending testing.

(5) คำนวณค่า Modulus of elasticity

$$MOE = \frac{m \Delta L^3}{4 \Delta b \Delta d^3}$$

- เมื่อ MOE = Modulus of elasticity
- m = The gradient (i.e., slope) of the initial straight-line portion of the load deflection curve ( $\Delta P / \Delta S$ ) in Figure 43, (N/mm)
- L = Span length, mm
- b = Width of testing specimen, mm
- d = Height of testing specimen, mm



**Figure 43.** Relation of static load and deformation displacement.

5.4 ลักษณะทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

นำตัวอย่างชุดการทดลองที่ดีที่สุด ที่หักด้วยการทดสอบการดัดโค้ง มาทำการศึกษาด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (Quanta 400, FEI, Netherland) ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 kV ซึ่งทำการเคลือบผิววัสดุที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยทองคำก่อนการทดสอบ (Sputter coater SPI-Module, PA, USA)

## ตอนที่ 2 การศึกษาของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมประสาน

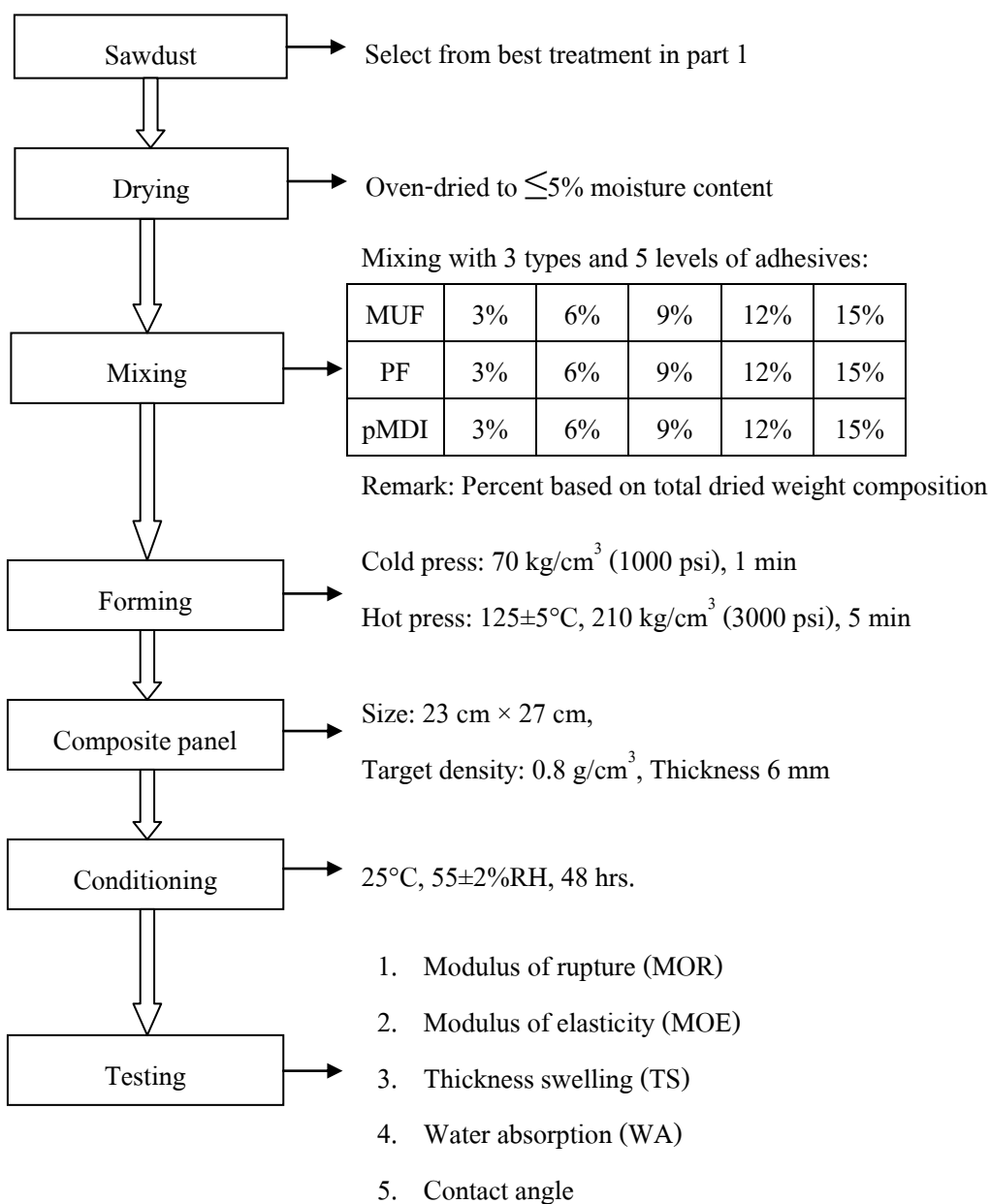


Figure 44. Flow process chart of Part 2.

### 1. การเตรียมวัสดุดิบ

1.1 คัดเลือกขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 โดยใช้ผลการทดสอบวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยที่มีสมบัติที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นไม้อัดชนิตรายความหนาแน่นปานกลาง (มอก. 876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312) และทำตามวิธีการเตรียมด้วยวิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 1

## 2. การผสม (Mixing)

2.1 สารเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบใช้กาว 3 ชนิด ได้แก่ กาวเมลามีน-ยูเรีย ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine-urea formaldehyde; MUF), กาวฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde; PF) และกาวพอลิเมอร์ไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต (Polymeric diphenyl diisocyanate; pMDI) ปริมาณ 3, 6, 9, 12 และ 15% wt (g of solid resin/100 g of dry sawdust particles)

Table 14. Calculated composite materials mixture of part 2.

Adhesive types	Adhesives Content (%wt)	Weight of solid resin (g)	Solid content (%)	Weight of liquid resin (g)	Weight of dried sawdust particles (g)	Total weight (g)
MUF	3	8.94	62.67	12.28	289.14	301.42
	6	17.88	62.67	24.56	280.20	304.76
	9	26.83	62.67	36.84	271.25	308.09
	12	35.77	62.67	49.12	262.31	311.43
	15	44.71	62.67	61.40	253.37	314.77
PF	3	8.94	41.45	14.18	289.14	303.32
	6	17.88	41.45	28.36	280.20	308.55
	9	26.83	41.45	42.53	271.25	313.79
	12	35.77	41.45	56.71	262.31	319.02
	15	44.71	41.45	70.89	253.37	324.26
pMDI	3	8.94	100	8.94	289.14	298.08
	6	17.88	100	17.88	280.20	298.08
	9	26.83	100	26.83	271.25	298.08
	12	35.77	100	35.77	262.31	298.08
	15	44.71	100	44.71	253.37	298.08

Remark: ความหนาแน่น = 0.8 g/cm<sup>3</sup>

ขนาดกว้าง×ยาว = 23×27 cm<sup>2</sup>

ความหนา = 0.6 cm

น้ำหนักแห้งของวัสดุทั้งหมดต่อแผ่น = 298.08 g

2.2 วิธีการผสม (วิธีเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 3.2)



### 3. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 4)

#### 4. การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

##### 4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.1)

###### 4.1.1 ความหนาแน่น (Density)

##### 4.2 สมบัติการต้านทานน้ำ (Water resistance properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.2)

###### 4.2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

###### 4.2.2 การพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling)

##### 4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.3)

4.3.1 ทดสอบมอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

##### 4.4 การทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact angle testing)

นำชุดการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เป็นชุดการทดลองควบคุมในการทดลองต่อไปในตอนที่ 4 มาทำการทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ โดยใช้ปริมาตรของหยดน้ำเท่ากับ 5  $\mu$ l และใช้เครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำในการทดสอบ (Contact angle meter, Model 200 Standard, Ramé-hart, USA)

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

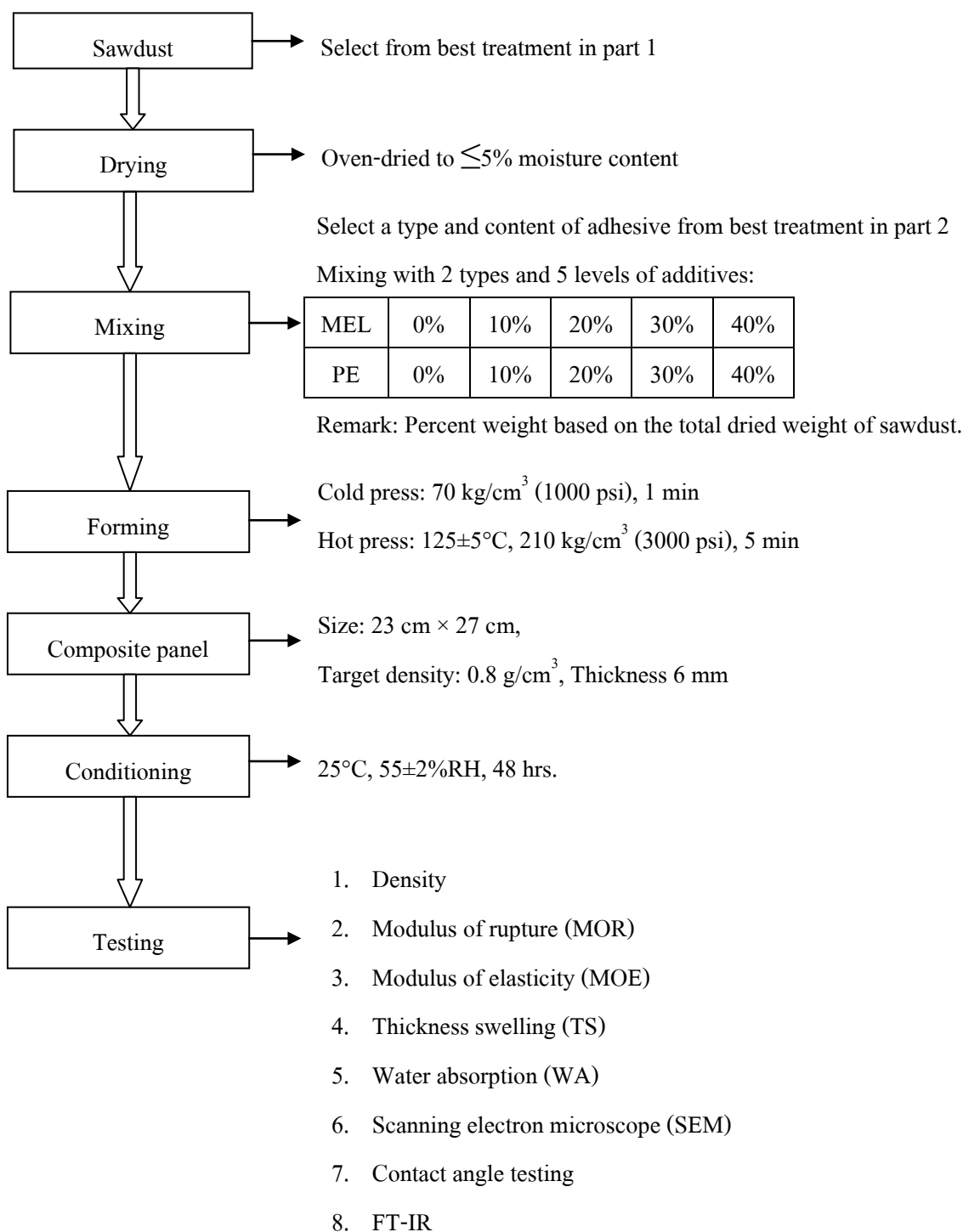


Figure 45. Flow process chart of Part 3.

## 1. การเตรียมวัตถุดิบ

คัดเลือกขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 โดยใช้ผลการทดสอบวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยที่มีสมบัติที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นไม้อัดชนิรควบคุมความหนาแน่นปานกลาง (มอก. 876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312)

## 2. การผสม (Mixing)

2.1 คัดเลือกชนิดและปริมาณของสารเชื่อมประสานที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นไม้อัดชนิรควบคุมความหนาแน่นปานกลาง (มอก. 876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312) จากตอนที่ 2

2.2 ทำการเติมสารเติมแต่งลงในส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ ผงเมลามีนเรซิน และผงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40% wt (based on dried-sawdust particle)

2.3 วิธีการผสม (วิธีเดียวกับตอนที่ 2 ข้อ 2)

## 3. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 2 ข้อ 3)

## 4. การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.1)

4.1.1 ความหนาแน่น (Density)

4.2 สมบัติการต้านทานน้ำ (Water resistance properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.2)

4.2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

4.2.2 การพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling)

4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.3)

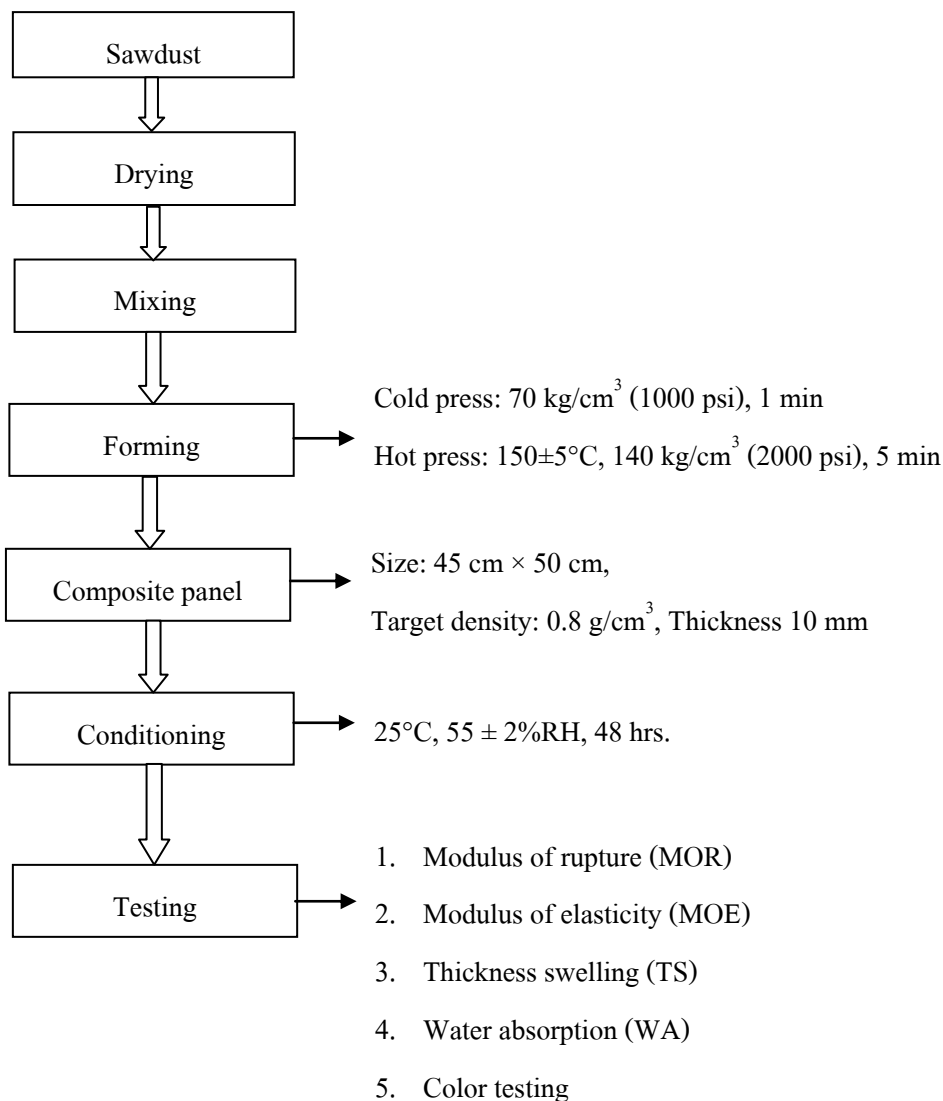
4.3.1 ทดสอบมอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

4.4 การทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact angle testing) (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 2 ข้อ 4.4)

4.5 การทดสอบทางจุลภาคด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (วิธีเดียวกันกับตอนที่ 1 ข้อ 5.4)

4.6 ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารเติมแต่งด้วยเทคนิค FT-IR โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscope (Bruker, model Equinox 55, Germany)

**ตอนที่ 4** การขยายขนาดการผลิตสู่กระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า

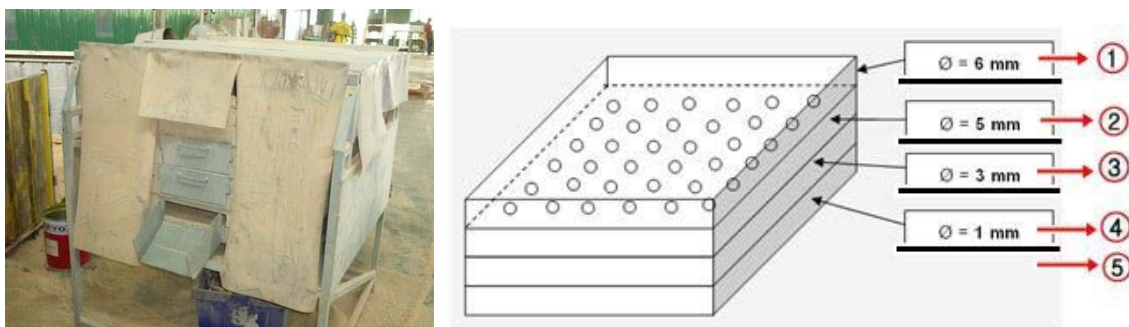


**Figure 46.** Flow process chart of Part 4.

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 นำขี้เลื่อยที่ใช้จริงในกระบวนการผลิตในโรงงาน เพื่อใช้ในการเตรียมส่วนผสมสำหรับผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ เปรียบเทียบผลการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ ทำการร่อนขี้เลื่อยด้วยเครื่องร่อนที่ใช้ในการผลิตเชิงการค้า ซึ่งเครื่องร่อนที่โรงงานเป็นเครื่องร่อนที่ประดิษฐ์เพื่อใช้ในโรงงาน

โดยมีทิศทางการร่อนไปทางแนวนอนจะมีลักษณะดัง Figure 47 ซึ่งประกอบด้วยตะแกรง 4 ชั้น โดยที่ตะแกรงจะมีรูเปิดขนาด 6, 5, 3 และ 1 mm ตามลำดับ เมื่อทำการร่อนผ่านเครื่องร่อนแล้วจะได้อนุภาคซีลี้อยู่ 5 ขนาด ได้แก่ (1)  $> 6$  mm, (2) 5 – 6 mm, (3) 3 – 5 mm, (4) 1 – 3 mm และ (5)  $< 1$  mm



**Figure 47.** Sawdust particles sorter.

เพื่อให้ได้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอเท่ากันทุกครั้งที่ในการผลิต จะทำการผสมซีลี้อยู่หลังจากการร่อน โดยแบ่งออกเป็นการทดลองมี 2 ชุดการทดลอง ได้แก่

4 ชุดการทดลองที่ 1: ซีลี้อยู่ผสมขนาด 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm อัตราส่วน 1: 1

4 ชุดการทดลองที่ 2: ซีลี้อยู่ผสมขนาด 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ  $< 1$  mm

อัตราส่วน 1: 1: 2

ซึ่งสาเหตุที่แบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุด เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตอนที่ 1 พบว่าหากใช้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบต่ำลง และหากใช้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะทำให้สมบัติการต้านทานน้ำต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองในตอนที่ 1 จะเป็นการเลือกใช้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคเดียว จึงเป็นที่น่าสนใจว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีลี้อยู่ที่ขนาดอนุภาคผสมอาจจะมีสมบัติที่แตกต่างไปจากที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

**หมายเหตุ:** ในการทดลองจะไม่ได้ใช้ซีลี้อยู่ขนาด  $> 6$  mm และ 5 – 6 mm เนื่องจากการใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น

1.2 ทำการร่อนแยกขนาดซีลี้อยู่เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซีลี้อยู่ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีตาม ASTM E828-81

1.3 อบเพื่อลดความชื้นในห้องอบของบริษัทกรณีศึกษา ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดัง

Figure 48

#### 1.4 สุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นของวัสดุที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ



Figure 48. Sawdust drying in temperature control room.

## 2. การผสม (Mixing)

2.1 เลือกชนิดของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการตอนที่ 2 โดยใช้ปริมาณที่ให้ผลการทดสอบดีที่สุด และปริมาณที่มีความเหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการทดลองหาปริมาณของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมแก่การผลิตในอุตสาหกรรม

2.2 วิธีการผสม ทำการผสมดังวิธีการในตอนที่ 2 ข้อ 2

## 3. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในกระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า

3.1 นำสารเชื่อมประสานที่เลือกจากตอนที่ 2 มาใช้ในการ

3.2 วิธีการผสม

3.2.1 ใส่ขี้เลื่อยลงในถังผสมหลังจากนั้นเปิดสวิตช์ถังผสม

3.2.2 นำกาวที่ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนใส่ลงในกระบอกลอยแก้ว

3.2.3 ฟันกาวที่เตรียมไว้เป็นละอองฝอยผสมลงในขี้เลื่อยจนกาวที่ชั่งน้ำหนักในกระบอกลอยแก้ว หลังจากนั้นผสมต่อไปอีก 2 นาที รวมเวลาในการผสมทั้งหมดประมาณ 15 นาที



**Figure 49.** Mixing process of composite materials in pilot scale: (A) Inside mixing tank and (B) Outside mixing tank.

#### 4. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

##### 4.1 วิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่อง Compression molding

4.1.1 นำแผ่นสแตนเลส รองอัดวางลงบน โต๊ะและวางทับด้วยแผ่นเทปลอน

4.1.2 นำกรอบไม้สี่เหลี่ยมขนาด 45 cm × 50 cm มาวางทับบนแผ่นเทปลอน

4.1.3 โรยวัสดุที่เตรียมไว้ให้หมด

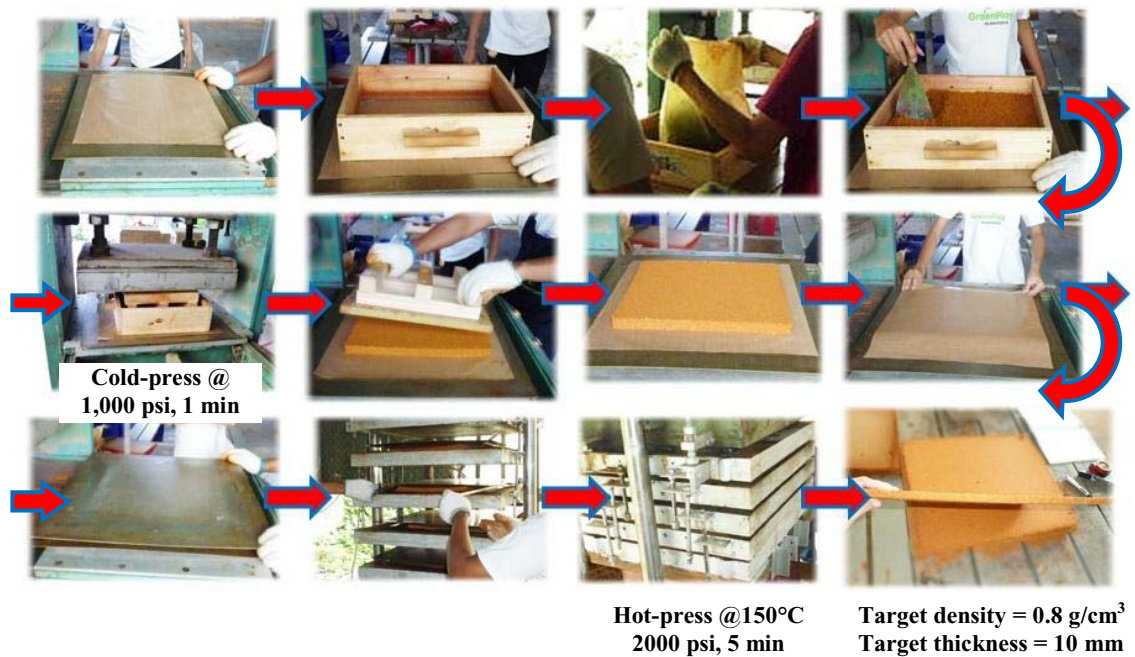
4.1.4 ใช้แผ่น ไม้กดลงบนชั้นวัสดุแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเย็น (Cold press) ด้วยความดัน 1,000 psi เป็นเวลา 1 นาที

4.1.5 นำเอากรอบไม้สำหรับอัดขึ้นรูปเย็นออก

4.1.6 นำเอาแท่งเหล็กสำหรับกำหนดความหนา วางลงบนแผ่นเหล็กรองแผ่นล่างโดยให้อยู่ด้านข้างซ้าย-ขวาของวัสดุ

4.1.7 นำเอาแผ่นเทปลอนอีกแผ่นมาวางด้านบน และวางทับด้วยแผ่นสแตนเลส

4.1.8 อัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิ  $150 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ความดัน 2,000 psi และเวลา 5 นาที



**Figure 50.** Forming process of composite materials panels in pilot scale.

## 5. การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

5.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) (วิธีเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 5.1)

5.1.1 ความหนาแน่น (Density)

5.2 สมบัติการต้านทานน้ำ (Water resistance properties) (วิธีเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 5.2)

5.2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

5.2.2 การพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling)

5.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) (วิธีเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 5.3)

5.3.1 ทดสอบมอดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

5.4 การทดสอบความแตกต่างของสีด้วยเครื่อง CIE colorimeter (Color Flex, HunterLab Reston, Virginia, USA)

5.5 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชิงการค้า



### การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองทั้ง 4 ตอน ใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) จัดชุดการทดลองแบบแฟคทอเรียล วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 15.0 for windows ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง โดยใช้ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### บทที่ 3

#### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### ตอนที่ 1 ผลของขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

###### 1.1 การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบเบื้องต้น

จาก Figure 51 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะของขี้เลื่อยด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) พบว่าขี้เลื่อยที่ใช้ในการวิจัยมีลักษณะบาง มีความเป็นรูพรุนสูงและมีผิวขรุขระ และเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคขี้เลื่อยด้วยการร่อนผ่านตะแกรงที่มีรูเปิด 10, 20 และ 35 mesh (ASTM E828-81) ได้ผลดัง Table 15 ซึ่งแสดงปริมาณการกระจายตัวของอนุภาคขี้เลื่อยที่ได้จากกระบวนการผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพาราและนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ พบว่าขนาดของอนุภาคขี้เลื่อยที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีขนาดอนุภาคที่ 0.84-2.00 mm มากที่สุด (38.2%) รองลงมาคือขนาด > 2.0 mm (28.8%), 0.50-0.84 mm (21.7%) และขี้เลื่อยขนาด <0.50 mm (11.3%) ตามลำดับ

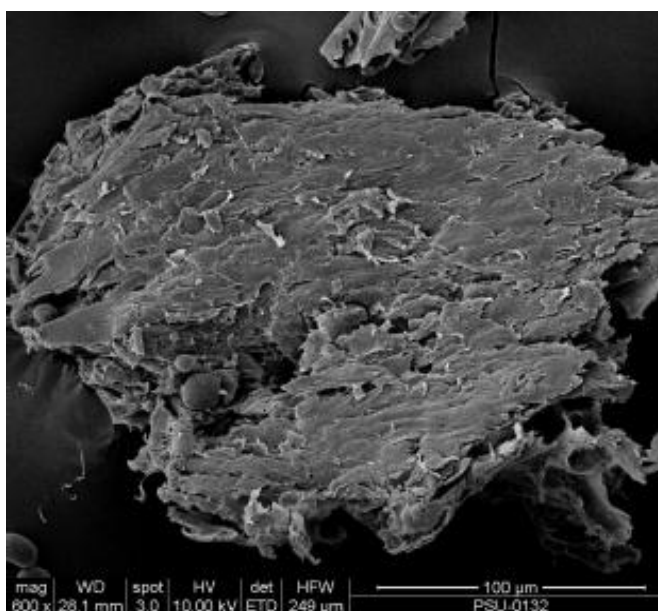


Figure 51. SEM of sawdust particle.

**Table 15.** Size distribution of sawdust collected from wood toys production process.

Particle size (mm)	Sieve (mesh)	Percent by weight
> 2.00 mm	Upper 10 mesh	28.8%
0.84-2.00 mm	10-20 mesh	38.2%
0.50-0.84 mm	20-35 mesh	21.7%
<0.50 mm	Under 35 to pan mesh	11.3%

การทดลองเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยโดยใช้ขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 4 ระดับ (>2.00, 0.84-2.00, 0.50-0.84 และ <0.50 mm) ซึ่งเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ตาม มอก.876-2547 และ EN 312 (Table 17) ได้แก่ ความหนาแน่น (Density), โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture; MOR), ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE), ค่าการพองตัวตามความหนา (Thickness swelling, TS) และ ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption, WA)

สารเชื่อมประสานที่ใช้ในการวิจัยมี 3 ชนิด ได้แก่ เมลามีน-ยูเรีย ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine-urea formaldehyde) ชื่อย่อ MUF, ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) ชื่อย่อ PF และพอลิเมอร์ิก ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate) ชื่อย่อ pMDI ซึ่งมีผลการวิเคราะห์คุณลักษณะดัง Table 16

**Table 16.** The characteristics of adhesives.

Item	Unit	MUF	PF	pMDI
Appearance	-	Milky white liquid	Reddish brown liquid	Dark brown liquid
Viscosity (25°C)	cps.	112	186	253
Solid content	%	62.67	41.45	100
pH	-	10	11	8
Gel time	sec.	80	83	76
Specific gravity	-	1.271	1.155	1.364
Type	-	-	Resole	-

**Table 17.** Standards of composite materials (medium density particle board) panels under TIS 876-2004 and EN 312 standards.

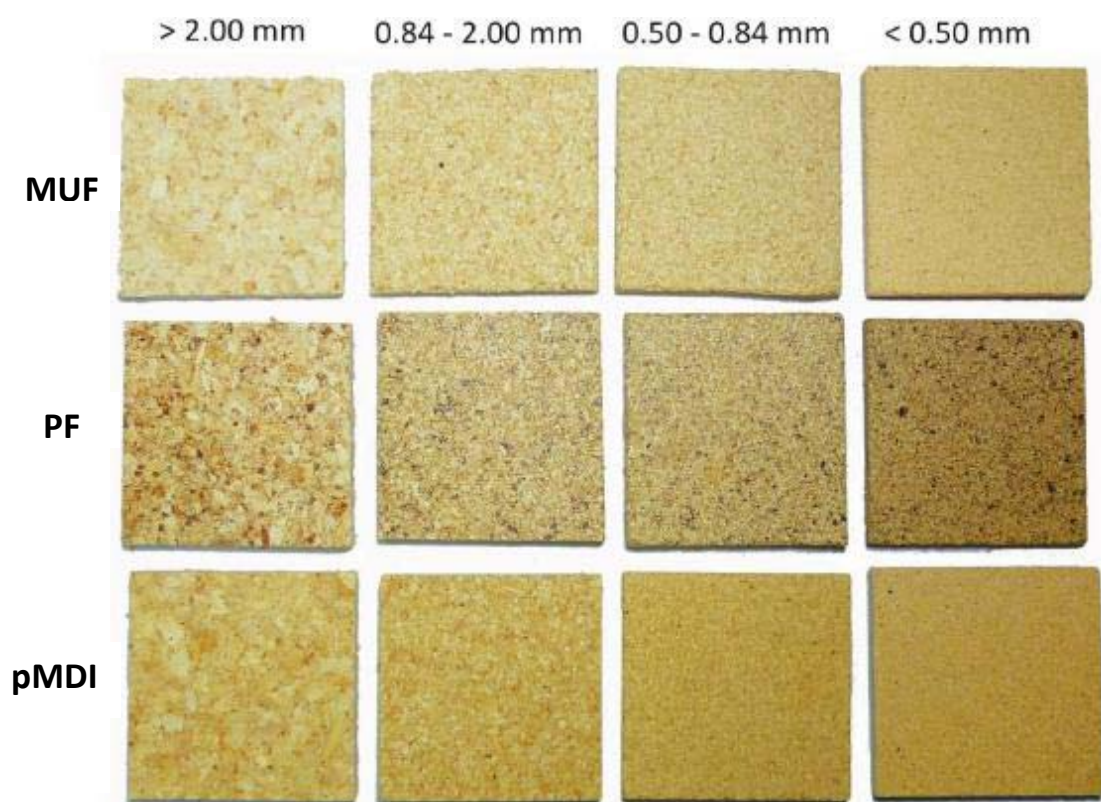
No.	Items	Unit	TIS 876-2004	EN-312
1.	Density	g/cm <sup>3</sup>	0.4-0.9	-
2.	Modulus of rupture (MOR) *	N/mm <sup>2</sup>	14	13
3.	Modulus of elasticity (MOE) *	N/mm <sup>2</sup>	1800	1600
4.	Thickness swelling at 2 hours **	%	12	8
5.	Thickness swelling at 24 hours **	%	-	15

**Remark:** \* is minimum requirement of standards

\*\* is maximum requirement of standards

**Source:** TIS 876-2004; EN 312

### 1.2 ผลของขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่มีต่อลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบ



**Figure 52.** The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various particle sizes.

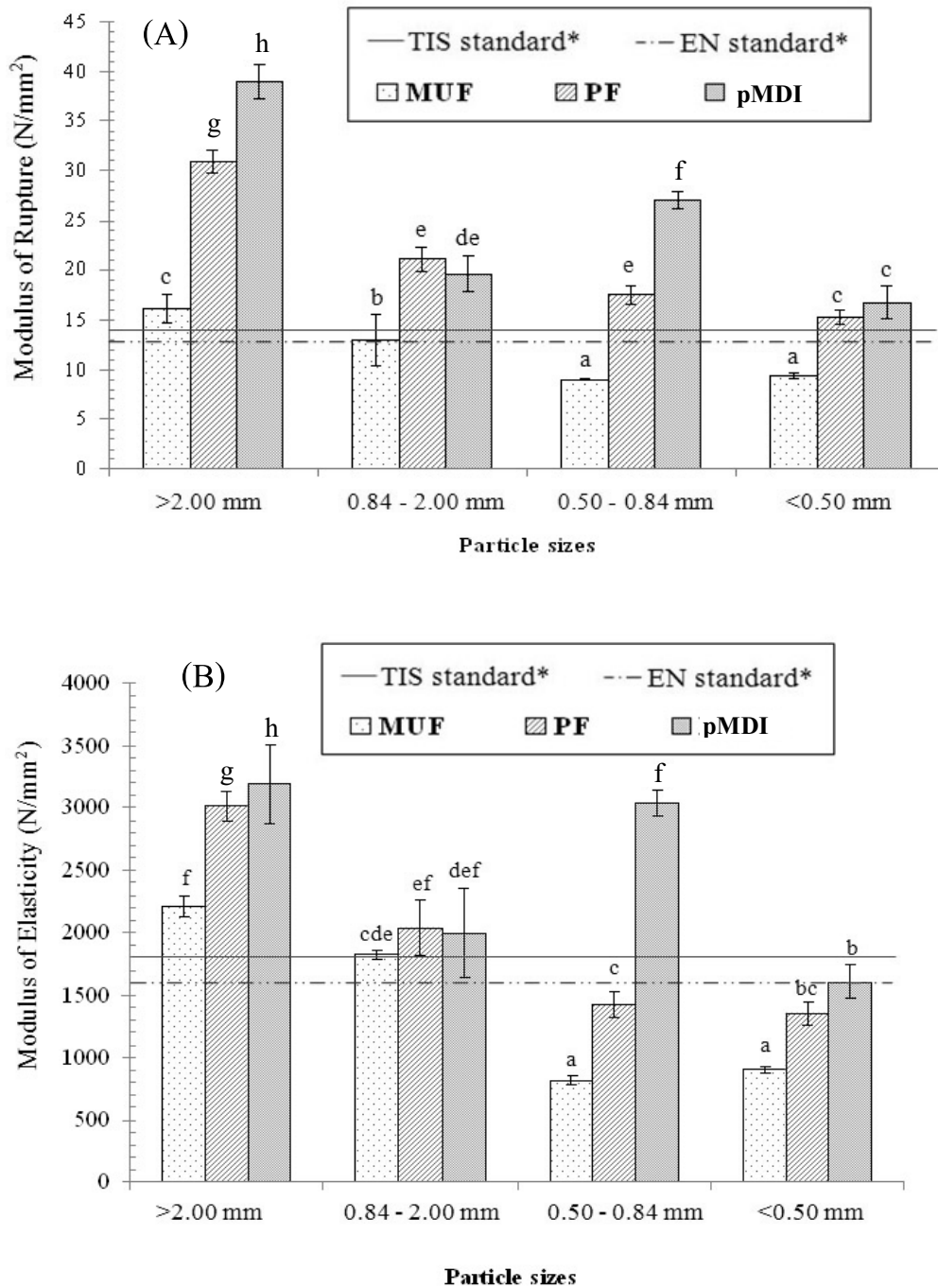
จาก Figure 52 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่ที่เตรียมจากซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ได้แก่  $>2.00$  mm,  $0.84-2.00$  mm,  $0.50-0.84$  และ  $<0.50$  mm ตามลำดับ โดยใช้สารเชื่อมประสาน 3 ชนิด ปริมาณ 15% จากการสังเกตพบว่าตัวอย่างทั้งหมด มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก การกระจายตัวของส่วนผสมสม่ำเสมอ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI และ MUF จะมีสีสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน แต่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว PF จะมีสีเข้มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่กาว pMDI และ MUF เป็นสารเชื่อมประสาน

### 1.3 ผลของขนาดอนุภาคของซีลี้อยู่ที่มีต่อความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ

จาก Table 18 แสดงสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 4 ระดับ จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยู่ที่ทำการทดลอง มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $0.76-0.80$  g/cm<sup>3</sup> ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 876-2547

### 1.4 ผลของขนาดอนุภาคของซีลี้อยู่ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

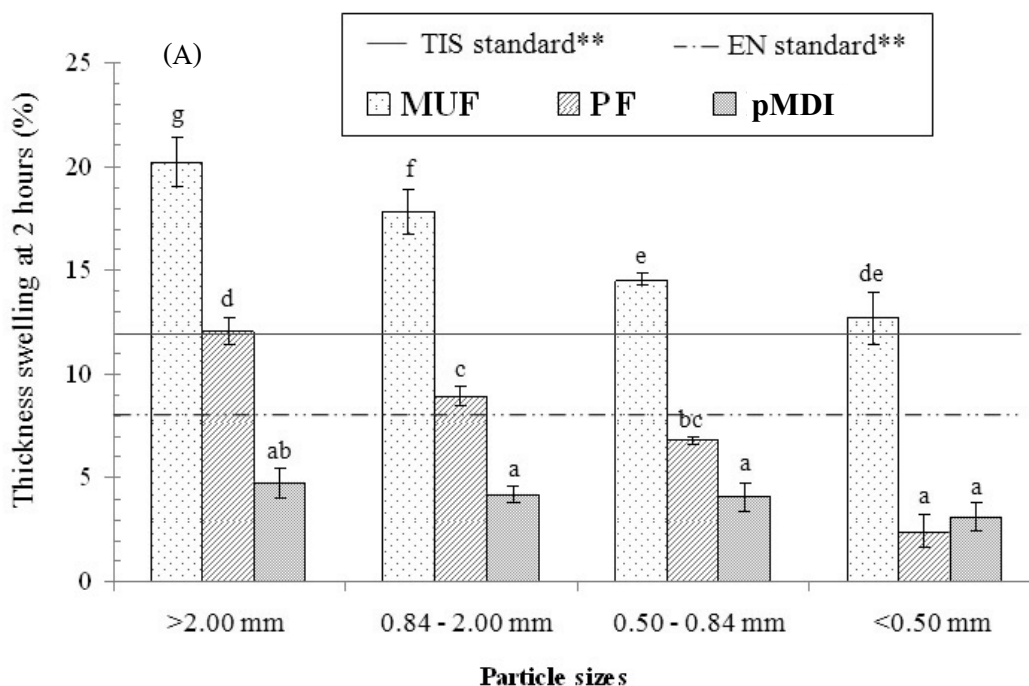
สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบสามารถวัดได้จากค่ามอดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) ดัง Figure 53 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาค  $>2.0$  mm ร่วมกับสารเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ร่วมกับการใช้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาค  $>2.0$  mm มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด โดยสามารถสังเกตได้จากค่า MOR และค่า MOE เท่ากับ  $38.93$  N/mm<sup>2</sup> และ  $3,190$  N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่ที่มีลักษณะของอนุภาคที่บางและยาว จะสามารถให้ความแข็งแรงสูงเนื่องจากลักษณะดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการซ้อนทับ (Overlapping) อย่างเป็นระเบียบและเกิดการประสานตัวระหว่างอนุภาค (Interlocking) ได้ดี แผ่นมีช่องว่างน้อยลงจึงสามารถกระจายแรงที่เกิดจากแรงคัดได้สม่ำเสมอมากกว่าซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและสั้น (วรรณกรรม อุ๋นจิตติชัย, 2541; Pan *et al.*, 2007) อีกทั้งซีลี้อยู่ที่ขนาดอนุภาคเล็กมีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (Agglomeration) ได้มากกว่าซีลี้อยู่ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคภายในวัสดุเชิงประกอบสามารถเกิด Micro-crack ได้มากขึ้นทำให้เป็นจุดที่ง่ายต่อการแตกหักได้ (Godfrey, 2008)

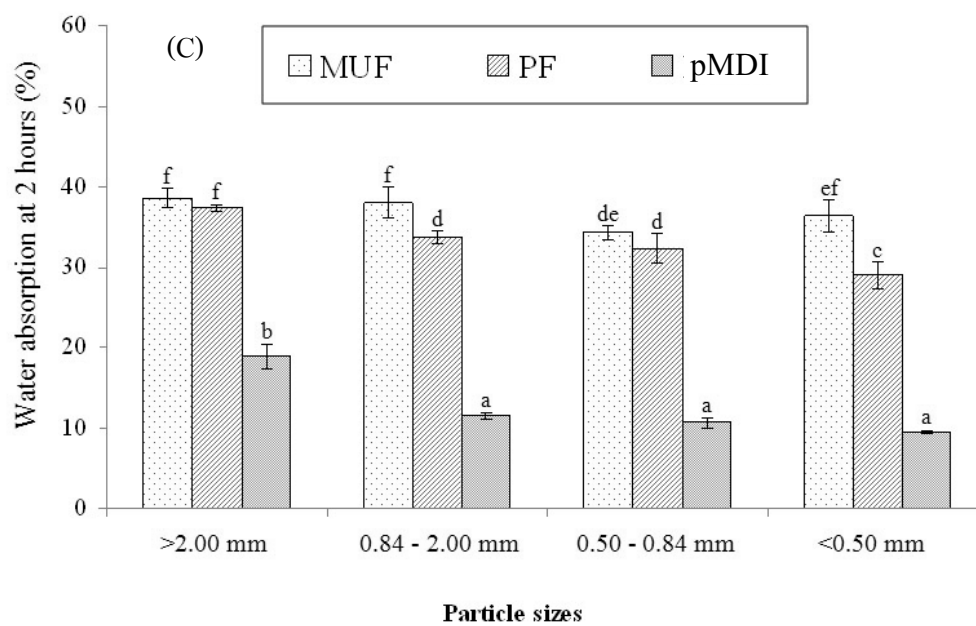
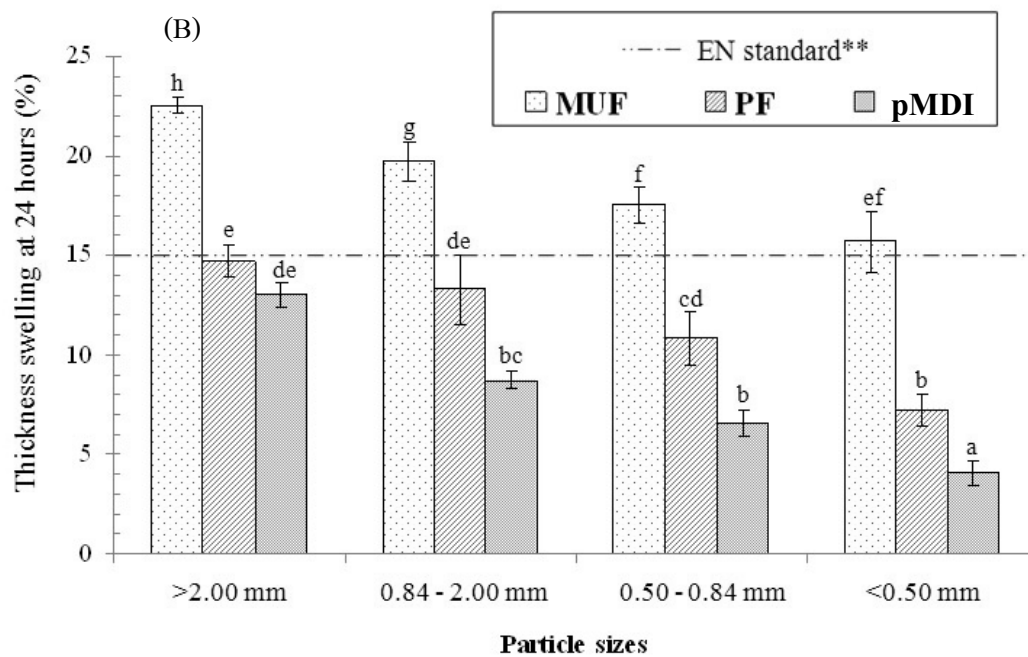


**Figure 53.** Mechanical properties of the composite panel made from various particle sizes: (A) Modulus of Rupture (MOR) and (B) Modulus of Elasticity (MOE). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate minimum requirement of standards.

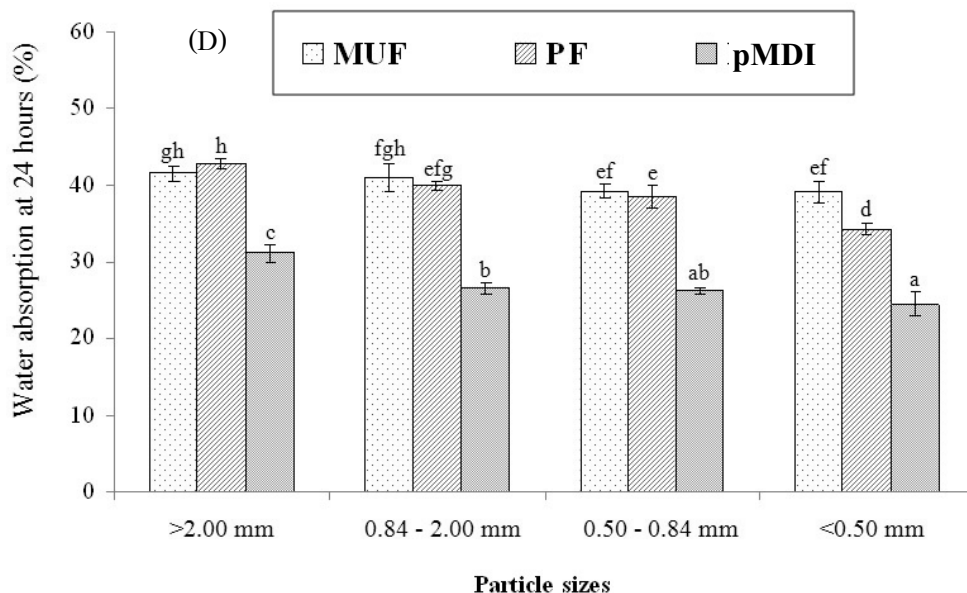
### 1.5 ผลของขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่มีต่อสมบัติการต้านน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบ (Figure 54) วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่นั้นมีข้อดีอยู่ในด้านสมบัติการต้านทานน้ำ เมื่อพิจารณาค่า TS และ WA ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ร่วมกับขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาค >2.00 mm พบว่าค่า TS ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 4.76% และ 13.02% ตามลำดับ และ WA ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 18.90% และ 31.22% ตามลำดับ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาค <0.50 mm พบว่าค่า TS ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 2.43% และ 4.08% ตามลำดับ และ WA ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 9.41% และ 24.50% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่มีอนุภาค >2.00 mm มีสมบัติการต้านทานน้ำต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาค <0.50 mm ประมาณ 2-3 เท่า และเมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารเชื่อมประสาน MUF และ PF ก็พบว่าได้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้กาว pMDI เป็นสารเชื่อมประสาน เนื่องจากขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้กาวมีโอกาสที่จะเกิดการแทรกซึม (Penetration) เข้าสู่ภายในอนุภาคได้ง่ายกว่าขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้มีคุณสมบัติการต้านทานน้ำมากกว่าขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ (วรรณธรรม อุณจิตติชัย, 2541)





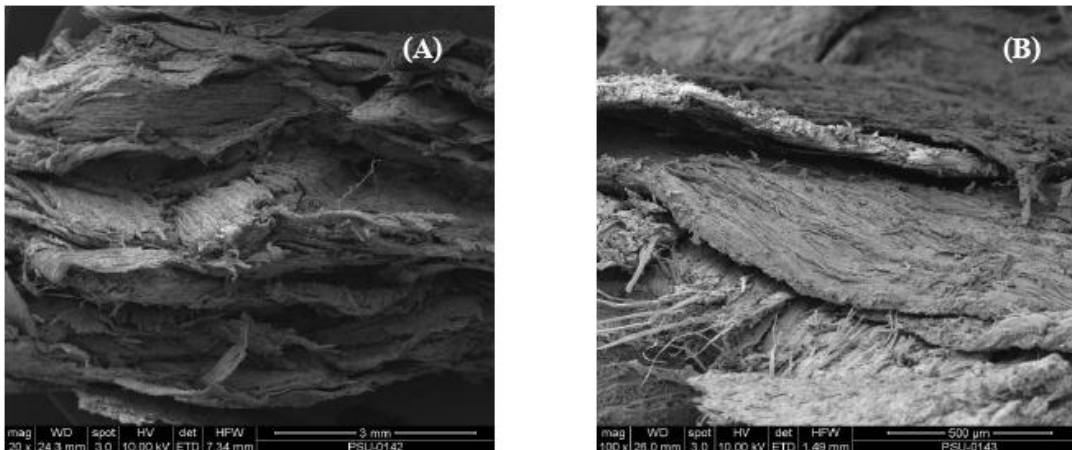




**Figure 54.** Water resistance properties of the composite panel made from various particle sizes: (A) Thickness swelling at 2 hours (TS 2 hrs.), (B) Thickness swelling at 24 hours (TS 24 hrs.), (C) Water absorption at 2 hours (WA 2 hrs.) and (D) Water absorption at 24 hours (WA 24 hrs.). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate the standards requirement of standards.

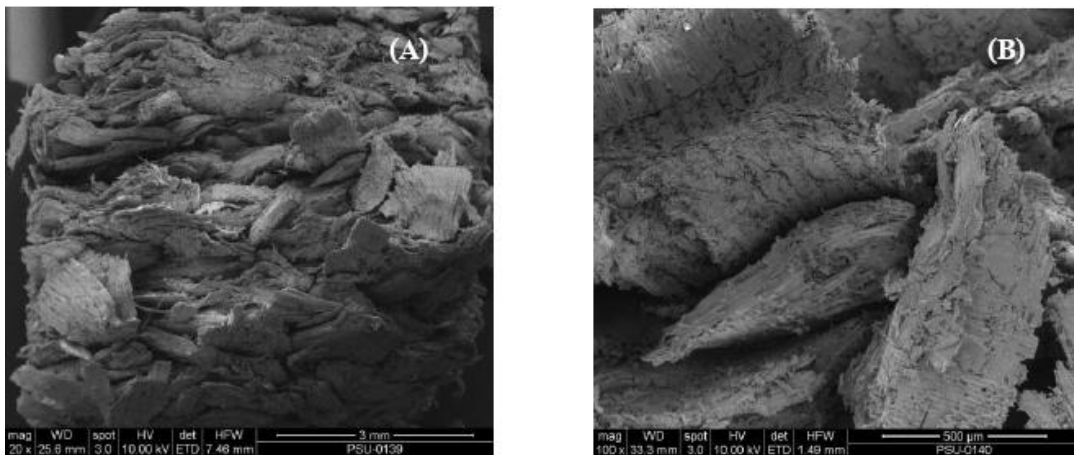
#### 1.6 ผลของขนาดอนุภาคของซีเมนต์โดยการศึกษารายละเอียดด้วย SEM

จาก Figure 55 – 58 แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบจากการทดสอบการตัดโค้ง จากการสังเกตพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค  $>2.00$  mm จะมีการเรียงซ้อนกันตามแนวยาวของอนุภาคมากที่สุด รองลงมาคือขนาดอนุภาค 0.84-2.00 mm, 0.50-0.84 mm และ  $<0.50$  mm ตามลำดับ ซึ่งผลจากการเรียงซ้อนกันของอนุภาคสามารถทำให้เกิดการกระจายแรงได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค  $>2.00$  mm มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคอื่น แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของช่องว่างระหว่างอนุภาค จากการสังเกตพบว่าการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค  $<0.50$  mm จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยที่สุด ถัดมาคือ 0.50-0.84 mm, 0.84-2.00 mm และ  $>2.00$  mm ซึ่งขนาดและปริมาณของช่องว่างระหว่างอนุภาคมีผลต่อการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค  $<0.50$  mm มีสมบัติการต้านทานดีที่สุด



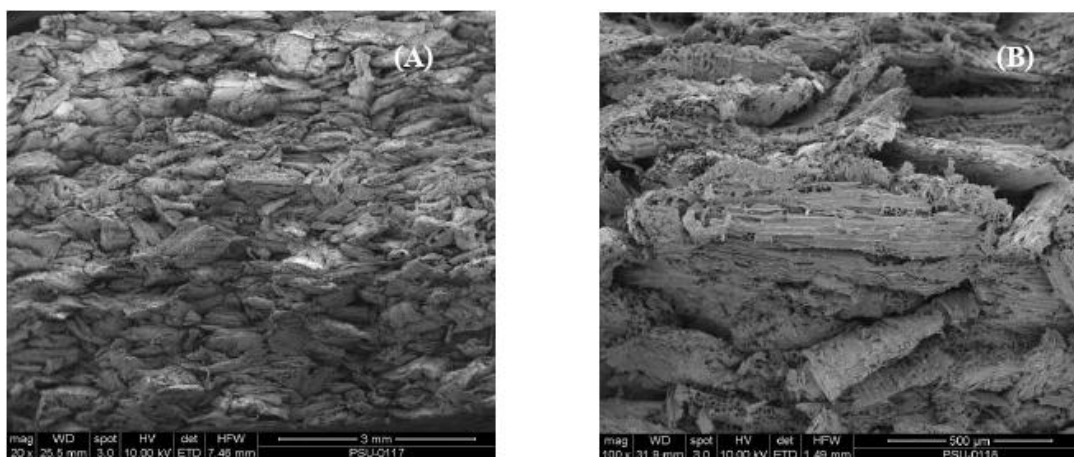
**Figure 55.** SEM of composite materials prepared from sawdust particle size  $>2.00$  mm:

(A) 20X and (B) 100X.



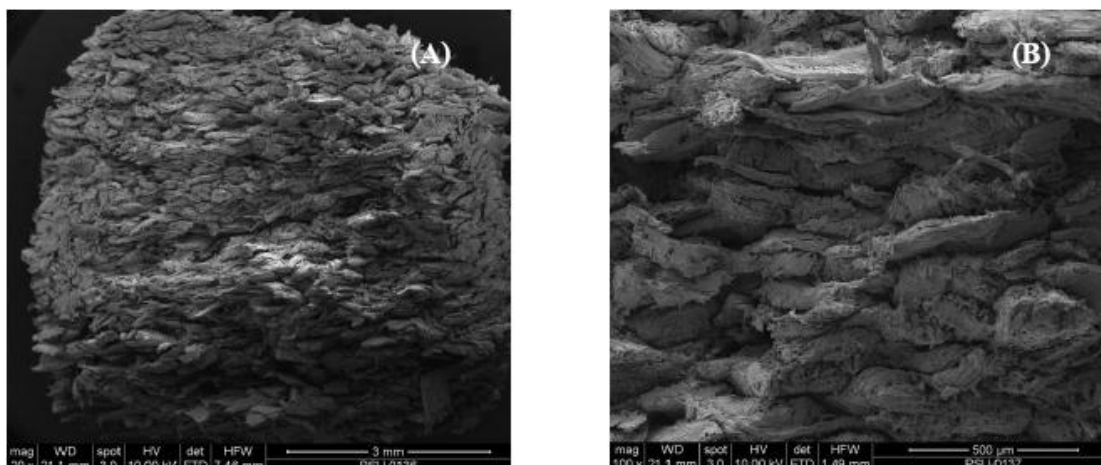
**Figure 56.** SEM of composite materials prepared from sawdust particle size  $0.84-2.00$  mm:

(A) 20X and (B) 100X.



**Figure 57.** SEM of composite materials prepared from sawdust particle size  $0.50-0.84$  mm:

(A) 20X and (B) 100X.



**Figure 58.** SEM of composite materials prepared from sawdust particle size  $<0.50$  mm:

(A) 20X and (B) 100X .

จากการทดสอบต่างๆ วัสดุเชิงประกอบควรมีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำที่ดี และสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ เมื่อวิเคราะห์จากเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก. 876-2547) และมาตรฐานของยุโรป (EN 312) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ( $>2.00$  mm) และขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ( $<0.50$  mm) ยังมีสมบัติโดยรวมไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขี้เลื่อยขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง  $0.50-0.84$  mm และ  $0.84-2.00$  mm ซึ่งจากผลของสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านน้ำ (Figure 53 และ 54) พบว่าขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบมากที่สุดคือขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง  $0.50-0.84$  mm โดยเฉพาะการใช้กาว pMDI ร่วมกับขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง  $0.50-0.84$  mm ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบจะมีผลของสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีที่สุด ซึ่งผลได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับ Pan และคณะ (2007) ซึ่งทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของชิ้นไม้ยูคาลิปตัสที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ที่ได้พบว่าการใช้ชิ้นไม้ที่มีขนาดอนุภาค  $0.42-0.84$  mm (20-40 mesh) มีความเหมาะสมต่อการนำมาผลิตเป็นแผ่นวัสดุเชิงประกอบได้ดีที่สุด

**Table 18.** Properties of the composite panel made from various particle sizes.

Adhesive type	Particle sizes	Density (g/cm <sup>3</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	TS 2 hrs. (%)	TS 24 hrs. (%)	WA 2 hrs. (%)	WA 24 hrs. (%)
MUF	>2.00 mm	0.80 ± 0.03	16.14 ± 1.39 <sup>e</sup>	2,216 ± 81 <sup>f</sup>	20.24 ± 1.21 <sup>g</sup>	22.56 ± 0.43 <sup>h</sup>	38.57 ± 1.20 <sup>f</sup>	41.53 ± 0.94 <sup>gh</sup>
	0.84-2.00 mm	0.79 ± 0.02	12.95 ± 2.64 <sup>b</sup>	1,820 ± 37 <sup>cde</sup>	17.80 ± 1.08 <sup>f</sup>	19.68 ± 0.97 <sup>g</sup>	38.08 ± 1.95 <sup>f</sup>	40.95 ± 1.94 <sup>gh</sup>
	0.50-0.84 mm	0.80 ± 0.02	9.01 ± 0.16 <sup>a</sup>	813 ± 39 <sup>a</sup>	14.54 ± 0.28 <sup>e</sup>	17.55 ± 0.91 <sup>f</sup>	32.59 ± 1.60 <sup>de</sup>	38.42 ± 1.47 <sup>ef</sup>
	<0.50 mm	0.79 ± 0.02	9.39 ± 0.28 <sup>a</sup>	901 ± 28 <sup>a</sup>	12.62 ± 1.18 <sup>de</sup>	15.61 ± 4.01 <sup>ef</sup>	36.33 ± 1.96 <sup>ef</sup>	39.04 ± 1.47 <sup>ef</sup>
PF	>2.00 mm	0.78 ± 0.03	30.95 ± 1.19 <sup>f</sup>	3,012 ± 112 <sup>g</sup>	12.08 ± 0.64 <sup>d</sup>	14.71 ± 0.79 <sup>e</sup>	37.37 ± 0.49 <sup>f</sup>	42.87 ± 0.61 <sup>h</sup>
	0.84-2.00 mm	0.79 ± 0.01	19.68 ± 1.18 <sup>e</sup>	1,990 ± 224 <sup>ef</sup>	8.94 ± 0.44 <sup>c</sup>	13.27 ± 1.76 <sup>de</sup>	33.71 ± 0.87 <sup>d</sup>	39.95 ± 0.55 <sup>efg</sup>
	0.50-0.84 mm	0.80 ± 0.02	17.49 ± 0.90 <sup>e</sup>	1,424 ± 103 <sup>c</sup>	6.82 ± 0.22 <sup>bc</sup>	10.84 ± 1.39 <sup>cd</sup>	32.23 ± 1.81 <sup>d</sup>	37.63 ± 1.58 <sup>e</sup>
	<0.50 mm	0.80 ± 0.01	15.30 ± 0.68 <sup>e</sup>	1,349 ± 93 <sup>bc</sup>	2.43 ± 0.79 <sup>a</sup>	7.24 ± 0.81 <sup>b</sup>	29.04 ± 1.71 <sup>c</sup>	34.23 ± 0.74 <sup>d</sup>
pMDI	>2.00 mm	0.80 ± 0.02	38.93 ± 1.70 <sup>g</sup>	3,190 ± 321 <sup>g</sup>	4.76 ± 0.68 <sup>ab</sup>	13.02 ± 0.67 <sup>de</sup>	18.90 ± 1.50 <sup>b</sup>	31.22 ± 1.15 <sup>c</sup>
	0.84-2.00 mm	0.76 ± 0.01	21.88 ± 1.89 <sup>de</sup>	2,240 ± 357 <sup>def</sup>	4.21 ± 0.38 <sup>a</sup>	8.71 ± 0.47 <sup>bc</sup>	11.53 ± 0.47 <sup>a</sup>	26.63 ± 0.69 <sup>b</sup>
	0.50-0.84 mm	0.78 ± 0.02	27.01 ± 0.80 <sup>cd</sup>	3,036 ± 105 <sup>cd</sup>	4.09 ± 0.71 <sup>a</sup>	6.54 ± 0.67 <sup>b</sup>	10.66 ± 0.72 <sup>a</sup>	26.31 ± 0.44 <sup>ab</sup>
	<0.50 mm	0.80 ± 0.04	16.79 ± 1.64 <sup>c</sup>	1,606 ± 139 <sup>b</sup>	2.43 ± 0.68 <sup>a</sup>	4.08 ± 0.63 <sup>a</sup>	9.41 ± 0.21 <sup>a</sup>	24.50 ± 1.61 <sup>a</sup>

**Remark:** Values within the same column followed by different letters (a-h) are significantly different at  $p < 0.05$ . The composite panels were

prepared by using 15% adhesives contents. Conditioning at 55%RH and 25°C.

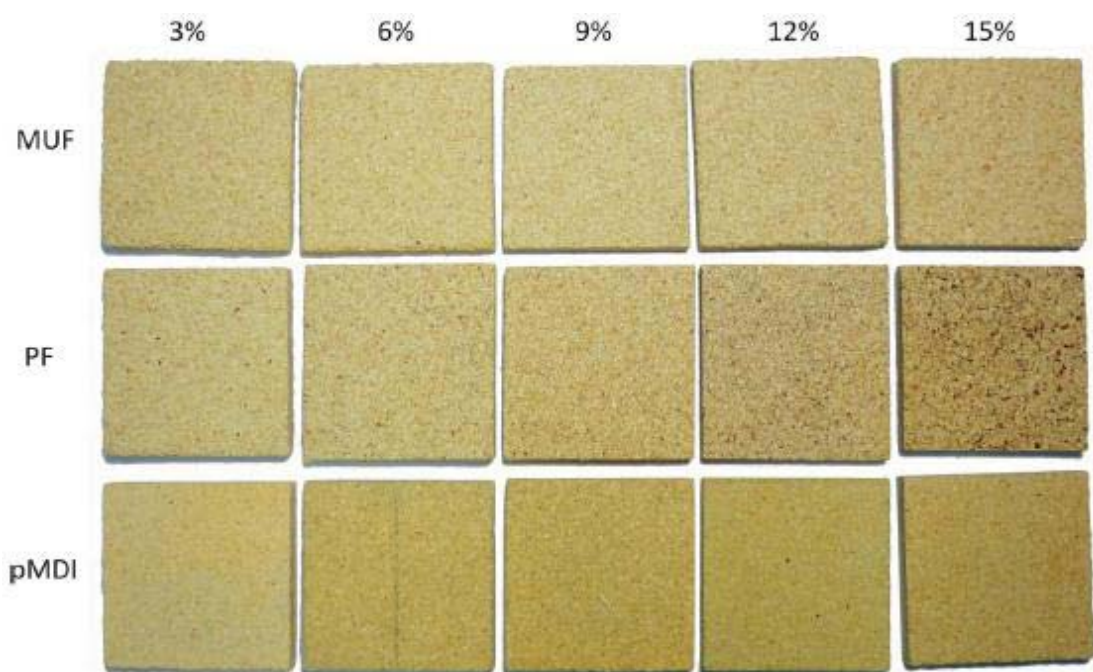
กล่าวโดยสรุปคือเมื่อพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่สามารถผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312) ได้ พบว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากขี้เถ้าที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.50-0.84 mm ซึ่งขนาดอนุภาคนี้มีปริมาณมากอีกด้วย ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้ขี้เถ้าที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.50-0.84 mm เพื่อทำการหาชนิดและปริมาณของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สุดต่อไปในตอนี่ 2

## ตอนที่ 2 ผลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

จากการทดลองเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยโดยใช้สารเชื่อมประสาน 3 ชนิด ได้แก่ กาวพอลิเมอร์ไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนต (Polymeric diphenyl diisocyanate, pMDI), กาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine-urea formaldehyde, MUF) และ กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde, PF) และในปริมาณที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (3, 6, 9, 12 และ 15% wt) ร่วมกับขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.50-0.84 mm (จากผลในตอนที่ 1) ซึ่งวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312) ได้ผลดัง Table 21

### 2.1 ผลของสารเชื่อมประสานที่มีต่อลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบ

Figure 59 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยที่เตรียมจากสารเชื่อมประสาน 3 ชนิด (MUF, PF และ pMDI) ปริมาณ 3, 6, 9, 12 และ 15% ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าตัวอย่างที่เตรียมจากสารเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิด มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก การกระจายตัวของส่วนผสมสม่ำเสมอ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI และ MUF จะมีสีสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน แต่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว PF พบว่าเมื่อใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณที่มากขึ้นสีของตัวอย่างจะมีสีเข้มขึ้นอย่างชัดเจน



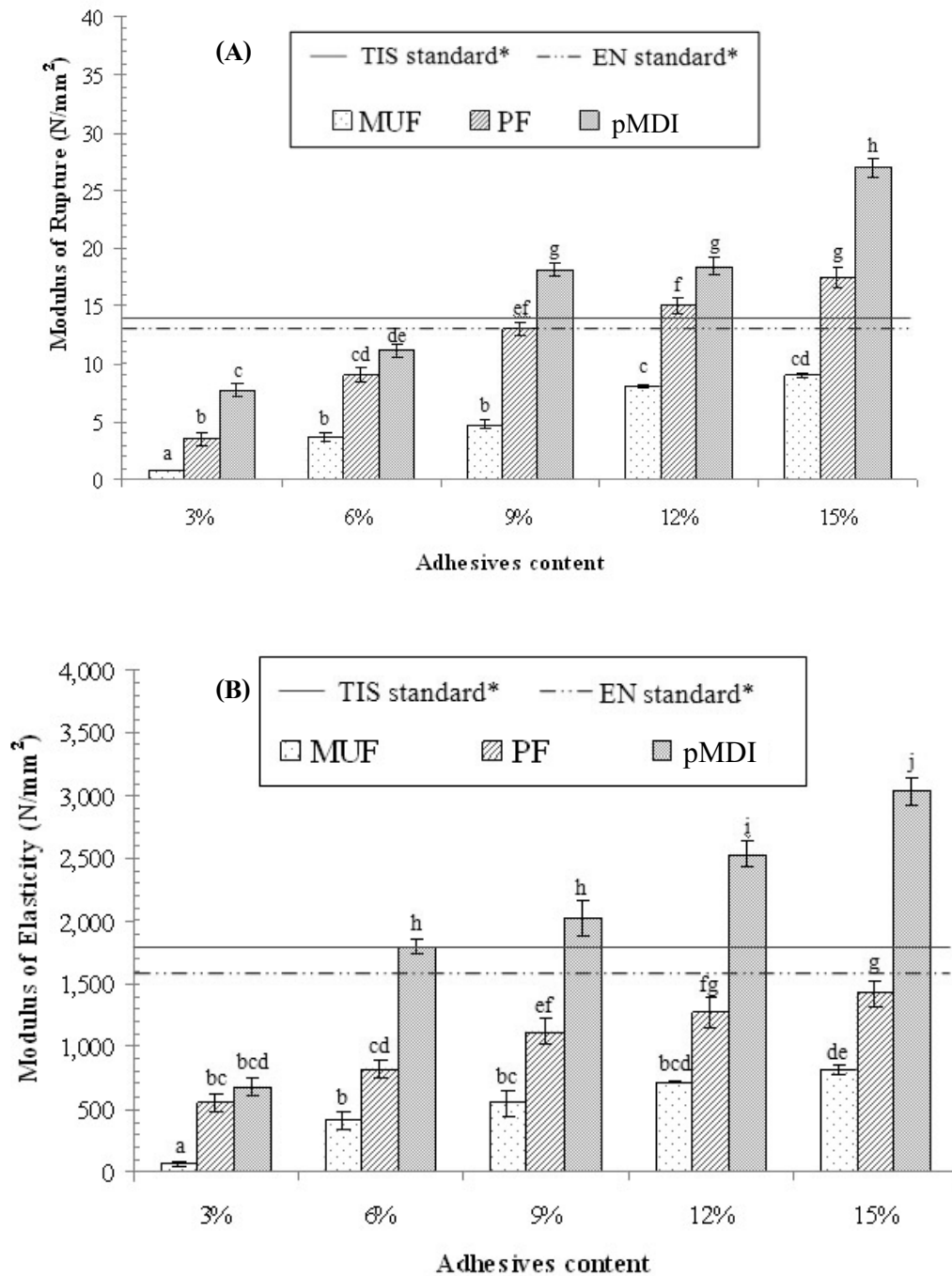
**Figure 59.** The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various adhesives.

## 2.2 ผลของสารเชื่อมประสานต่อความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ

จาก Table 21 แสดงสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารเชื่อมประสานในปริมาณ 3-15% มีความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.876-2547 ซึ่งมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.64-0.80 g/cm<sup>3</sup> โดยสามารถสังเกตได้ว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณ 3-6% วัสดุเชิงประกอบจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าการใช้สารเชื่อมประสานปริมาณ 9-15% เนื่องจากการใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณน้อยทำให้วัสดุเชิงประกอบหลังจากขึ้นรูปแล้วมีการคืบตัวในทิศทางของความหนา ทำให้ความหนาของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีปริมาตรมากขึ้น ด้วยสาเหตุที่ปริมาตรของวัสดุเชิงประกอบมากขึ้นนี้จึงทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในทุกชุดการทดลองสามารถผ่านเกณฑ์ตาม มอก.876-2547 ได้

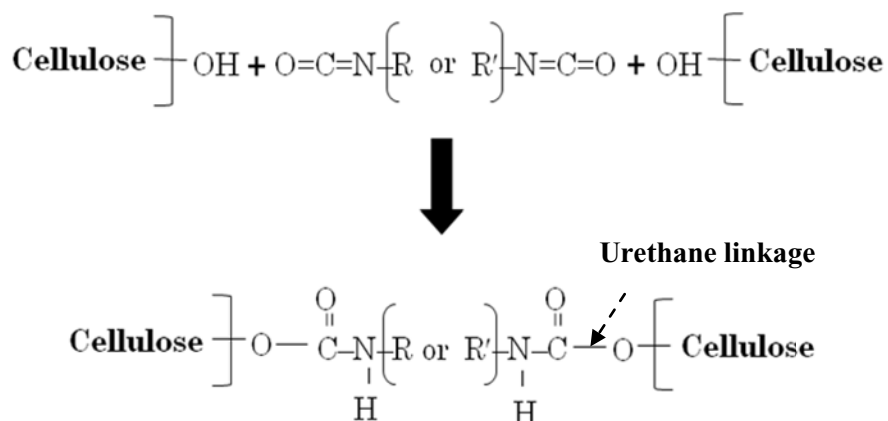
## 2.3 ผลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

จาก Figure 60 แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าการใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณที่มากขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้น ซึ่งการใช้กาว pMDI เป็นสารเชื่อมประสานจะมีค่า MOR และ MOE สูงที่สุด และรองลงมาคือกาว PF และ MUF ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI กับกาว PF และ MUF พบว่าการใช้กาว pMDI มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้กาว PF อย่างน้อย 2 เท่า และสูงกว่าการใช้กาว MUF อย่างน้อย 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องมาจากกาว pMDI นั้นสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Urethane linkage ซึ่งทำปฏิกิริยาได้ดีกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ในเซลล์ลูโลสที่อยู่ในจีลียู (Figure 61) ส่วนกาวประเภทฟอร์มาลดีไฮด์นั้น จะสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารฟอร์มาลดีไฮด์และเซลล์ลูโลสของจีลียูด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) (Figure 62) (Gollob and Wellons, 2003) ซึ่งความแข็งแรงของพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าพันธะไฮโดรเจนทำให้การใช้กาว pMDI เป็นสารเชื่อมประสานในวัสดุเชิงประกอบจึงมีความแข็งแรงมากกว่าการใช้กาว PF และ MUF



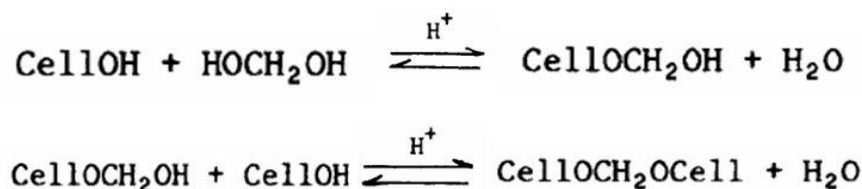
**Figure 60.** Mechanical properties of the composite panel made from various adhesives: (A) Modulus of Rupture (MOR) and (B) Modulus of Elasticity (MOE). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate minimum requirement of standards.





**Figure 61.** Reaction of pMDI with hydroxyls group of cellulose.

**Source:** Gollob and Wellons (2003)



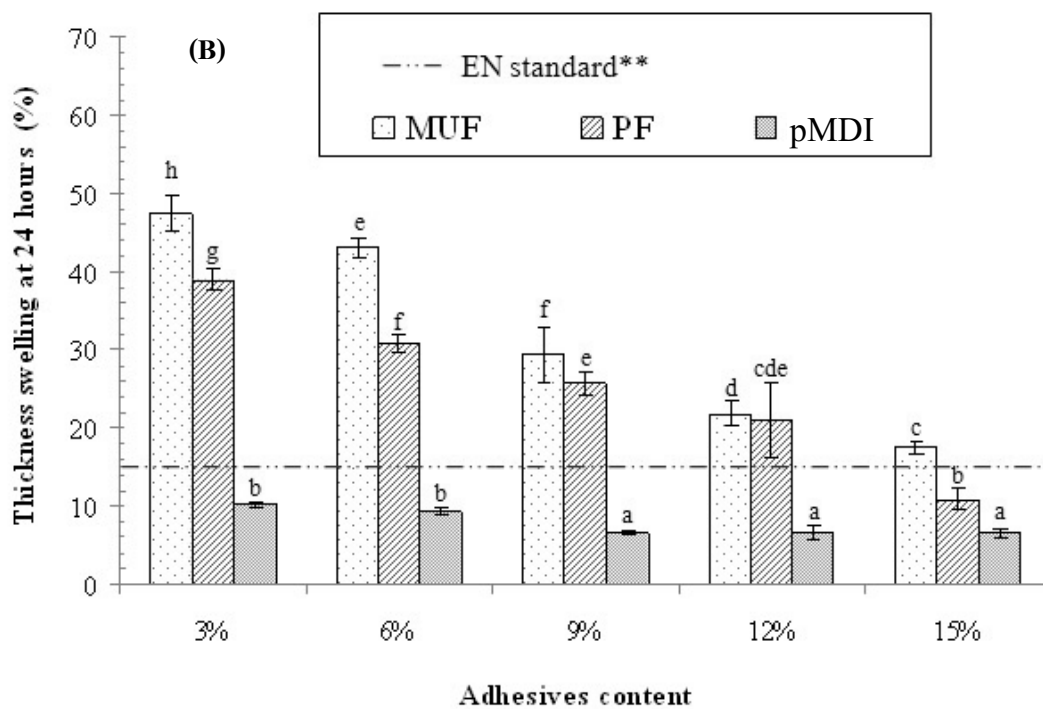
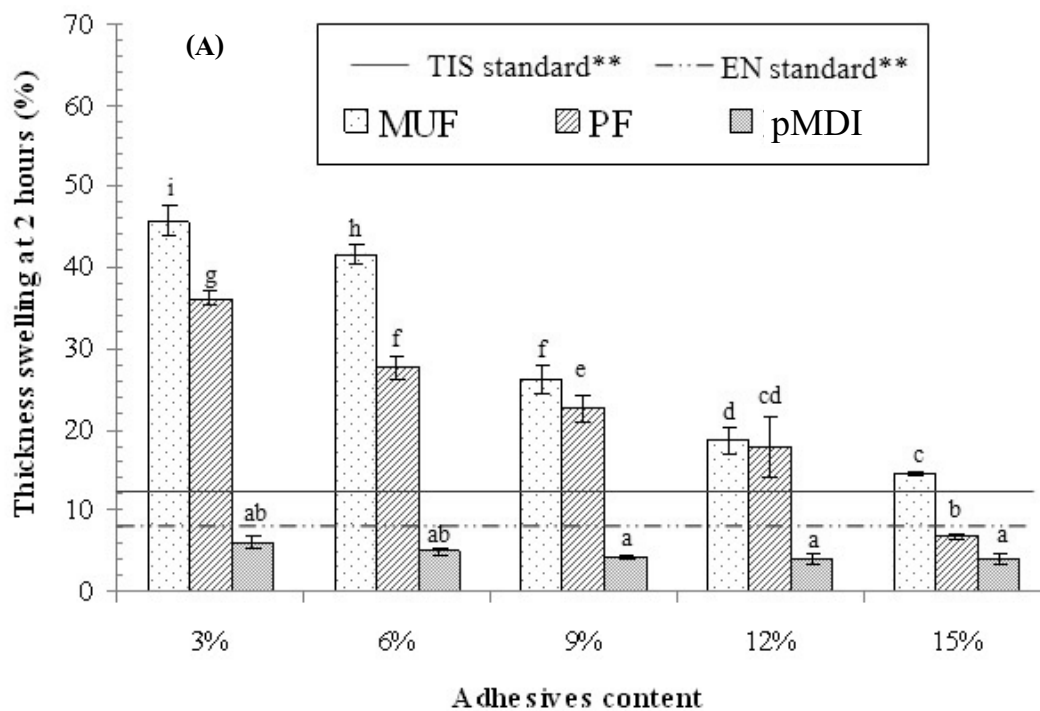
**Figure 62.** Reaction of formaldehyde with cellulose.

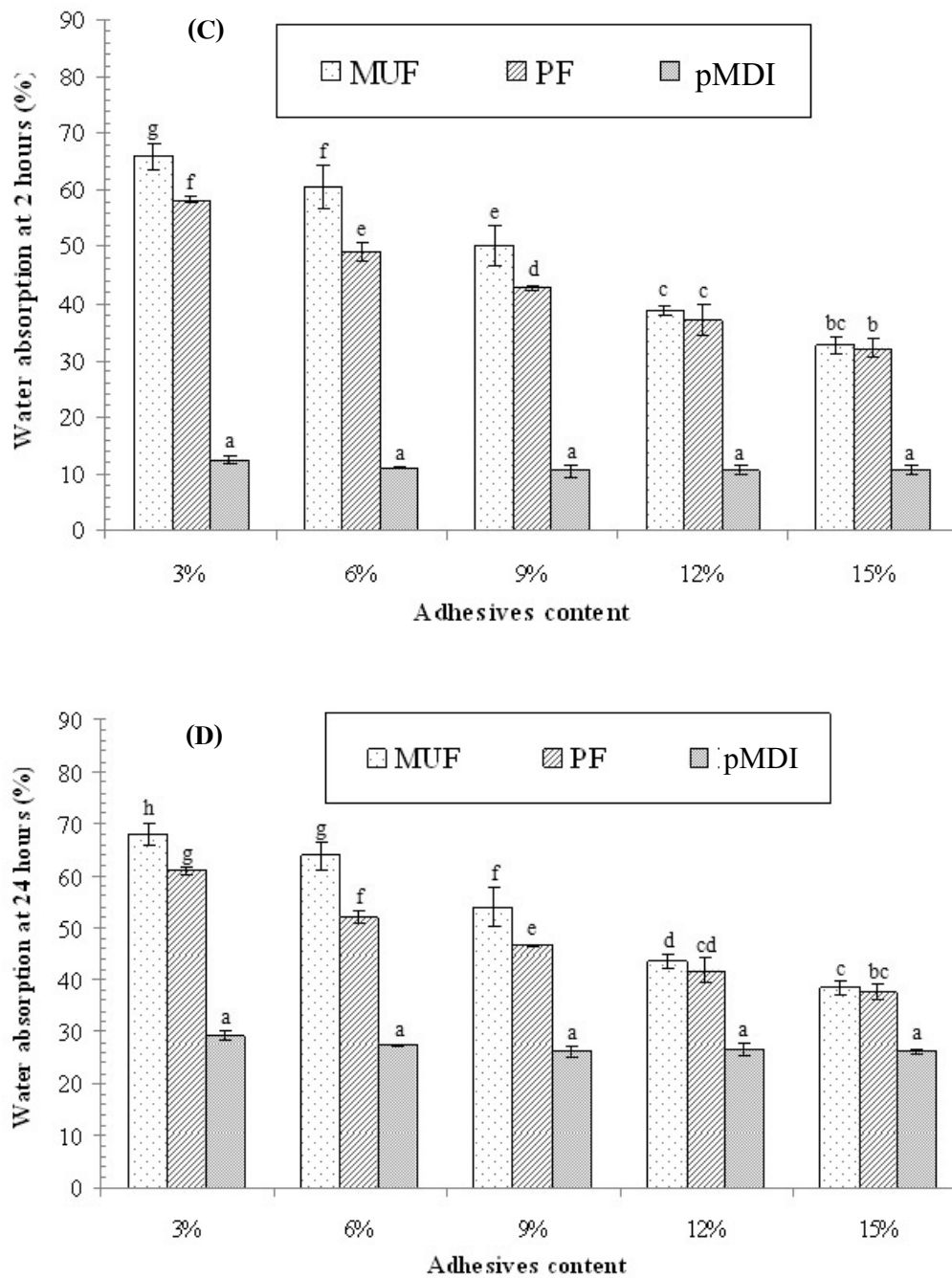
**Source:** Ray and Rout (2005)

**Remark:** Cell is Cellulose

#### 2.4 ผลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

ในด้านสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบดังแสดงใน Figure 63 พบว่าการใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น จาก Figure 63 พบว่าการใช้กาว pMDI เป็นสารเชื่อมประสานมีค่า TS และ WA ต่ำที่สุด และรองลงมาคือกาว PF และ MUF ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบพบว่าการใช้กาว pMDI มีสมบัติการต้านทานน้ำดีกว่ากาว PF และกาว MUF อย่างน้อย 2-3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะกาว pMDI มีความแข็งแรงกว่าพันธะของกาว PF และ MUF อีกทั้งกาว pMDI เป็นกาวที่ไม่มีขี้ผึ้งเมื่อทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสแล้วทำให้ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยจะไม่ค่อยจะมีสมบัติไม่มีขี้ผึ้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI มีสมบัติการต้านทานน้ำดีกว่ากาว PF และ MUF





**Figure 63.** Water resistance properties of the composite panel made from various adhesives: (A) Thickness swelling at 2 hours (TS 2 hrs.), (B) Thickness swelling at 24 hours (TS 24 hrs.), (C) Water absorption at 2 hours (WA 2 hrs.) and (D) Water absorption at 24 hours (WA 24 hrs.). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate maximum requirement of standards.

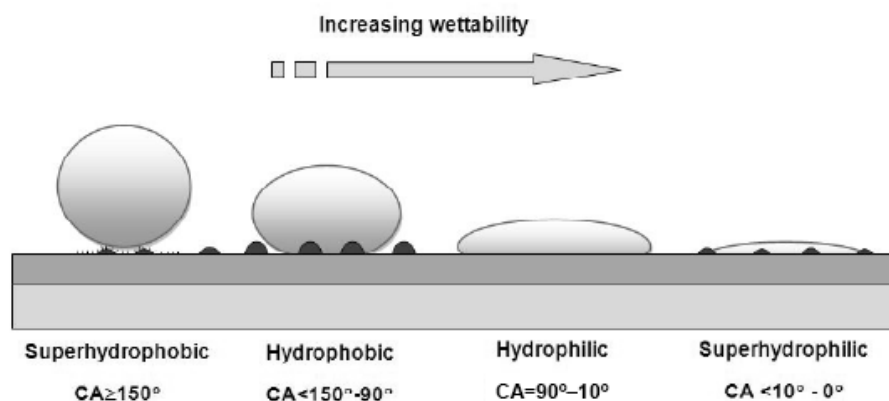
## 2.5 ผลของสารเชื่อมประสานที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ

จาก Table 19 และ Figure 64 อธิบายค่าความสามารถในการเปียกจากมุมสัมผัสของบนผิวหน้าของวัสดุ หากหยดน้ำกับวัสดุมีมุมสัมผัสระหว่างผิวน้อยกว่า  $0-10^\circ$  แสดงว่าผิววัสดุมีสมบัติชอบน้ำอย่างยิ่งยวดหรือเป็นผิวซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก (Super-hydrophilic), หยดน้ำกับวัสดุมีมุมสัมผัสระหว่างผิวน้อยกว่า  $90^\circ$  แสดงว่าผิววัสดุมีสมบัติชอบน้ำหรือเป็นผิวไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic), มุมสัมผัสระหว่างผิวอยู่ระหว่าง  $90 - 150^\circ$  แสดงว่าผิววัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือผิวไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) และหากหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวดั้งแต่  $150 - 180^\circ$  แสดงว่าผิววัสดุนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดหรือเป็นผิวซูเปอร์ไฮโดรโฟบิก (Super-hydrophobic) (Shafrin and Zisman, 1960; Koch *et al.*, 2008)

**Table 19.** Contact angle and water wettability on surface of material.

Contact angle ( $\theta$ )	Wetting ability
Close to $0^\circ$	Super-hydrophilic
$10 - 30^\circ$	Highly hydrophilic
Up to $90^\circ$	Less strongly hydrophilic
$>90^\circ$	Hydrophobic
As high as $150^\circ$	Highly hydrophobic
$150-180^\circ$	Super-hydrophobic

**Source:** Shafrin and Zisman (1960).



**Figure 64.** The four classes of surface wettability types of surface based on their interaction with aqueous droplets.

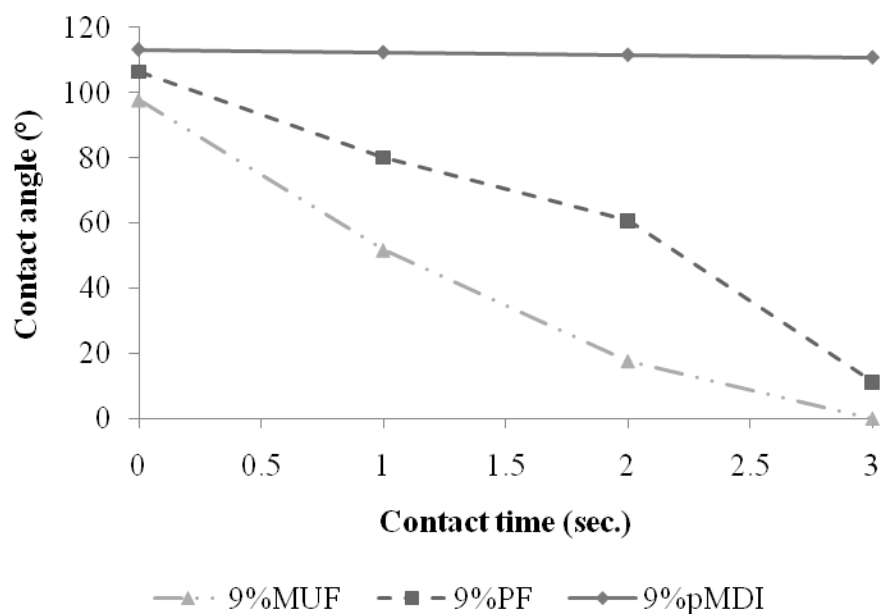
**Source:** Koch *et al.* (2008).

จาก Table 20 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจาก MUF, PF และ pMDI ปริมาณ 9% พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาวทั้ง 3 ชนิด ณ เวลาเริ่มต้นที่ 0 วินาที มุมสัมผัสของหยดน้ำมีลักษณะเป็นมุมกว้าง ( $\theta > 90^\circ$ ) ซึ่งเป็นลักษณะของผิววัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที (Figure 65) พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว MUF และ PF จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว จนมุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่า  $0^\circ$  ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะของผิววัสดุที่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Super-hydrophilic) แต่มุมสัมผัสของหยดน้ำที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI จะเปลี่ยนแปลงมุมไปเล็กน้อย และเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที จะยังคงมีหยดน้ำอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบ (Figure 66) ซึ่งมีมุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่า  $80^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะของผิววัสดุที่ชอบน้ำเล็กน้อย (Less strong hydrophilic)

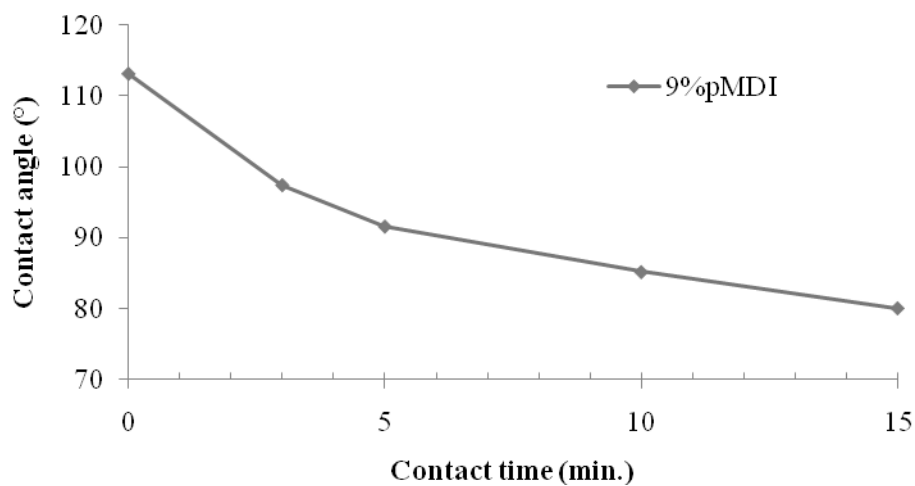
จากผลของมุมสัมผัสที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบ (Table 20) พบว่าการใช้กาว pMDI ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการต้านทานน้ำที่บริเวณผิวหน้าวัสดุได้ดีกว่ากาว PF และ MUF เนื่องจากกาว pMDI เป็นสารที่ไม่มีขี้ เมื่อนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีคุณสมบัติการต้านทานน้ำดีกว่าการใช้สารเชื่อมประสานชนิดอื่น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีผลสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ TS และ WA

**Table 20.** Contact angle on surface of composite materials made from various adhesives.

Contact time (sec.)	Contact angle ( $\theta$ )		
	9%MUF	9%PF	9%pMDI
0	97.53°	106.27°	113.18°
1	51.57°	79.94°	112.34°
2	17.60°	60.62°	111.56°
3	0.00°	11.17°	110.82°
180 (3 min)	0.00°	0.00°	97.44°
300 (5 min)	0.00°	0.00°	91.58°
600 (10 min)	0.00°	0.00°	85.15°
900 (15 min)	0.00°	0.00°	80.03°



**Figure 65.** Comparison of contact angle of composite materials made from various adhesives at 0 – 3 seconds.



**Figure 66.** Contact angle of composite materials using 9%pMDI.

**Table 21.** Properties of the composite panel made from various adhesives.

Adhesive Types	Contents	Density (g/cm <sup>3</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	TS 2 hrs. (%)	TS 24 hrs. (%)	WA 2 hrs. (%)	WA 24 hrs. (%)
MUF	3%	0.64 ± 0.02	0.79 ± 0.05 <sup>a</sup>	65 ± 16 <sup>a</sup>	45.65 ± 1.95 <sup>i</sup>	47.46 ± 2.18 <sup>h</sup>	65.92 ± 2.29 <sup>g</sup>	67.95 ± 2.06 <sup>h</sup>
	6%	0.71 ± 0.04	3.59 ± 0.41 <sup>b</sup>	410 ± 70 <sup>b</sup>	41.59 ± 1.22 <sup>h</sup>	43.13 ± 1.29 <sup>c</sup>	60.59 ± 3.87 <sup>f</sup>	63.83 ± 2.61 <sup>g</sup>
	9%	0.74 ± 0.03	4.75 ± 0.30 <sup>b</sup>	546 ± 111 <sup>bc</sup>	26.18 ± 1.67 <sup>f</sup>	29.28 ± 3.62 <sup>f</sup>	50.29 ± 3.64 <sup>e</sup>	53.94 ± 3.84 <sup>f</sup>
	12%	0.79 ± 0.06	8.01 ± 0.15 <sup>c</sup>	712 ± 9 <sup>bcd</sup>	18.58 ± 1.66 <sup>d</sup>	21.85 ± 1.62 <sup>d</sup>	38.79 ± 0.77 <sup>c</sup>	43.58 ± 1.37 <sup>d</sup>
	15%	0.80 ± 0.02	9.01 ± 0.16 <sup>cd</sup>	813 ± 39 <sup>de</sup>	14.54 ± 0.28 <sup>c</sup>	17.55 ± 0.91 <sup>c</sup>	32.59 ± 1.60 <sup>b</sup>	38.42 ± 1.47 <sup>c</sup>
PF	3%	0.64 ± 0.03	3.46 ± 0.50 <sup>b</sup>	549 ± 69 <sup>bc</sup>	36.07 ± 0.83 <sup>g</sup>	38.93 ± 1.33 <sup>g</sup>	58.37 ± 0.42 <sup>f</sup>	61.00 ± 0.82 <sup>g</sup>
	6%	0.67 ± 0.04	9.05 ± 0.58 <sup>cd</sup>	814 ± 52 <sup>cd</sup>	27.66 ± 1.40 <sup>f</sup>	30.85 ± 1.20 <sup>f</sup>	49.16 ± 1.66 <sup>c</sup>	52.07 ± 1.25 <sup>f</sup>
	9%	0.74 ± 0.01	12.98 ± 0.56 <sup>ef</sup>	1122 ± 142 <sup>ef</sup>	22.65 ± 1.63 <sup>e</sup>	25.62 ± 1.48 <sup>e</sup>	42.83 ± 0.57 <sup>d</sup>	46.59 ± 0.05 <sup>c</sup>
	12%	0.81 ± 0.01	14.99 ± 0.65 <sup>f</sup>	1270 ± 106 <sup>fg</sup>	17.86 ± 3.74 <sup>cd</sup>	20.93 ± 4.75 <sup>cde</sup>	37.09 ± 2.65 <sup>c</sup>	41.76 ± 2.40 <sup>cd</sup>
	15%	0.80 ± 0.02	17.49 ± 0.90 <sup>g</sup>	1424 ± 103 <sup>g</sup>	6.82 ± 0.22 <sup>b</sup>	10.84 ± 1.39 <sup>c</sup>	32.23 ± 1.81 <sup>bc</sup>	37.63 ± 1.58 <sup>bc</sup>
pMDI	3%	0.70 ± 0.02	7.66 ± 0.59 <sup>c</sup>	675 ± 72 <sup>bcd</sup>	6.03 ± 0.79 <sup>ab</sup>	10.19 ± 0.41 <sup>b</sup>	12.34 ± 0.66 <sup>a</sup>	29.27 ± 0.84 <sup>a</sup>
	6%	0.74 ± 0.01	11.12 ± 0.58 <sup>de</sup>	1793 ± 52 <sup>h</sup>	4.92 ± 0.43 <sup>ab</sup>	9.25 ± 0.50 <sup>b</sup>	11.03 ± 0.11 <sup>a</sup>	27.46 ± 0.23 <sup>a</sup>
	9%	0.75 ± 0.03	18.10 ± 0.56 <sup>g</sup>	2,027 ± 142 <sup>h</sup>	4.25 ± 0.22 <sup>a</sup>	6.58 ± 0.23 <sup>a</sup>	10.47 ± 0.99 <sup>a</sup>	26.20 ± 1.07 <sup>a</sup>
	12%	0.76 ± 0.03	18.40 ± 0.73 <sup>g</sup>	2,533 ± 106 <sup>i</sup>	4.11 ± 0.75 <sup>a</sup>	6.59 ± 0.93 <sup>a</sup>	10.68 ± 0.86 <sup>a</sup>	26.71 ± 1.21 <sup>a</sup>
	15%	0.78 ± 0.02	27.01 ± 0.80 <sup>h</sup>	3036 ± 105 <sup>j</sup>	4.09 ± 0.71 <sup>a</sup>	6.54 ± 0.67 <sup>a</sup>	10.66 ± 0.72 <sup>a</sup>	26.31 ± 0.44 <sup>a</sup>

**Remark:** Values within the same column followed by different letters (a-h) are significantly different at  $p < 0.05$ . The composite panels were made with 20-35 mesh particles. Conditioning at 55%RH and 25°C.

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าการใช้กาว pMDI ปริมาณ 15% เป็นสารเชื่อมประสาน จะมีสมบัติต่างๆ ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้กาว pMDI ปริมาณ 9% ก็เพียงพอที่จะสามารถผ่าน มอก. 876-2547 และ EN 312 ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้กาว pMDI ปริมาณ 9% ร่วมกับการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค 0.50-0.84 mm เพื่อใช้เป็นชุดการทดลองควบคุมในตอนๆที่ 3 และ 4 ต่อไป

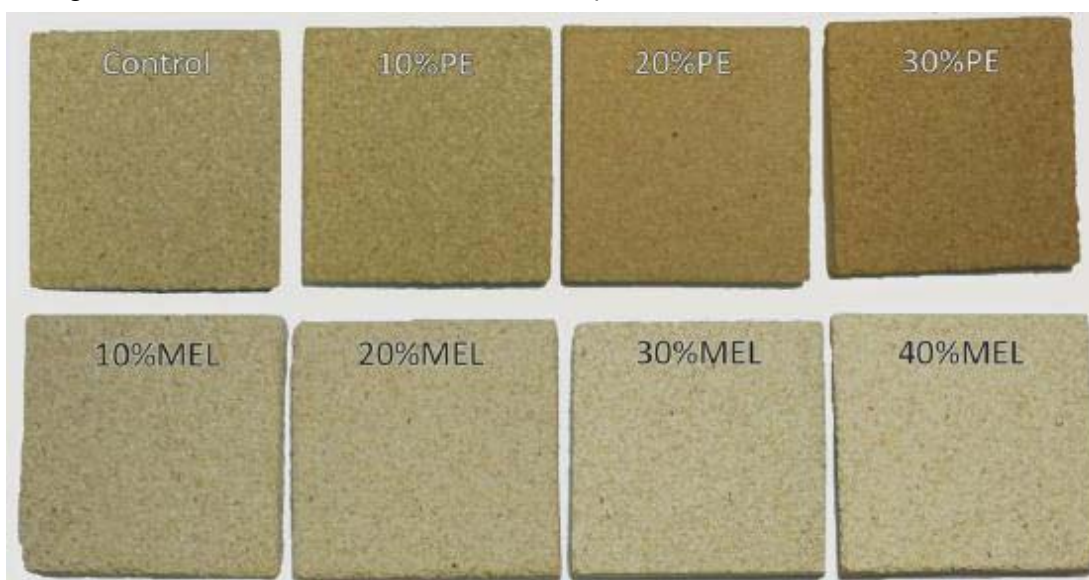


### ตอนที่ 3 ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

จากการศึกษาในตอนที่ 1 และ 2 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.84 mm ร่วมกับกาว pMDI ปริมาณ 9% มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นชุดทดลองควบคุม ในการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ จะใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ Melamine molding compound ชื่อย่อ MEL และ Low density polyethylene ชื่อย่อ PE ในปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% (w/w)

#### 3.1 ผลของสารเติมแต่งที่มีต่อลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบ

Figure 67 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยที่เตรียมจากสารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ MEL และ PE ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าตัวอย่างที่เติม MEL มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก การกระจายตัวของส่วนผสมสม่ำเสมอ และจะมีสีขาวยิ่งมากขึ้นตามปริมาณการเติม MEL ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก MEL มีสีขาว สำหรับตัวอย่างที่เติม PE ที่ปริมาณ 10 และ 20% พบว่าตัวอย่าง มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก การกระจายตัวของส่วนผสมสม่ำเสมอ ตัวอย่างจะมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นเมื่อเติม PE มากขึ้น ตัวอย่างที่เติม PE ที่ปริมาณ 30% ตัวอย่างจะมีผิวขรุขระเล็กน้อย ไม่มีรอยแตก การกระจายตัวของส่วนผสมสม่ำเสมอ แต่จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE ปริมาณ 40% มีลักษณะพื้นผิวแตก ไม่เรียบ การขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ ดังแสดงใน Figure 68 จึงไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติต่างๆได้



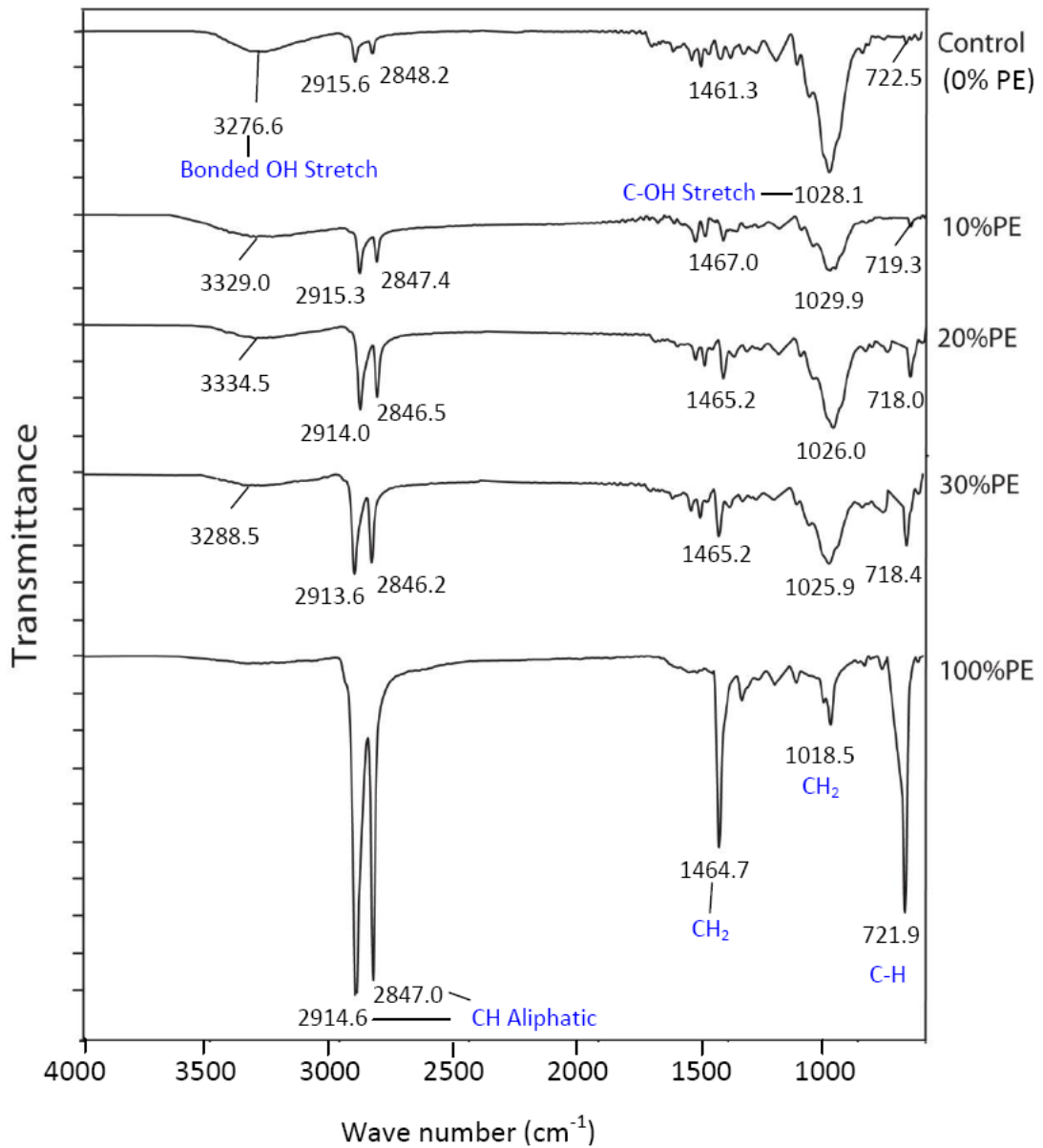
**Figure 67.** The appearance of composite from sawdust panels prepared by using various additives.



**Figure 68.** The appearance of composite panel prepared by using 40% Polyethylene as an additive.

### 3.2 ผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค FT-IR

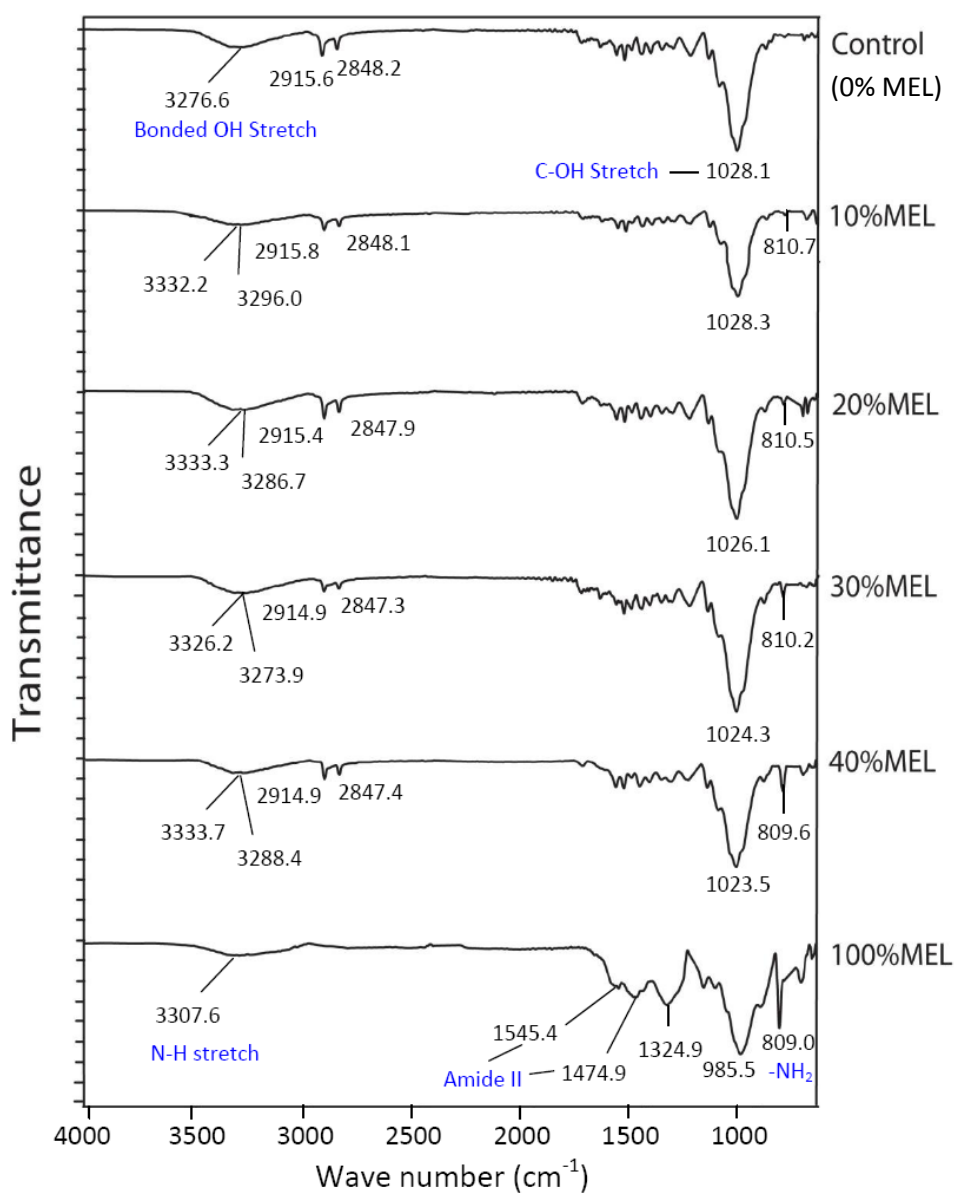
การศึกษาโครงสร้างสเปกโตรสโคปีด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ ตรวจสอบและพิสูจน์ และศึกษาโมเลกุลของสาร เป็นข้อมูลที่เกิดจากการสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) ของโมเลกุล ซึ่งแสดงในรูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด สามารถบ่งชี้การเกิดพันธะของตัวอย่างได้ โดยในช่วงเลขคลื่น  $4,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$  เป็นบริเวณที่เรียกว่า Group Frequency Region ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวก Functional groups แต่ไม่ให้ Complete structure และช่วงเลขคลื่น  $1,300-650 \text{ cm}^{-1}$  เป็นบริเวณที่เรียกว่า Finger Print Region ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างโมเลกุลที่สมบูรณ์ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันทำให้สามารถระบุชนิดของสารได้ (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2534)



**Figure 69.** The FT-IR spectra of composite materials prepared by using Polyethylene as an additive.

จาก Figure 69 เป็นสเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุเชิงประกอบจากซีเมนต์ที่มีการเติม PE ในปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 % (w/w) จากสเปกตรัมพบว่า การเติม PE ลงในวัสดุเชิงประกอบนั้นไม่มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบภายในวัสดุเชิงประกอบ จากการสังเกตพบว่าการดูดกลืนรังสีในช่วงเลขคลื่น  $3276-3335\text{ cm}^{-1}$ ,  $2915-2845\text{ cm}^{-1}$ ,  $1460-1465\text{ cm}^{-1}$ ,  $1018-1030\text{ cm}^{-1}$  และ  $718-723\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งช่วงการดูดกลืนที่เลขคลื่น  $2915-2845\text{ cm}^{-1}$ ,  $1460-1465\text{ cm}^{-1}$ ,  $1018\text{ cm}^{-1}$  และ  $718-723\text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้ถึง CH aliphatic, CH<sub>2</sub> และ CH ซึ่งเป็น

องค์ประกอบหลักของ PE (Stark, 2007) และการดูดกลืนรังสีในช่วง  $1028-1030\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-OH stretch และ  $3276-3335\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง OH stretch ซึ่งเป็นลักษณะที่แสดงออกอย่างเด่นชัดของ หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส (Stark and Matuana, 2007) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติม PE ในปริมาณสูงขึ้นวัสดุเชิงประกอบจะมีการดูดกลืนรังสีในช่วงเลขคลื่น  $2915-2845\text{ cm}^{-1}$ ,  $1460-1465\text{ cm}^{-1}$  และ  $718-723\text{ cm}^{-1}$  มากขึ้น และพบว่าจะมีการดูดกลืนรังสีในช่วง  $1028-1030\text{ cm}^{-1}$  ต่ำลง ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR นี้สามารถแสดงถึงองค์ประกอบของ PE ที่มีมากขึ้นวัสดุเชิงประกอบ



**Figure 70.** The FT-IR spectra of composite materials prepared by using Melamine (MEL) as an additive.

Figure 70 แสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เถ้าที่มีการเติม MEL ในปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40 % (w/w) จากสเปกตรัมพบว่า การเติม MEL ลงในวัสดุเชิงประกอบนั้น ไม่มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบภายในวัสดุเชิงประกอบ จากการสังเกตพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ทำการทดสอบมีค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงเลขคลื่น  $3273-3334\text{ cm}^{-1}$ ,  $1325-1550\text{ cm}^{-1}$ ,  $1023-1028\text{ cm}^{-1}$  และ  $809-811\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งช่วงการดูดกลืนที่เลขคลื่น  $1023-1028$  บ่งชี้ถึง C-OH stretch และช่วงเลขคลื่น  $2915-2845\text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้ถึง CH aliphatic ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลสในขี้เถ้า ส่วนการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง  $809-811\text{ cm}^{-1}$  จะบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบที่มี  $-\text{NH}_2$  ซึ่งจะพบเฉพาะในวัสดุเชิงประกอบที่ทำการเติม MEL แต่การดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง  $3273-3334\text{ cm}^{-1}$  นั้นที่สามารถบ่งชี้ OH stretch หรือ NH stretch ก็ได้ และ  $1325-1550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Chen และคณะ (2006) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากเมลามีนจะมี peak ที่ตำแหน่ง  $3468$  และ  $3418\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของหมู่  $-\text{NH}_2$  และที่ตำแหน่ง  $1653-1437\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของหมู่  $-\text{N}=\text{O}$  ( $-\text{N}=\text{O}$  stretching) ภายในโมเลกุลของเมลามีน (Chen *et al.*, 2006) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองของ Chen และคณะ (2006) จากการสังเกตพบว่าเมื่อมีการเติม MEL ในปริมาณที่มากขึ้นจะตรวจพบการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง  $809-811\text{ cm}^{-1}$  มากขึ้นเช่นเดียวกันทั้งนี้เนื่องมาจากการแสดงออกถึง  $-\text{NH}_2$  ที่มีมากขึ้นในองค์ประกอบ

**Table 22.** Properties of composite panels made from various additives.

Additive	Percent added	Code	Density	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	TS 2 hrs. (%)	TS 24 hrs. (%)	WA 2 hrs. (%)	WA 24 hrs. (%)
Control	0%	Control	0.79 ± 0.01	13.50 ± 0.86 <sup>b</sup>	1576 ± 54 <sup>b</sup>	4.58 ± 0.05 <sup>d</sup>	7.67 ± 0.16 <sup>e</sup>	11.61 ± 0.29 <sup>b</sup>	27.80 ± 0.58 <sup>b</sup>
	10%	10%MEL	0.80 ± 0.01	16.56 ± 1.99 <sup>b</sup>	1954 ± 57 <sup>b</sup>	5.12 ± 0.31 <sup>c</sup>	7.40 ± 0.37 <sup>e</sup>	10.14 ± 0.38 <sup>g</sup>	25.65 ± 0.16 <sup>g</sup>
	20%	20%MEL	0.79 ± 0.03	23.18 ± 1.68 <sup>c</sup>	2699 ± 80 <sup>d</sup>	4.01 ± 0.21 <sup>c</sup>	6.04 ± 0.20 <sup>d</sup>	9.32 ± 0.20 <sup>f</sup>	24.83 ± 0.18 <sup>f</sup>
	30%	30%MEL	0.80 ± 0.02	25.41 ± 1.21 <sup>d</sup>	2712 ± 23 <sup>d</sup>	2.33 ± 0.31 <sup>b</sup>	3.60 ± 0.32 <sup>c</sup>	8.36 ± 0.23 <sup>c</sup>	21.52 ± 0.35 <sup>c</sup>
	40%	40%MEL	0.80 ± 0.02	32.69 ± 1.77 <sup>e</sup>	3122 ± 38 <sup>e</sup>	2.09 ± 0.11 <sup>b</sup>	3.52 ± 0.40 <sup>c</sup>	4.65 ± 0.13 <sup>c</sup>	12.76 ± 0.24 <sup>c</sup>
Polyethylene	10%	10%PE	0.80 ± 0.01	16.10 ± 1.38 <sup>b</sup>	1923 ± 50 <sup>b</sup>	3.78 ± 0.20 <sup>c</sup>	6.34 ± 0.27 <sup>d</sup>	6.36 ± 0.23 <sup>d</sup>	20.73 ± 0.71 <sup>d</sup>
	20%	20%PE	0.79 ± 0.02	23.00 ± 0.33 <sup>c</sup>	2046 ± 66 <sup>c</sup>	1.35 ± 0.13 <sup>a</sup>	2.47 ± 0.47 <sup>b</sup>	3.12 ± 0.30 <sup>b</sup>	10.98 ± 0.59 <sup>b</sup>
	30%	30%PE	0.80 ± 0.02	12.24 ± 1.12 <sup>a</sup>	1539 ± 72 <sup>a</sup>	1.12 ± 0.24 <sup>a</sup>	1.62 ± 0.39 <sup>a</sup>	1.87 ± 0.17 <sup>a</sup>	7.44 ± 0.31 <sup>a</sup>

**Remark:** Values within the same column followed by different letters (a-g) are significantly different at  $p < 0.05$ . Conditioning at 55%RH and 25°C.

### 3.3 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ

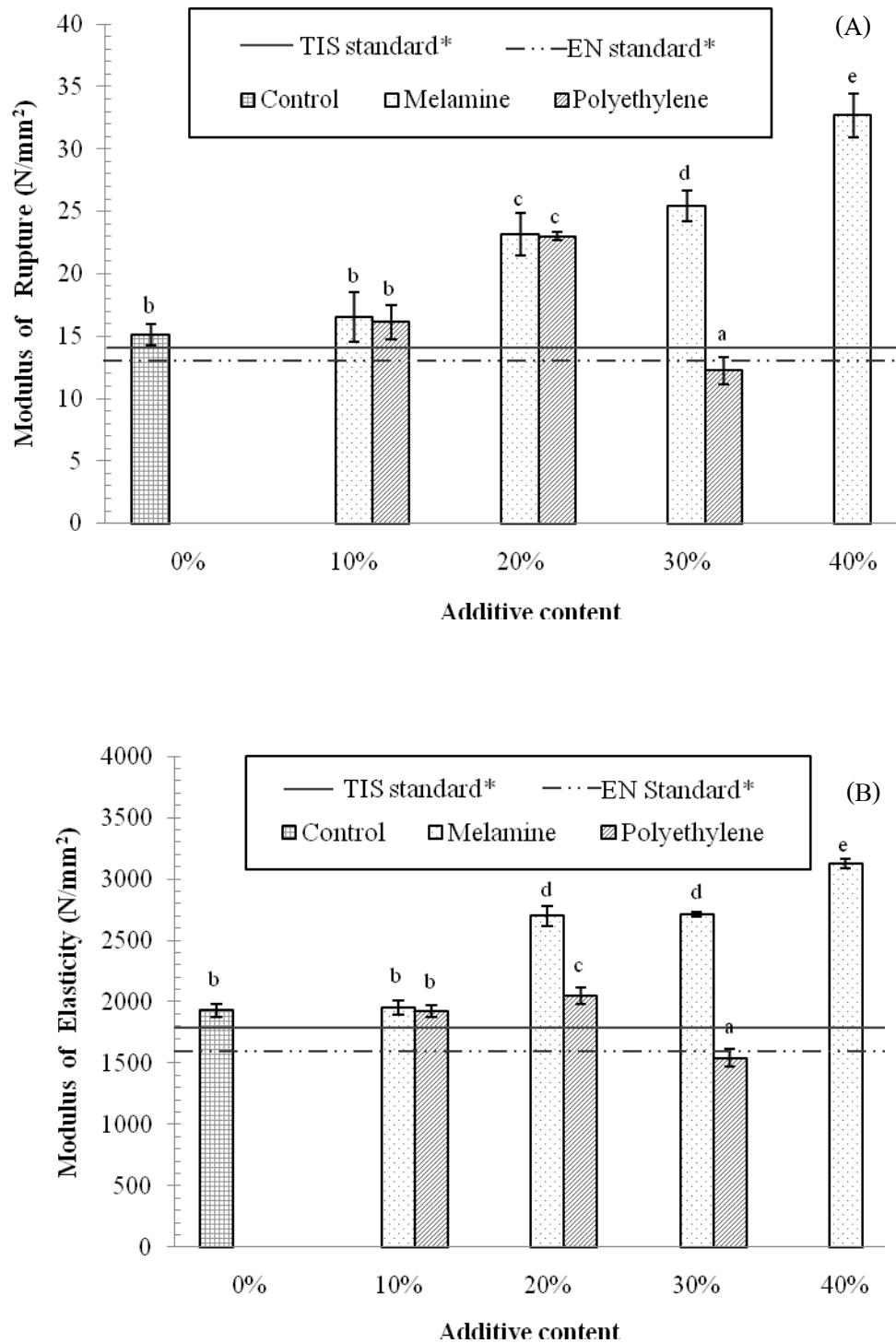
จาก Table 22 แสดงสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากจีลีสี่ที่มีการเติมสารเติมแต่ง MEL และ PE จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบจากจีลีสี่ที่ทำการทดลอง มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.79-0.80 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 876-2547

### 3.4 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

จาก Figure 71 แสดงถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ทำการผสมสารเติมแต่ง พบว่าการใช้ MEL เป็นสารเติมแต่งในวัสดุเชิงประกอบ จะสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น ซึ่งเมื่อทำการเติมปริมาณ MEL มากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจาก MEL เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastic) ซึ่งเมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยความร้อนจะเกิดเชื่อมขวางภายในโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของโครงสร้างที่แข็งแรง แต่พลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงนี้จะไม่สามารถนำรีไซเคิลและขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ (Pascault *et al.*, 2002)

การใช้ PE เป็นสารเติมแต่งในวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณ 10 และ 20% พบว่าค่า MOR มีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกับการใช้ MEL เป็นสารเติมแต่ง แต่ค่า MOE ของการใช้ PE จะมีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองควบคุมแต่จะมีค่าน้อยกว่าการใช้ MEL เป็นสารเติมแต่ง เมื่อทำการเติม PE ปริมาณ 30% พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบมีค่าต่ำลงและมีค่าน้อยกว่าชุดการทดลองควบคุม ซึ่งสมบัติเชิงกลต่ำกว่ามาตรฐาน มอก.876-2547 และ EN 312 เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติม PE ปริมาณ 30% ร่วมกับภาพถ่าย SEM พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE ปริมาณ 30% จะมีช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งช่องว่างนี้จะสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงน้อยลงและสามารถเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวได้ง่าย (Huang and Talreja, 2005) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เติม PE ปริมาณ 30% มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น

จากการทดลองพบว่าการเติมสารเติมแต่ง MEL และ PE จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าการเติม PE ในวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณ 20% จะมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุดในชุดการทดลองที่เติม PE ด้วยกัน แต่การใช้ MEL เติมลงในวัสดุเชิงประกอบปริมาณ 40% จะมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุดในชุดการทดลองทั้งหมด



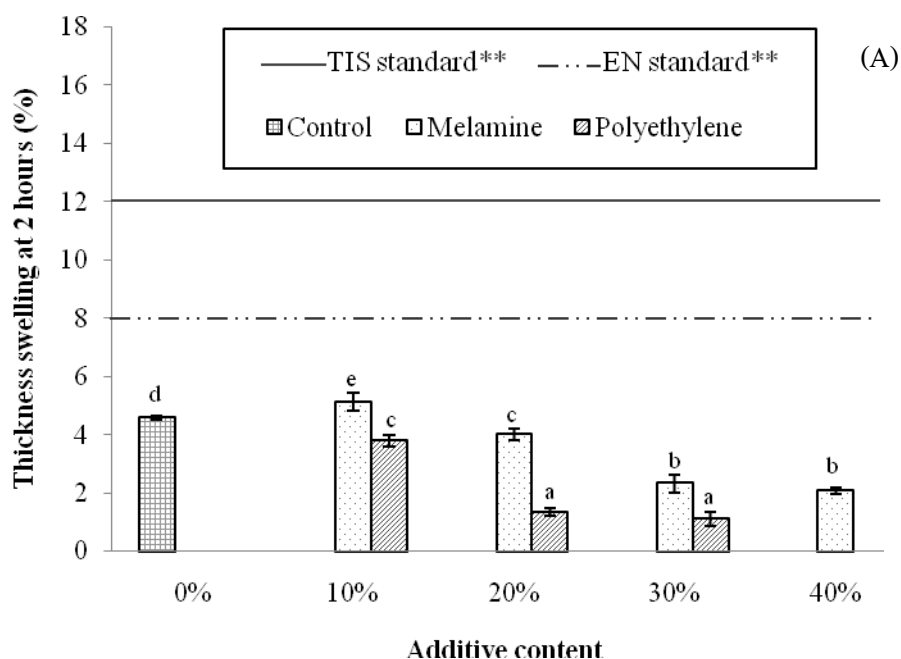
**Figure 71.** Mechanical properties of the composite panel made from various additives: (A) Modulus of Rupture (MOR) and (B) Modulus of Elasticity (MOE). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate the minimum requirement of standards.

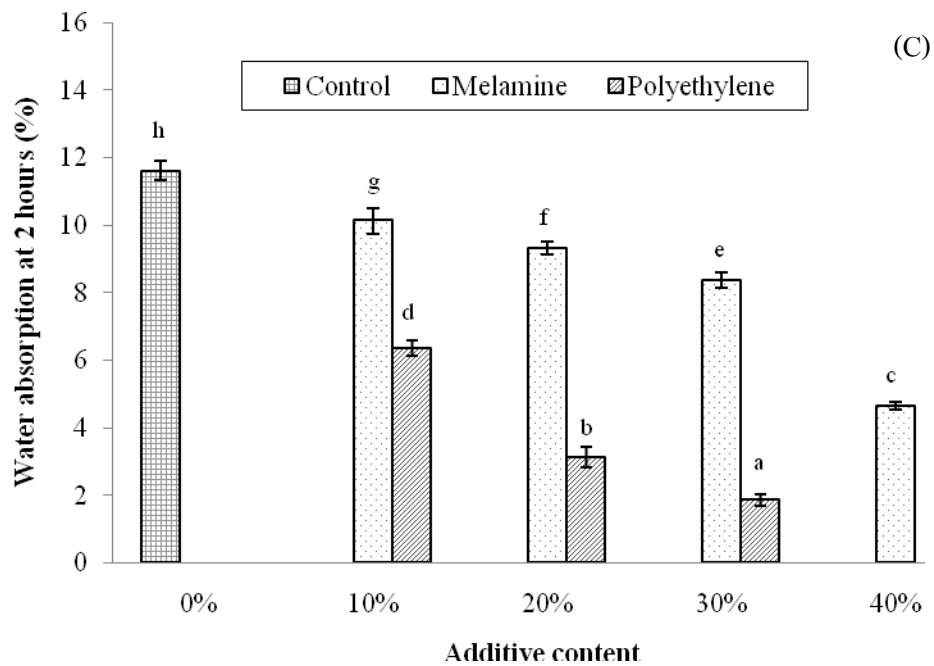
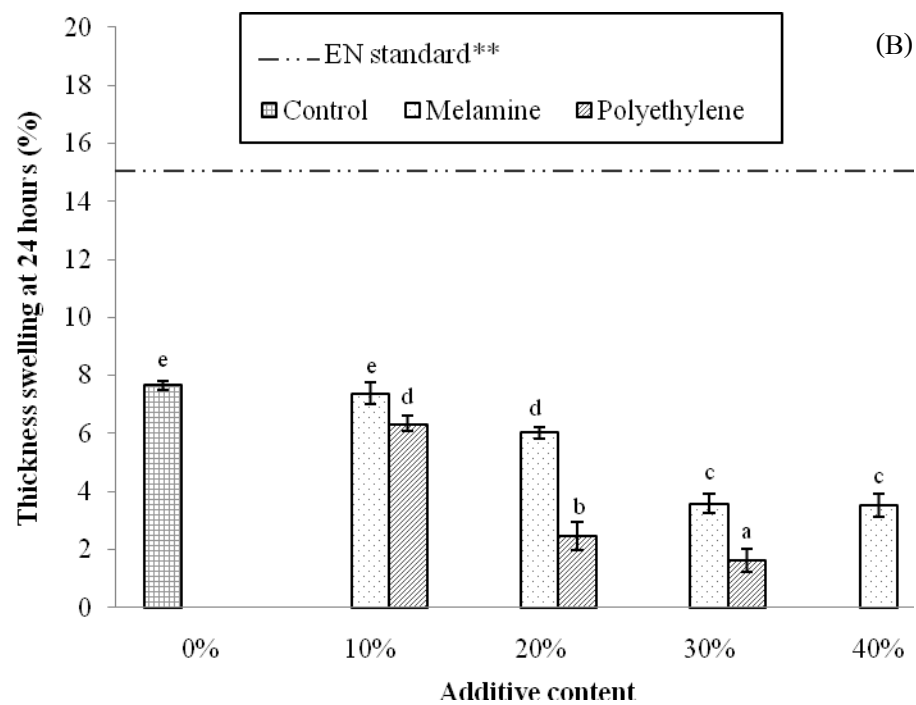


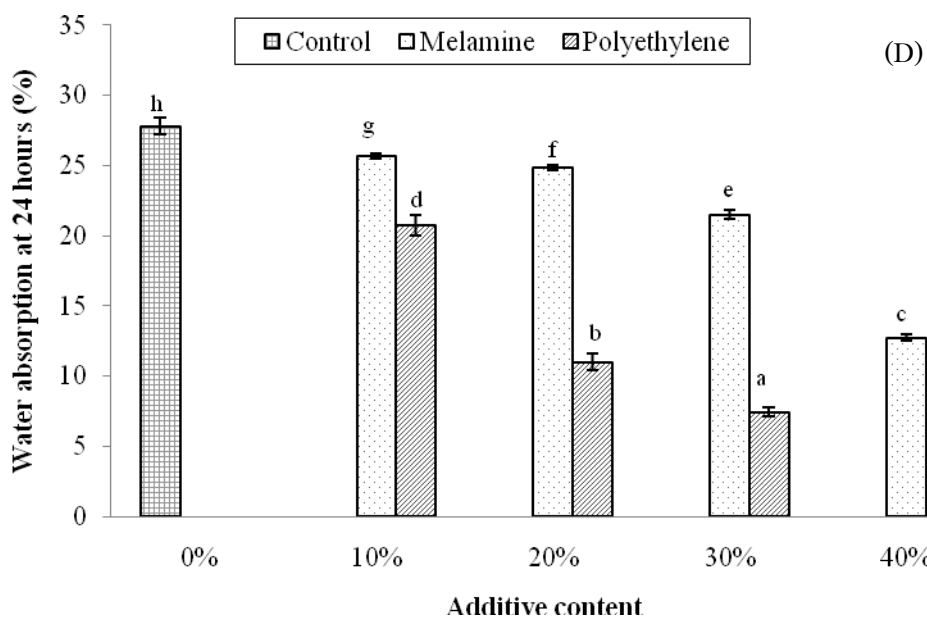
### 3.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

จาก Figure 72 แสดงสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่ทำการเติม MEL และ PE จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ทำการเติมสารเติมแต่งทุกชุดการทดลองสามารถผ่านมาตรฐาน มอก. 876-2547 และ EN 312 ได้ จากการสังเกตพบว่าการเติมสารเติมแต่งในวัสดุเชิงประกอบสามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการต้านทานน้ำสูงขึ้น ซึ่งเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบได้ดีขึ้น (ค่า TS และ WA มีค่าลดลง) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE กับ MEL ที่ปริมาณการเติมที่เท่ากัน

พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE จะมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีกว่าการเติม MEL โดยการเติม PE ที่มีสมบัติการต้านทานน้ำดีที่สุดคือ การเติม PE ปริมาณ 30% แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับภาพถ่าย SEM พบว่าการเติม PE ปริมาณ 30% จะมีช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบ เพราะฉะนั้นการเติม PE ในวัสดุเชิงประกอบปริมาณ 20% จึงมีความเหมาะสมมากกว่าการเติมที่ปริมาณ 30%







**Figure 72.** Water resistance properties of the composite panel made from various additives: (A) Thickness swelling at 2 hours (TS 2 hrs.), (B) Thickness swelling at 24 hours (TS 24 hrs.), (C) Water absorption at 2 hours (WA 2 hrs.) and (D) Water absorption at 24 hours (WA 24 hrs.). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate the maximum requirement of standards.

### 3.6 ผลของสารเติมแต่งที่มีต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบ

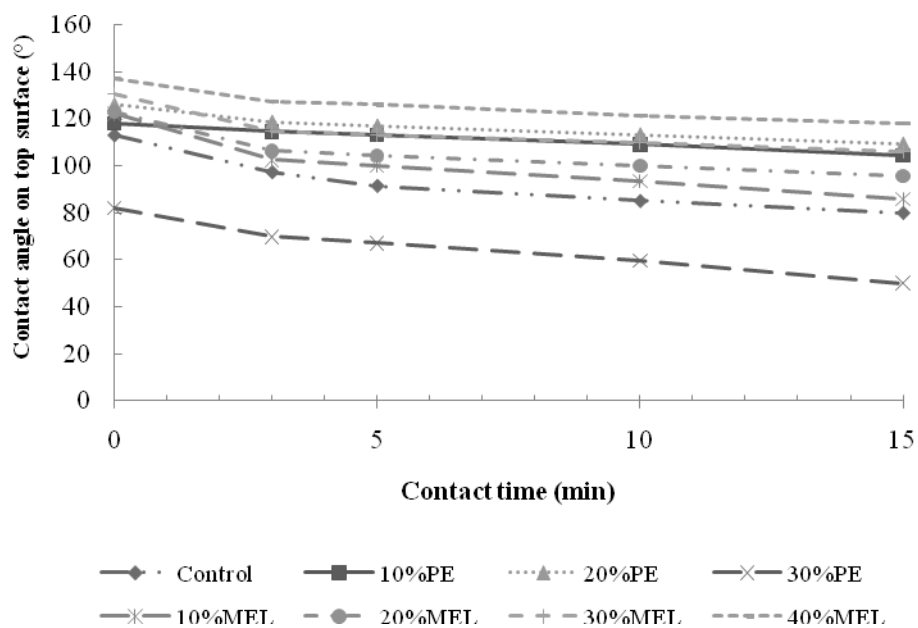
การศึกษามุมสัมผัสของหยดน้ำบริเวณผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบเพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุเชิงประกอบได้ ซึ่งการทดลองจะทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่บริเวณด้านผิวหน้าและขอบของวัสดุเชิงประกอบแสดงผลดัง Table 23

จาก Figure 73 แสดงผลของสารเติมแต่งที่มีต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเริ่มต้นจนถึงเวลา 15 นาที ของวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารเติมแต่ง PE และ MEL จะมีค่าของมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ผลที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าของมุมสัมผัสที่มากกว่าชุดการทดลองควบคุม เนื่องจากชุดการทดลองควบคุมจะมีการเปลี่ยนของมุมสัมผัสของหยดน้ำจาก  $113.18^\circ$  เป็น  $80.03^\circ$  ซึ่งแสดงผลของสมบัติจากไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ไปเป็นชอบน้ำเล็กน้อย (Less strongly hydrophilic) แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE ในปริมาณ 30% จะมีมุมสัมผัสของหยดน้ำเริ่มต้นจนถึงเวลา 15 นาที จะมีค่าของมุมสัมผัสจาก  $82.12^\circ$  เป็น  $50.06^\circ$  ซึ่ง

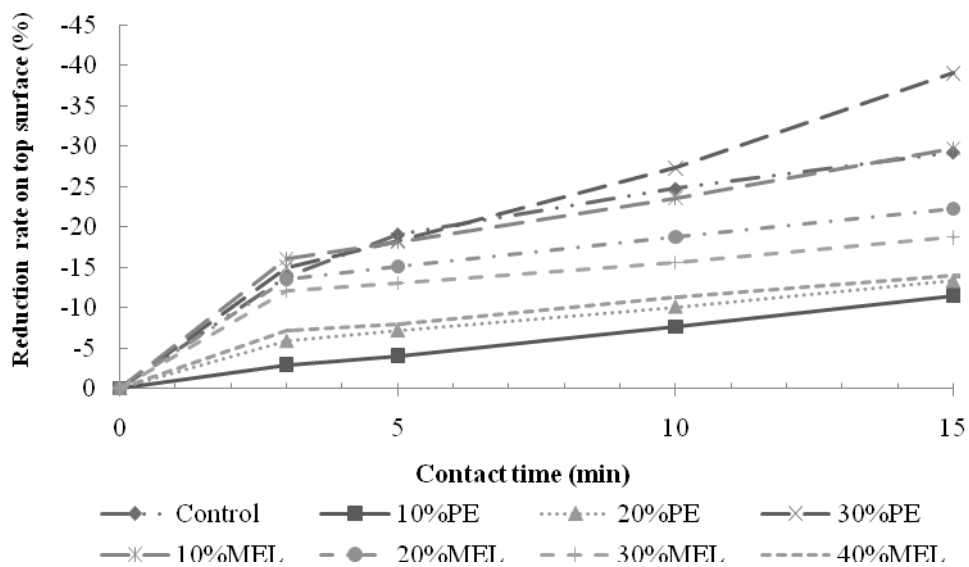
เป็นลักษณะของวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำเล็กน้อย (Less strongly hydrophilic) ไปเป็นชอบน้ำมากขึ้น แต่เนื่องจากค่ามุมสัมผัสที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบมีมุมสัมผัสเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้สามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำได้ยาก จึงนำผลของมุมสัมผัสที่บริเวณผิวของวัสดุเชิงประกอบมาทำการคำนวณเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปร้อยละของอัตราการลดลงของมุมสัมผัส ดังแสดงใน Figure 74 พบว่าเมื่อเติม 10%PE, 20%PE, 20%MEL, 30%MEL และ 40% MEL จะมีค่าร้อยละอัตราการลดลงของมุมสัมผัสน้อยกว่าชุดการทดลองควบคุม ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นแสดงถึงความสามารถในการต้านทานน้ำที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบที่มากขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำและความชื้นของวัสดุเชิงประกอบจะสามารถเกิดได้ทั้งทางด้านผิวหน้าและด้านขอบของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่บริเวณขอบของวัสดุเชิงประกอบแสดงใน Figure 75 พบว่าผลของมุมสัมผัสที่ทดสอบที่บริเวณขอบของวัสดุเชิงประกอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของมุมไปอย่างรวดเร็ว และพบว่าในตัวอย่างชุดการทดลองควบคุมและ 30%PE จะมีการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดไปเป็น  $0^{\circ}$  ที่เวลา 10 และ 15 นาทีตามลำดับ แต่วัสดุเชิงประกอบที่ทำการเติม 10%PE, 20%PE, 10%MEL, 20%MEL, 30%MEL และ 40%MEL มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่บริเวณขอบของวัสดุเชิงประกอบมีมุมสัมผัสเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้สามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำได้ยาก จึงพิจารณาผลในรูปของร้อยละอัตราการลดลงของมุมสัมผัส จาก Figure 76 พบว่าร้อยละของอัตราการลดลงของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ขอบของวัสดุเชิงประกอบที่เติม 20%PE และ 40%MEL มีร้อยละของอัตราการลดลงของมุมสัมผัสใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยที่สุด

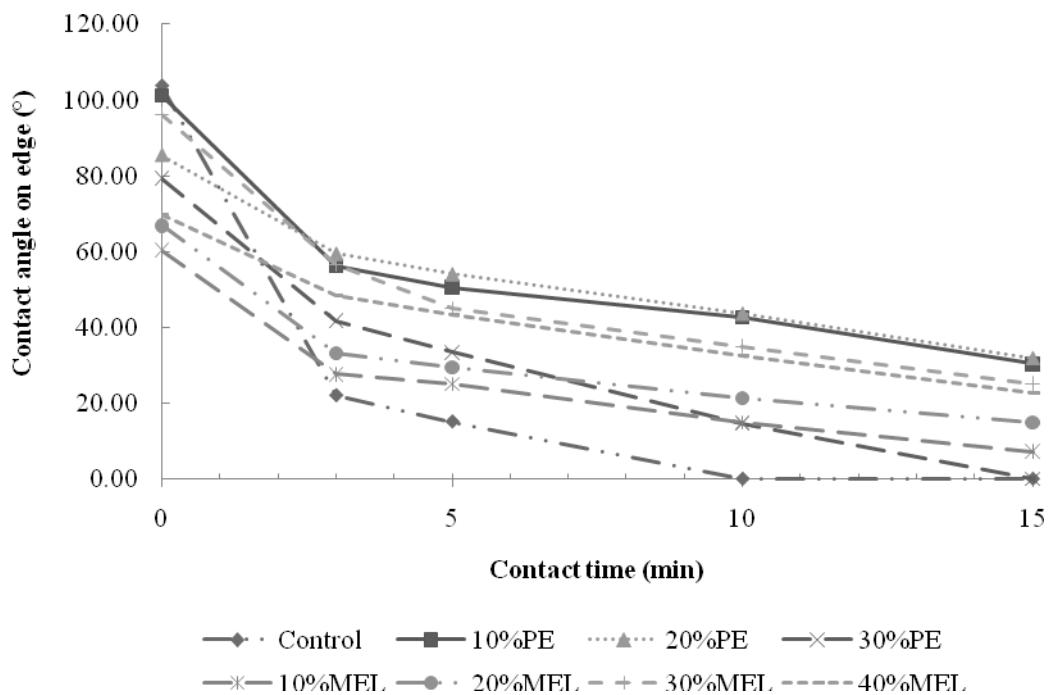
เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้จากการวัดมุมสัมผัสกับสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าผลการศึกษามุมสัมผัสที่บริเวณขอบของวัสดุเชิงประกอบจะมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำ (ค่า TS และ WA) จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสังเกตได้ว่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดที่บริเวณขอบของวัสดุเชิงประกอบได้ดีกว่าที่บริเวณผิวหน้า แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าการวัดมุมสัมผัสจะมีความแตกต่างกับการหาค่า TS และ WA เนื่องจากมีเวลาการสัมผัสของน้ำกับตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน ซึ่งการวัดมุมสัมผัสจะวัดเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าบางส่วน of วัสดุเชิงประกอบเท่านั้น แต่ค่า TS และ WA เป็นผลของการแช่วัสดุเชิงประกอบตัวอย่างลงในน้ำทั้งสิ้น



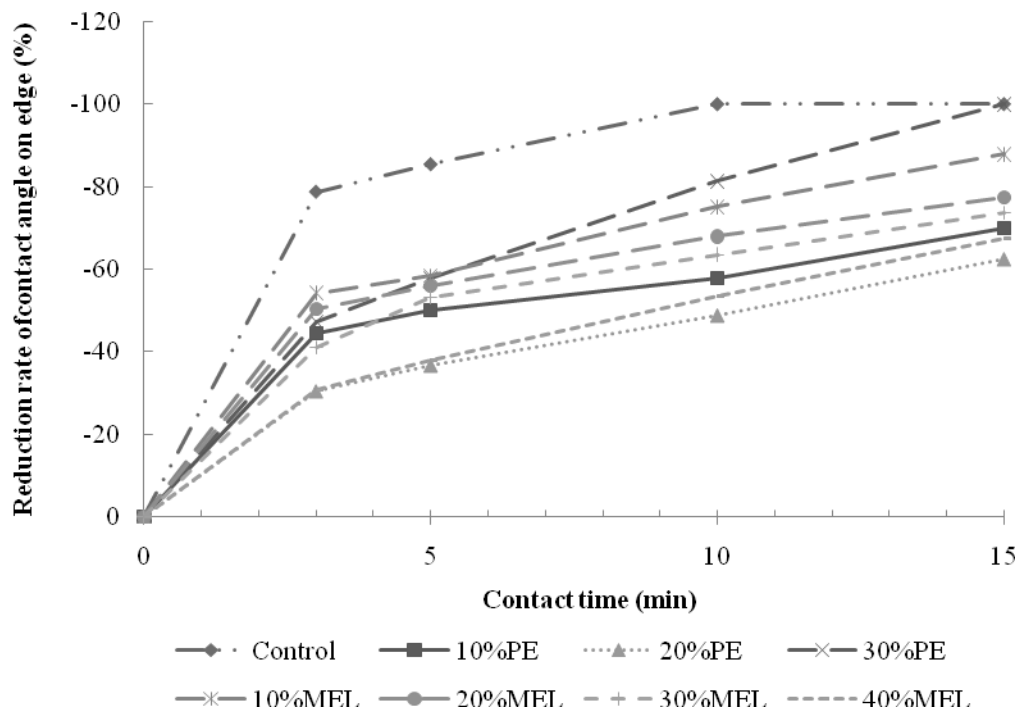
**Figure 73.** Contact angle on top surface of composite materials made from various additives.



**Figure 74.** Percent reduction rate of contact angle on top surface of composite materials made from various additives.



**Figure 75.** Contact angle on edge of composite materials prepared by using various additives.



**Figure 76.** Reduction contact angle on edge of composite materials prepared by using various additives.

**Table 23.** Contact angle and percent reduction rate of contact angle on top surface of composite material prepared by using various additives.

Contact time (min)	Control		10%PE		20%PE		30%PE		10%MEL		20%MEL		30%MEL		40%MEL	
	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)
0	113.18	0.00	118.13	0.00	126.05	0.00	82.12	0.00	122.24	0.00	123.09	0.00	130.42	0.00	137.03	0.00
3	97.44	-13.91	114.64	-2.95	118.68	-5.85	69.78	-15.03	102.56	-16.10	106.43	-13.53	114.68	-12.07	127.19	-7.18
5	91.58	-19.08	113.34	-4.05	116.98	-7.20	67.03	-18.38	100.03	-18.17	104.44	-15.15	113.36	-13.08	126.04	-8.02
10	85.15	-24.77	109.11	-7.64	113.31	-10.11	59.71	-27.29	93.40	-23.59	99.94	-18.81	110.10	-15.58	121.52	-11.32
15	80.03	-29.29	104.51	-11.53	109.29	-13.30	50.06	-39.04	85.94	-29.70	95.71	-22.24	106.02	-18.71	117.94	-13.93

**Remark:** CA is contact angle and RR is reduction rate.

**Table 24.** Contact angle and percent reduction rate of contact angle on edge surface of composite material prepared by using various additives.

Contact time (min)	Control		10%PE		20%PE		30%PE		10%MEL		20%MEL		30%MEL		40%MEL	
	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)	CA (°)	RR (%)
0	103.68	0.00	101.24	0.00	85.43	0.00	79.32	0.00	60.45	0.00	66.91	0.00	96.27	0.00	69.78	0.00
3	22.02	-78.76	56.23	-44.46	59.45	-30.41	41.80	-47.30	27.65	-54.26	33.15	-50.46	56.72	-41.08	48.40	-30.64
5	15.11	-85.43	50.62	-50.00	54.09	-36.69	33.46	-57.82	25.07	-58.53	29.48	-55.94	45.09	-53.16	43.25	-38.02
10	0.00	-100.00	42.73	-57.79	43.71	-48.84	14.77	-81.38	15.01	-75.17	21.41	-68.00	35.08	-63.56	32.53	-53.38
15	0.00	-100.00	30.37	-70.00	32.03	-62.51	0.00	-100.00	7.31	-87.91	15.06	-77.49	25.25	-73.77	22.62	-67.58

**Remark:** CA is contact angle and RR is reduction rate.

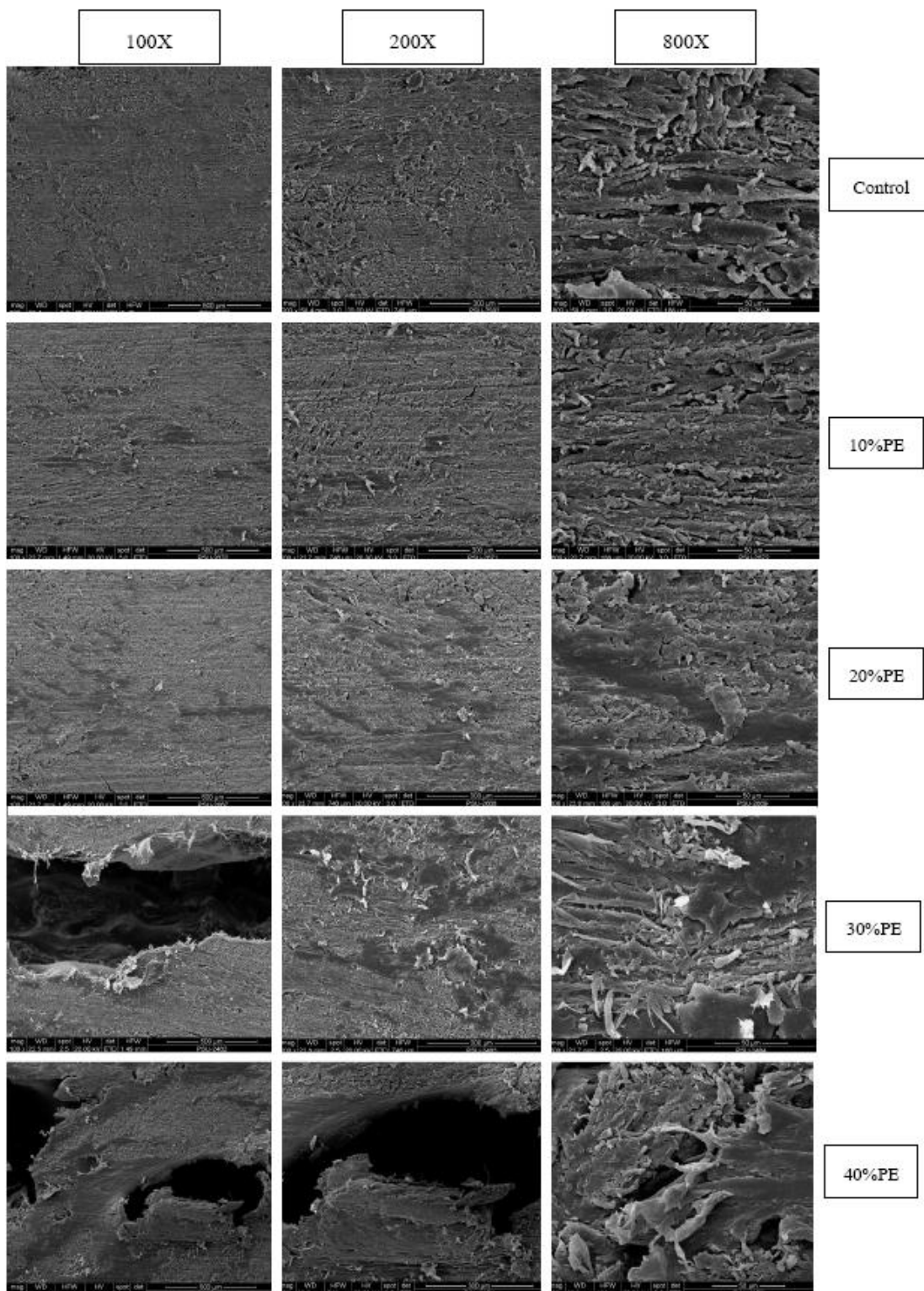
### 3.7 ผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบจากขี้เลื่อยที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 9% และทำการเติม PE และ MEL เป็นสารเติมแต่งในปริมาณ 0 (Control), 10, 20, 30 และ 40% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ดังแสดง Figure 77 และ 78

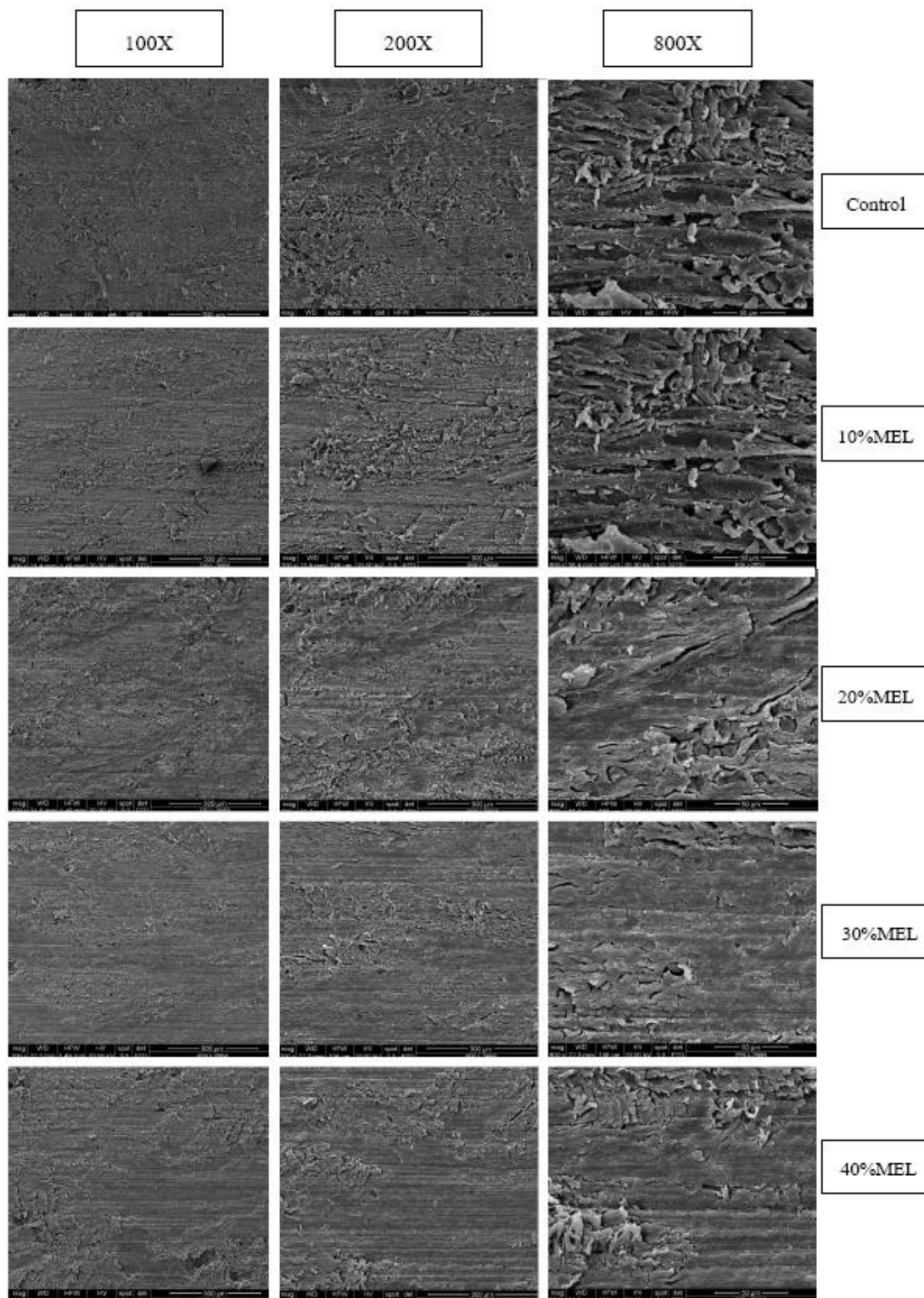
จาก Figure 77 เป็นการแสดงผลภาพ SEM ของการตัดขวางวัสดุเชิงประกอบที่เติม PE จากภาพพบว่า การเติม PE ที่ปริมาณ 10 และ 20% วัสดุจะสามารถเข้ากันได้ดี ไม่มีรอยแยกภายในวัสดุ เนื่องจากในการทดลองมีการใช้ pMDI เป็นสารเชื่อมประสานซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการเชื่อมขวาง (Cross-linking agent) สาร pMDI นี้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและพลาสติก โดย pMDI จะปฏิกิริยายึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของขี้เลื่อยและส่วนที่ไม่มีขี้ของ PE ได้ (Wang *et al.*, 2009) แต่เมื่อทำการเติม PE ที่ปริมาณ 30 และ 40% เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุเชิงประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดจากความแตกต่างของขี้ของวัสดุทำให้ไม่สามารถความเข้ากันได้ (Incompatibility) ซึ่งเกิดจากขี้เลื่อยเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีขี้ แต่ PE เป็นวัสดุที่ไม่มีขี้ (Coutinho, 2000) และปริมาณของ pMDI ที่เติมลงไปปริมาณ 9% อาจจะไม่เพียงพอต่อการทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานเนื่องจากมีการเติม PE มากขึ้น

Figure 78 เป็นการแสดงผลภาพ SEM ของการตัดขวางวัสดุเชิงประกอบที่เติม MEL จากการสังเกตพบว่าขี้เลื่อยและ MEL มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเติม MEL ในปริมาณที่มากขึ้น วัสดุเชิงประกอบจะมีลักษณะความเป็นรูพรุนน้อยลง และสามารถเกิดการผสมที่เข้ากันได้ดีของ MEL ในวัสดุเชิงประกอบ ทั้งนี้เนื่องมาจาก MEL เป็นสารที่มีขี้สามารถทำการผสมเข้ากันได้ดีในวัสดุเชิงประกอบ





**Figure 77.** SEM graphs of the cross-section of composite from sawdust prepared by using polyethylene (PE).



**Figure 78.** SEM graphs of the cross-section of composite from sawdust prepared by using Melamine (MEL).

จากการทดลองในตอนที่ 3 สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเติมสารเติมแต่ง ได้แก่ PE และ MEL จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบได้แตกต่างกัน โดยที่การเติม PE จะมีข้อดีในด้านสมบัติการต้านทานน้ำ และลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบจะมีสีเป็นสีของจี้เหลืองหากต้องการนำไปทำสีเพิ่มเติมจะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสีไม่ผิดเพี้ยนไปจากต้องการ แต่การเติม PE นี้จะมีข้อจำกัดในด้านปริมาณการเติม โดยจะต้องมีการใช้ปริมาณของ pMDI ที่เหมาะสม

ส่วนการเติม MEL จะมีความสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบได้ดี แต่ลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีสีขาวตามสีของ MEL หากต้องการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำสี อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสีผิดเพี้ยนไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

#### ตอนที่ 4 การขยายขนาดการผลิตสู่กระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า

ผลิตภัณฑ์เชิงการค้าที่ใช้เป็นกรณีศึกษาคือ การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ของเล่น ซึ่งสมบัติที่ใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินของผลิตภัณฑ์ของเล่นภายในโรงงาน คือ การทดสอบตกกระแทก (Drop test) แบบอิสระที่ความสูง 90 เซนติเมตร จำนวน 4 ครั้ง แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบผลิตภัณฑ์จะทำการทดสอบกับผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Finished product) เท่านั้น ซึ่งหากมีปัญหาระหว่างกระบวนการผลิตในขั้นตอนการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เวลา และต้นทุนการผลิตได้ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบในขั้นตอนการผลิตเป็นแผ่นเพื่อการเพิ่มผลผลิตอีกทางหนึ่ง

การขยายขนาดการผลิตวัสดุเชิงประกอบจากระดับห้องปฏิบัติการไปสู่การเตรียมผลิตเชิงการค้า จะมีการอ้างอิงการปฏิบัติ แต่ต้องมีการปรับปรุงวิธีการ ขั้นตอน ตลอดจนวัตถุดิบ เพื่อให้เหมาะสมแก่การผลิตจริงเชิงการค้า

##### 4.1 ข้อแตกต่างของกระบวนการผลิตจริงในอุตสาหกรรมกับการผลิตในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเบื้องต้น ณ สถานฝึกปฏิบัติการ พบว่าการผลิตวัสดุเชิงประกอบในการผลิตเชิงการค้ามีข้อแตกต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการอยู่หลายประการ โดยข้อแตกต่างมีอยู่ 4 ประการหลัก ได้แก่ ขนาดอนุภาคของขี้เลื่อย (Table 25), ความชื้นของวัสดุในกระบวนการผลิต (Table 26), อุณหภูมิของเครื่อง Compression molding (Table 27) และความหนาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ

จาก Table 25 พบว่าขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเชิงการค้าที่มีการใช้จริงจะมีขนาดแตกต่างกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือหลักของทางโรงงานมีเป็นปริมาณมาก หากนำมาใช้เพียงบางขนาดจะทำให้มีปัญหาของ ขี้เลื่อยส่วนเกินที่ไม่ได้นำไปใช้เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาแล้วในตอนต้นที่ 1 พบว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโดยตรง จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาคขี้เลื่อยผสม เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีความเหมาะสมต่อการผสมเป็นของเล่นต่อไป

เนื่องจากวิธีการร่อนขี้เลื่อยเพื่อแยกขนาดในการผลิตเชิงการค้าใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาเพื่อใช้ภายในบริษัท ซึ่งขนาดของอนุภาคขี้เลื่อยที่ได้หลังจากการร่อนอาจมีความคาดเคลื่อนไปจากมาตรฐาน จึงนำขี้เลื่อยขนาดผสม (ชุดการทดลองที่ 1 และ 2) มาทำการร่อนด้วยเครื่องร่อนที่ได้มาตรฐานภายในห้องปฏิบัติการได้ผลดัง Table 25 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชุด

การทดลองที่ 1 และ 2 โดยการร่อนผ่านตะแกรงโดยนำขี้เลื่อยมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh (รูเปิดขนาด 2.00 mm), 20 mesh (รูเปิดขนาด 0.85 mm) และ 35 mesh (รูเปิดขนาด 0.50 mm) ตามลำดับ พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีขนาดอนุภาคที่ 0.50-0.84 mm มากที่สุด (38.2%) รองลงมาคือขนาด < 0.50 mm (33.33%), 0.84-2.00 mm (21.80%) และขี้เลื่อยขนาด > 2.00 mm (6.67%) ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 มีขนาดอนุภาคที่ 0.50-0.84 mm มากที่สุด (56.54%) รองลงมาคือขนาด 0.84-2.00 mm (32.65%), > 2.00 mm (10.81%) และขี้เลื่อยขนาด < 0.50 mm (0.02%) ตามลำดับ

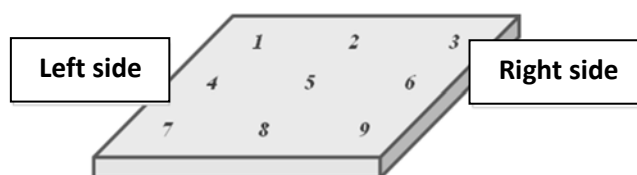
**Table 25.** Size distribution of sawdust used in pilot scale.

No.	Particle size (mm)	Sieve (mesh)	Percent by weight	
			Mixed sizes ratio 1: 1	Mixed sizes ratio 1: 1: 2
1.	> 2.00 mm	Upper 10 mesh	10.81%	6.67%
2.	0.84-2.00 mm	10-20 mesh	32.65%	21.80%
3.	0.50-0.84 mm	20-35 mesh	56.54%	38.20%
4.	< 0.50 mm	Under 35 to pan mesh	0.02%	33.33

Table 26 แสดงความชื้นของวัสดุในขั้นตอนต่างๆ ในระหว่างกระบวนการผลิตจากการสังเกตพบว่าวัสดุที่พร้อมสำหรับการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ (ขี้เลื่อยผสมสีหลังอบแห้งผสมขาว) จะมีความชื้นเท่ากับ 16.52% (วัดความชื้นโดยการสุ่มตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ) จะแตกต่างกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมความชื้นของขี้เลื่อยไม่เกิน 5% เนื่องจากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเชิงการค้าเป็นสินค้าใหม่ของผู้ผลิตจึงไม่มีเครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะสำหรับใช้ควบคุมความชื้น เช่น ตู้อบ จึงประยุกต์ใช้ห้องสำหรับอบเพื่อลดความชื้นไม้ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิห้องอบที่ 70°C ใช้เวลาในการอบ 24 ชั่วโมง และโรงงานไม่มีอุปกรณ์สำหรับหาความชื้นของขี้เลื่อยก่อนนำไปผสมขาวและขึ้นรูป

**Table 26.** Moisture content of materials used in pilot scale.

No.	Step	Moisture content (%)
1.	Sawdust in stock	$9.66 \pm 1.22$
2.	Colored sawdust (Before drying)	$23.23 \pm 3.45$
3.	Colored sawdust (After drying)	$15.78 \pm 1.21$
4.	Colored sawdust (After drying) mixed with glue	$16.52 \pm 1.05$
5.	pMDI adhesive	$0.00 \pm 0.10$
6.	Acrylic color	$86.48 \pm 4.62$

**Figure 79.** Compression molding in pilot scale.**Figure 80.** Position of temperature measurement on compression molding plate.

**Table 27.** Temperature control of compression molding.

Plate	Temperature (°C) at Position											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\bar{X}$	SD.	
1	Upper	151.2	148.7	151.4	152.5	149.0	152.0	150.9	150.4	152.0	150.9	1.3
	Lower	146.4	148.3	151.0	147.3	146.9	151.7	152.3	152.7	149.9	149.6	2.4
2	Upper	149.3	148.6	148.3	147.3	149.1	154.4	154.2	154.7	150.4	150.7	2.9
	Lower	149.1	150.1	151.7	149.9	146.9	152.8	152.5	152.3	150.0	150.6	1.9
3	Upper	149.4	150.9	149.4	148.0	146.3	154.7	153.0	154.0	153.0	151.0	2.9
	Lower	148.7	149.4	151.5	148.9	147.7	155.0	154.3	156.5	155.6	152.0	3.4
4	Upper	149.7	149.8	150.9	148.6	145.3	153.9	155.3	154.8	149.1	150.8	3.3
	Lower	149.8	150.6	151.6	148.3	147.2	154.6	156.6	157.4	154.7	152.3	3.7

จาก Table 27 แสดงอุณหภูมิของเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่โรงงาน พบว่าอุณหภูมิที่ใช้มีค่าเท่ากับ  $151.0 \pm 2.80^\circ\text{C}$  ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมที่  $125 \pm 5^\circ\text{C}$  แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่โรงงานจะมีความสัมพันธ์กันกับความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่จะทำการผลิต

**Table 28.** The differences of process between laboratory and pilot scale.

No.	Difference	Laboratory scale	Pilot scale	Remark
1	Particle size	0.50-0.84	Mixed sizes	Table 25
2	Moisture content	<5%MC	16.52%MC	Table 26
3	Temperature	$125 \pm 5^\circ\text{C}$	$151.0 \pm 2.80^\circ\text{C}$	Table 27
4	Target thickness	6 mm	10 mm	-

#### ข้อจำกัดของการผลิตเชิงการค้า

- 4 เครื่องร้อนเป็นเครื่องที่ผลิตเพื่อใช้ใน โรงงาน มีขนาดของรูตะแกรงไม่ได้มาตรฐาน
- 4 ทางโรงงานไม่มีตู้อบจึงต้องประยุกต์ใช้ห้องสำหรับอบไม้ที่มีอุณหภูมิของห้องอบที่  $70^\circ\text{C}$
- 4 ทางโรงงานไม่มีเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับหาความชื้น ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความชื้นของขี้เลื่อยที่แน่นอนก่อนนำไปคำนวณส่วนผสมได้

#### 4.2 ปัญหาของการผลิตผลิตภัณฑ์ของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบเชิงการค้า (Figure 81)

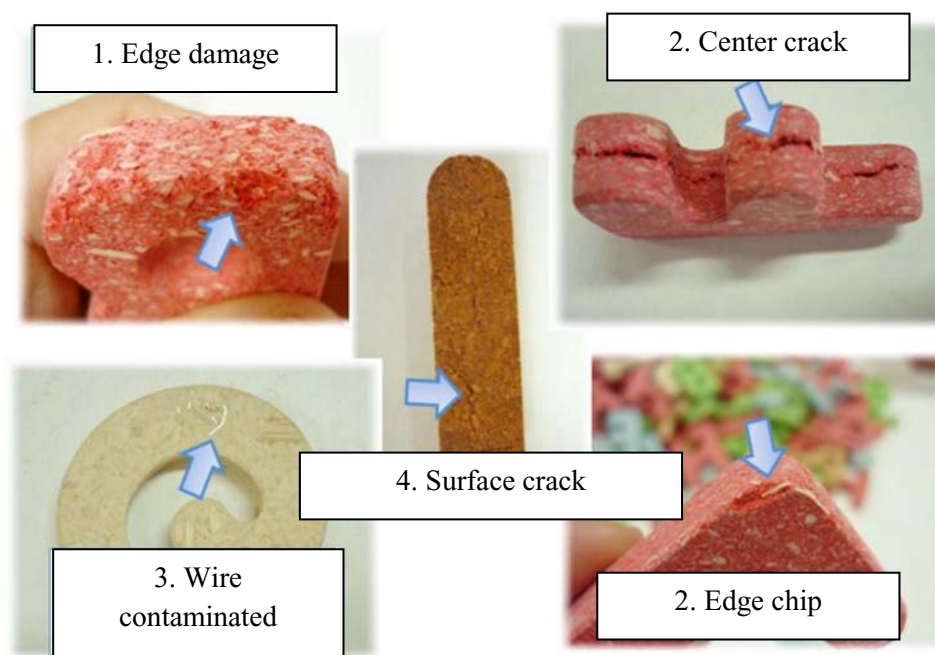
4.2.1 ขอบรุ่ม มีรูพรุนมากเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุไม่สม่ำเสมอ (41% ของปัญหาทั้งหมด)

4.2.2 มีรอยแตกตรงกลางชิ้นงานเนื่องจากความชื้นของซีเมนต์สูง ทำให้ความชื้นสะสมอยู่ไม่สามารถถูกไล่ออกจากแผ่นวัสดุเชิงประกอบได้หมดในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่น (40.5% ของปัญหาทั้งหมด)

4.2.3 พบเศษลวดในชิ้นงาน เนื่องจากการทำความสะอาดถังผสมสีหรือกาวด้วยแปรงลวดอาจทำให้เศษลวดสามารถหลุดจากแปรงไปปะปนกับวัสดุได้ (0.5% ของปัญหาทั้งหมด)

4.2.4 มีรอยแตกที่ผิวหน้า เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าของเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อน (Compression molding) สูงเกินไป (7% ของปัญหาทั้งหมด)

4.2.5 ขอบชิ้นงานบิ่น เนื่องจากการขัดผิววิธี (11% ของปัญหาทั้งหมด)



**Figure 81.** Defects of toys product made from pilot scale of composite materials.

#### 4.3 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในการผลิตเชิงการค้า

จาก Table 29 แสดงสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบจากซีเมนต์ในการผลิตเชิงการค้าจากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบจากซีเมนต์ที่ทำการทดลอง มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $0.72-0.81 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 876-2547



**Table 29.** Properties of the composite panel made from pilot scale.

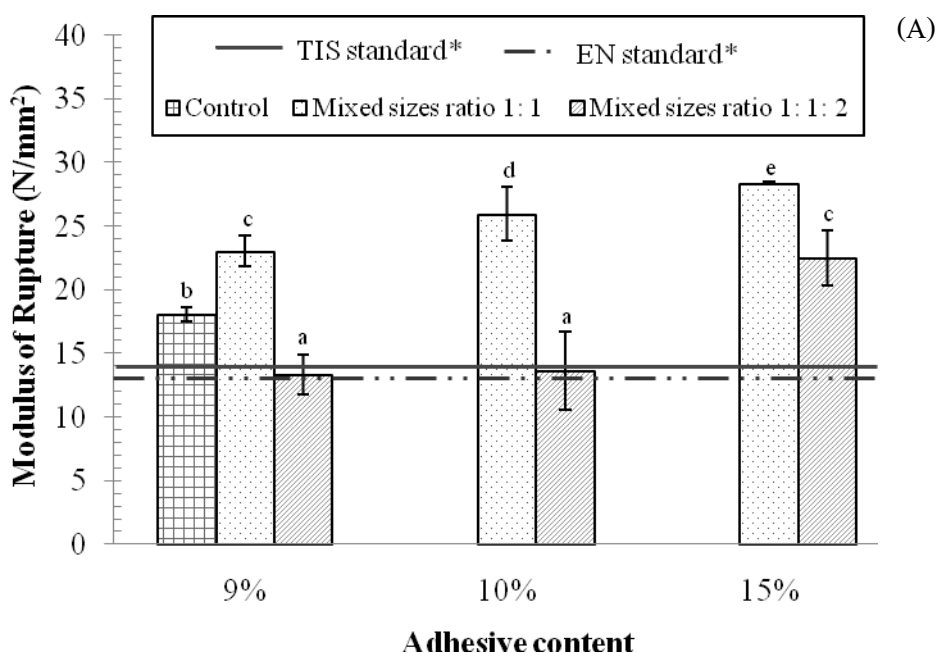
Sample	pMDI content	Density (g/cm <sup>3</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	TH 2 hrs. (%)	TH 24 hrs. (%)	WA 2 hrs. (%)	WA 24 hrs. (%)
Control	9%	0.75 ± 0.03	18.1 ± 0.56 <sup>b</sup>	2027 ± 142 <sup>c</sup>	4.25 ± 0.22 <sup>c</sup>	6.58 ± 0.23 <sup>c</sup>	10.19 ± 0.41 <sup>b</sup>	26.2 ± 0.44 <sup>b</sup>
Mixed sizes ratio	9%	0.72 ± 0.03	23.00 ± 1.21 <sup>c</sup>	2120 ± 97 <sup>cd</sup>	3.72 ± 0.31 <sup>b</sup>	5.58 ± 0.18 <sup>b</sup>	13.32 ± 0.75 <sup>c</sup>	35.64 ± 1.77 <sup>c</sup>
	10%	0.73 ± 0.02	25.94 ± 2.14 <sup>d</sup>	2230 ± 89 <sup>d</sup>	3.28 ± 0.29 <sup>b</sup>	5.60 ± 0.49 <sup>bc</sup>	12.71 ± 1.42 <sup>c</sup>	30.30 ± 1.53 <sup>cd</sup>
	15%	0.79 ± 0.02	28.37 ± 0.13 <sup>e</sup>	2504 ± 123 <sup>e</sup>	1.22 ± 0.33 <sup>a</sup>	1.99 ± 0.20 <sup>a</sup>	10.91 ± 1.65 <sup>bc</sup>	28.24 ± 1.47 <sup>c</sup>
Mixed sizes ratio	9%	0.80 ± 0.01	18.1 ± 0.56 <sup>b</sup>	2027 ± 142 <sup>c</sup>	4.32 ± 0.29 <sup>c</sup>	6.11 ± 0.31 <sup>c</sup>	11.30 ± 1.63 <sup>bc</sup>	27.66 ± 1.49 <sup>bc</sup>
	10%	0.80 ± 0.00	13.3 ± 1.61 <sup>a</sup>	1446 ± 57 <sup>a</sup>	1.68 ± 0.43 <sup>a</sup>	1.98 ± 0.47 <sup>a</sup>	9.10 ± 1.29 <sup>ab</sup>	19.36 ± 0.85 <sup>a</sup>
	15%	0.81 ± 0.00	13.61 ± 3.05 <sup>a</sup>	1459 ± 74 <sup>a</sup>	1.45 ± 0.52 <sup>a</sup>	1.74 ± 0.20 <sup>a</sup>	7.76 ± 1.14 <sup>a</sup>	18.81 ± 1.24 <sup>a</sup>

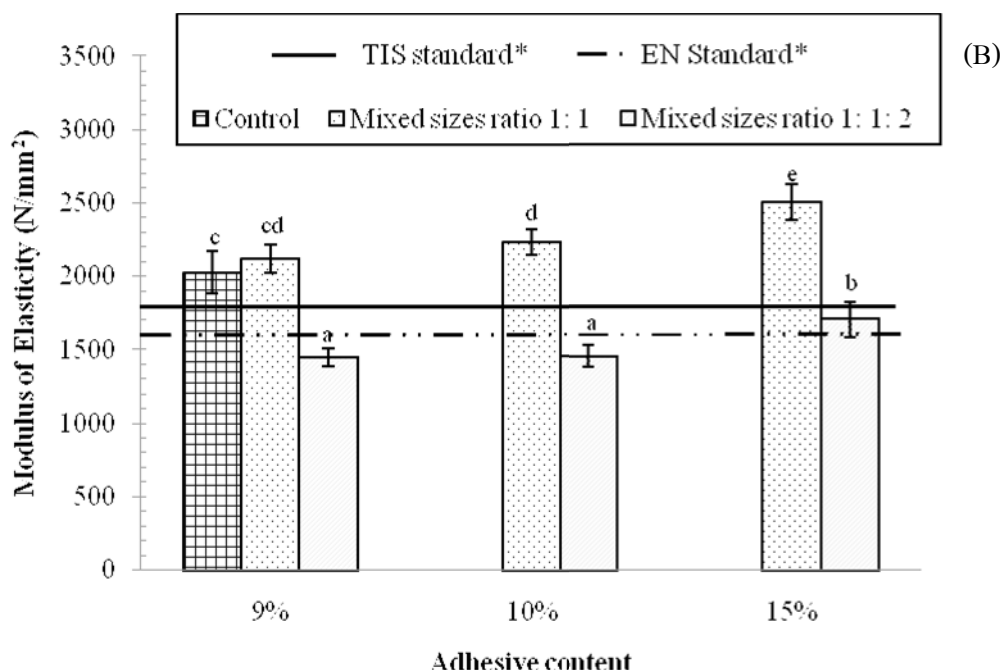
**Remark:** Values within the same column followed by different letters (a-h) are significantly different at  $p < 0.05$ . Conditioning at 55%RH and 25°C.

#### 4.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบในการเตรียมผลิตเชิงการค้า

จาก Figure 82 แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบในการเตรียมผลิตเชิงการค้าที่เตรียมจากซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm ในอัตราส่วน 1: 1 กับซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 พบว่าการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm ในอัตราส่วน 1: 1 ร่วมกับกาว 15% pMDI มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด โดยมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 และชุดการทดลองที่ดีที่สุดจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษาในตอนต้นที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ถึงผลของการเติมซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นของวัสดุเชิงประกอบ

อย่างไรก็ตามการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm ในอัตราส่วน 1: 1 จะให้ผลของสมบัติเชิงกลที่สูงที่สุดและสามารถผ่านมาตรฐาน มอก.876-2547 และ EN 312 แต่การใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm ในอัตราส่วน 1: 1 ทำให้บริเวณขอบของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นช่องว่างดัง Figure 84 ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการใช้ซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 แม้จะมีค่าของสมบัติเชิงกลต่ำกว่ามาตรฐาน มอก.876-2547 และ EN 312 เล็กน้อยแต่ก็สามารถผ่านมาตรฐานภายในของบริษัทผู้ผลิตของเล่นจากไม้ยางพาราได้ (การทดสอบตกกระแทก, Drop test) และมีลักษณะที่ต้องการในผลิตภัณฑ์สุดท้าย อีกทั้งยังสามารถนำซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาค < 1 mm ไปใช้ได้อีกด้วย



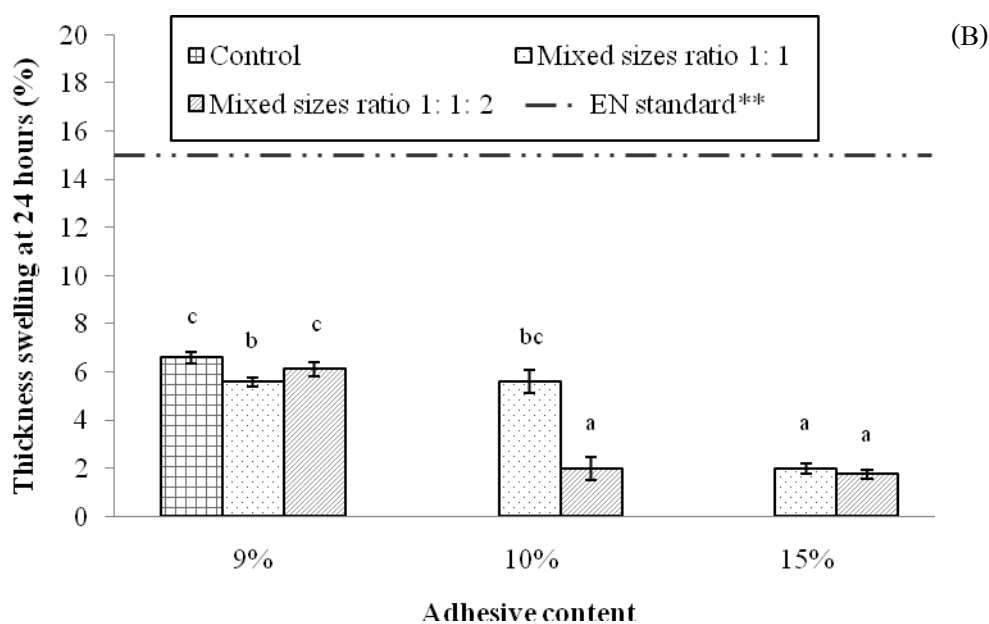
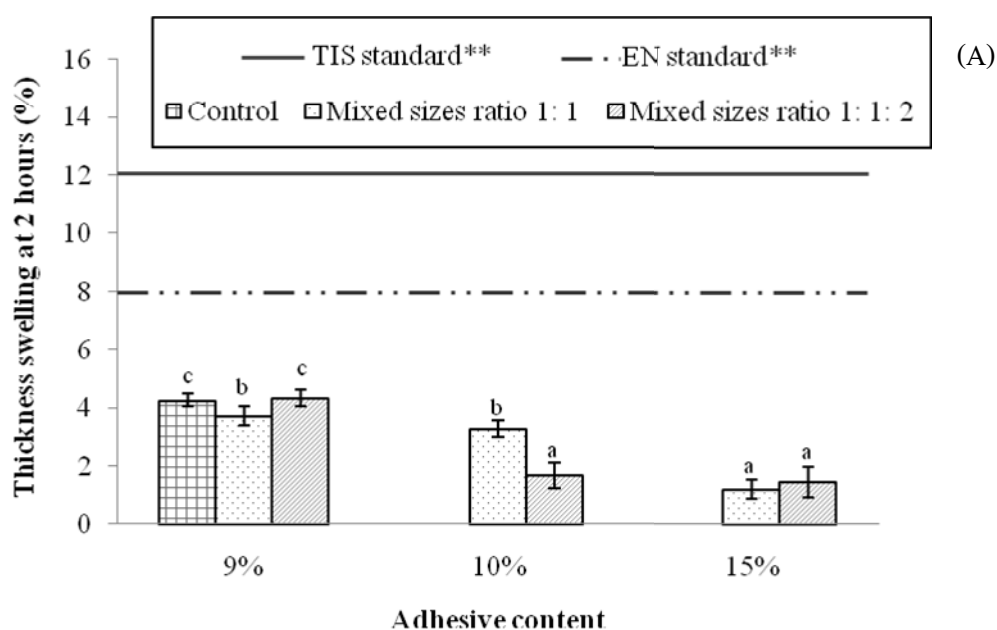


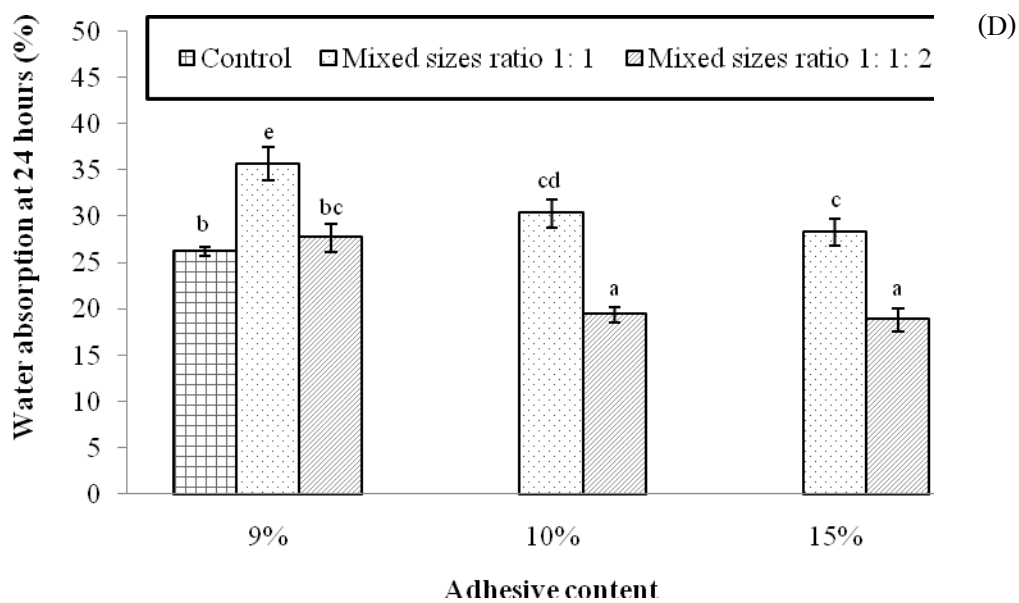
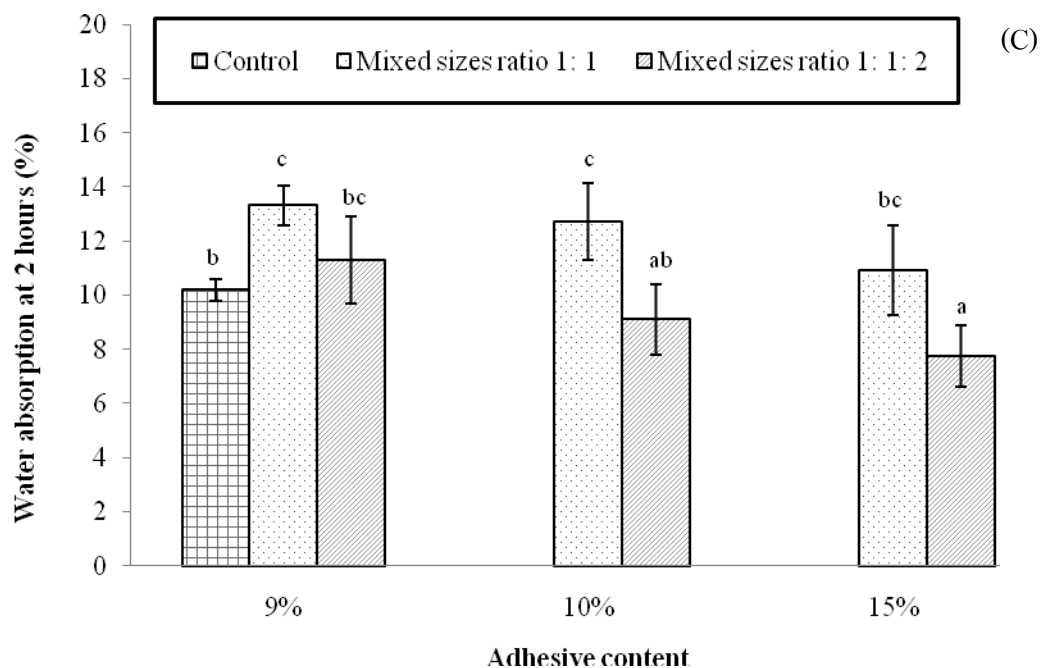
**Figure 82.** Mechanical properties of the composite panel made in pilot scale: (A) Modulus of Rupture (MOR) and (B) Modulus of Elasticity (MOE). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate the minimum requirement of standards.

#### 4.5 สมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบในการผลิตเชิงการค้า

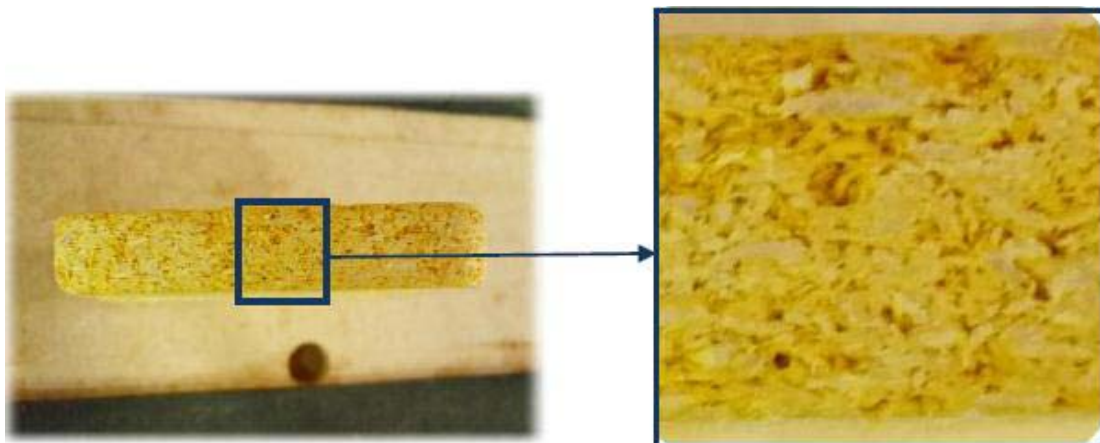
จาก Figure 83 แสดงสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากขี้เลื่อยที่ขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm และ 1 – 3 mm ในอัตราส่วน 1: 1 กับขี้เลื่อยที่ขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 พบว่าการใช้ขี้เลื่อยที่ขนาดอนุภาคผสม 3 – 5 mm, 1 – 3 mm และ < 1 mm ในอัตราส่วน 1: 1: 2 มีสมบัติการต้านทานน้ำสูงกว่าชุดการทดลองที่ดีที่สุดจากห้องปฏิบัติการ และยังสามารถผ่านมาตรฐาน มอก.876-2547 และ EN 312 ได้ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษาในตอนที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ถึงผลของการเติมขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีขึ้นของวัสดุเชิงประกอบ และการใช้กาว pMDI มีผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษาในตอนที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ถึงความสามารถในการต้านทานน้ำได้ดีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI แต่จากการทดลองพบว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในห้องปฏิบัติการแตกต่างจากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในโรงงานที่ไม่สามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ใช้กาว pMDI ปริมาณ 3% และ

6% ได้ ซึ่งได้ผลดัง Figure 85 และ 86 เนื่องจากการผลของความชื้นของวัสดุก่อนการขึ้นรูป ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกาว pMDI ลดลง เนื่องจากกาว pMDI สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของน้ำในวัสดุได้ ทำให้สัดส่วนของกาว pMDI ที่จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลล์ลดลงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบใช้ปริมาณกาว pMDI ที่ปริมาณ 3% และ 6% ได้ ซึ่งผลดังกล่าวจะเกิดบริเวณตรงกลางของวัสดุเชิงประกอบเป็นหลัก เนื่องจากบริเวณตรงกลางของแผ่นจะเป็นจุดที่ร้อนช้าที่สุด (Figure 87) หากมีความชื้นมากอาจจะทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบที่ได้ไม่สมบูรณ์





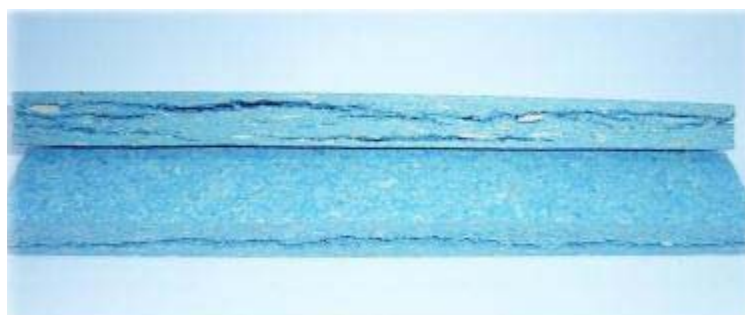
**Figure 83.** Water resistance properties of the composite panel made in pilot scale: (A) Thickness swelling at 2 hours (TH 2 hrs.), (B) Thickness swelling at 24 hours (TH 24 hrs.), (C) Water absorption at 2 hours (WA 2 hrs.) and (D) Water absorption at 24 hours (WA 24 hrs.). Bars represent the standard deviation. Different letters indicate the significant differences ( $p < 0.05$ ). Lines indicate the maximum requirement of standards.



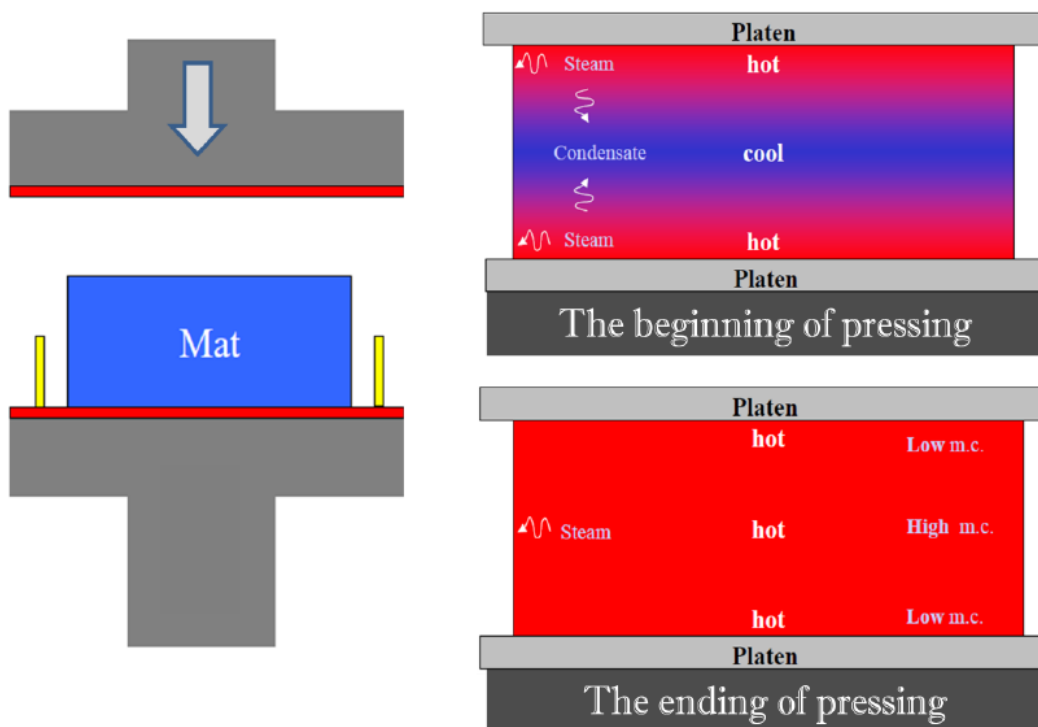
**Figure 84.** Porous defect of composite materials.



**Figure 85.** Composite panel from pilot scale prepared by 3% pMDI.



**Figure 86.** Composite panel from pilot scale prepared by 6% pMDI.



**Figure 87.** Heat transfer within materials during hot compression.

**Source:** Torrey (2001)

#### 4.6 การศึกษาการลดปริมาณสีที่ใช้กับวัสดุเชิงประกอบในการเตรียมการผลิตเชิงการค้า

เนื่องจากการผลิตวัสดุเชิงประกอบภายในห้องปฏิบัติการจะใช้สีน้อยกว่าที่ไม่ได้ย้อมสี แต่การผลิตเชิงการค้าจะมีการย้อมสีที่น้อยกว่าเพื่อให้เกิดสีสันทึบที่สวยงามในผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่มีการทำสีนี้ เดิมทางโรงงานจะมีการผสมสีอะคริลิก (สีผสมน้ำ 1: 2) ปริมาณ 0.93 kg (สีไม่ผสมน้ำเท่ากับ 0.31 kg) ต่อสีน้อยกว่าปริมาณ 1 kg พบว่าต้นทุนวัตถุดิบที่เกิดจากสีเท่ากับ 49.11 บาท คิดเป็น 66.32% ของต้นทุนวัตถุดิบ จากการคำนวณพบว่าค่าใช้จ่ายนี้คิดเป็นต้นทุนหลักของวัสดุเชิงประกอบ

จากการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมการผลิตเชิงการค้า เพื่อการลดต้นทุนการผลิต จึงทำการทดลองลดสีที่ใช้ในการย้อมสีที่น้อยกว่าเพื่อเตรียมแผ่นวัสดุเชิงประกอบเชิงการค้าสีเขียว โดยทำการทดลองลดสีที่ใช้ย้อมลงปริมาณ 2, 3 และ 4 เท่า โดยเทียบกับแผ่นเทียบสี (Pantone) ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมความแตกต่างของสีของผลิตภัณฑ์ โดยมาตรฐานภายในการผลิตเชิงการค้าจะควบคุมความแตกต่างระหว่างการผลิตแต่ละครั้งต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 1 Pantone จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การลดปริมาณสีย้อมลง 2 – 3 เท่า จะมีค่าความแตกต่างของสีไม่เกิน 1 Pantone แต่การลดปริมาณสีย้อมที่น้อยกว่าลง 4 เท่า นั้นจะพบความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับ

วัสดุเชิงประกอบชุดโดยใช้แผ่นเทียบสี แต่การลดปริมาณสีข้อมลง 2 – 3 เท่า จะไม่พบความแตกต่างของสีโดยใช้แผ่นเทียบสี ซึ่งต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ลดปริมาณสีข้อมจี้เลื่อยลง 3 เท่ามีต้นทุนที่ต่ำกว่าการลดปริมาณสีข้อมจี้เลื่อยลง 2 เท่าจึงเลือกเฉพาะตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากจี้เลื่อยที่ลดปริมาณสีข้อมลง 3 เท่า มาทำการวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง CIE colorimeter เพื่อทดสอบความแตกต่างของสีอย่างละเอียดภายในห้องปฏิบัติการ

จากการลดต้นทุนการผลิตโดยการทดลองลดปริมาณสีในการข้อมจี้เลื่อยลงปริมาณ 3 เท่า โดยจะผสมสีอะคริลิก (สีผสมน้ำ 1: 2) ปริมาณ 0.36 kg (สีไม่ผสมน้ำเท่ากับ 0.12 kg) ต่อจี้เลื่อยปริมาณ 1 kg พบว่าต้นทุนที่เกิดจากสีเท่ากับ 18.85 บาท คิดเป็น 43.04% ของต้นทุนวัตถุดิบ ได้ผลของค่าสีของแผ่นวัสดุเชิงประกอบดังแสดง Table 30

**Table 30.** L, a and b -values of composite materials made in pilot scale.

Before improvement				After improvement			
No.	L	a	b	No.	L	a	b
1	56.23	-15.38	27.45	1	54.82	-15.07	27.25
2	55.68	-13.9	27.05	2	54.41	-15.22	26.81
3	56.61	-14.86	27.79	3	56.12	-14.79	27.27
4	56.19	-15.93	27.72	4	55.56	-15.39	27.73
5	57.16	-14.86	28.18	5	55.63	-15.12	28.12
6	56.93	-15.53	28.13	6	55.83	-15.36	27.86
7	56.82	-15.38	27.96	7	57.25	-15.38	26.77
8	56.57	-14.47	27.69	8	58.28	-14.91	27.94
9	57.24	-14.91	28.08	9	57.67	-14.88	28.47
10	57.05	-15.01	28.17	10	56.76	-14.74	27.13
11	56.24	-14.59	27.32	11	56.4	-14.95	27.26
12	57.44	-14.78	27.91	12	55.58	-14.66	26.77
13	55.05	-14.36	27.2	13	55.9	-14.52	27.54
14	55.45	-14.5	27.23	14	54.6	-14.78	27.22
15	56.02	-14.14	27.94	15	54.86	-14.66	27.25
Avg	56.45	-14.84	27.72	Avg	55.98	-14.96	27.43
SD.	0.70	0.55	0.38	SD.	1.13	0.28	0.51



การคำนวณเพื่อหาความแตกต่างของสีตัวอย่าง

$$\text{สูตร } \Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(55.98 - 56.45)^2 + ((-14.96) - (-14.84))^2 + (27.43 - 27.72)^2}$$

$$\Delta E_{ab} = 0.57$$

จากการศึกษาของ Sharma (2003) พบว่าการคำนวณค่าความแตกต่างของสีโดยใช้  $\Delta E_{ab}$  พบว่าหากค่า  $\Delta E_{ab} < 2.3$  จะสามารถสังเกตแยกความแตกต่างของสีได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า  $\Delta E_{ab} = 0.57$  แสดงให้ทราบว่าไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีของตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบได้ (Sharma, 2003)

#### 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนของวัสดุเชิงประกอบในกระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า

จาก Table 31 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนของวัสดุเชิงประกอบในการผลิตเชิงการค้า จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 15% มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 167.07 บาทต่อแผ่น และแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 160.65 บาทต่อแผ่น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% และ 15% พบว่าจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 7.02 บาทต่อแผ่น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 4.19%

ของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบ (Figure 88-89) ที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 15% มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 8.61 บาทต่อชิ้น และแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 8.43 บาทต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนของของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% และ 15% พบว่าจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 0.17 บาทต่อชิ้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 1.97%

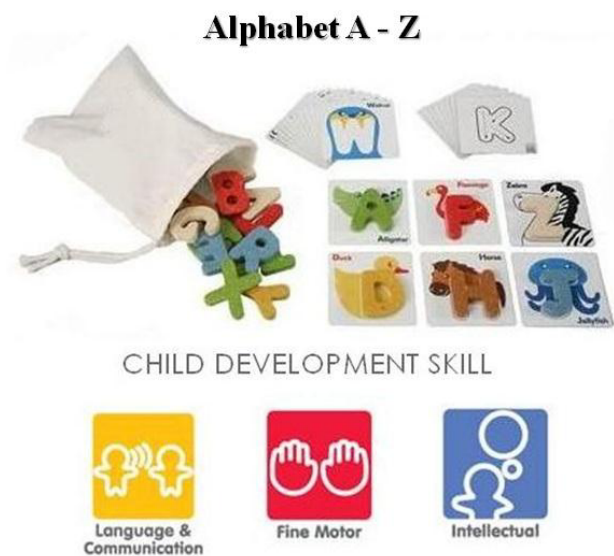
แผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% เมื่อทำการลดปริมาณสีในขั้นตอนการผสมสีลงในซีลี่ยล 3 เท่า มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 87.99 บาทต่อแผ่น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% แบบปกติกับการลดปริมาณสี พบว่าจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 72.74 บาทต่อแผ่น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 45.28%

ของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% เมื่อทำการลดปริมาณสีในขั้นตอนการผสมสีลงในซีลี่ยล 3 เท่า มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 6.71 บาทต่อชิ้น

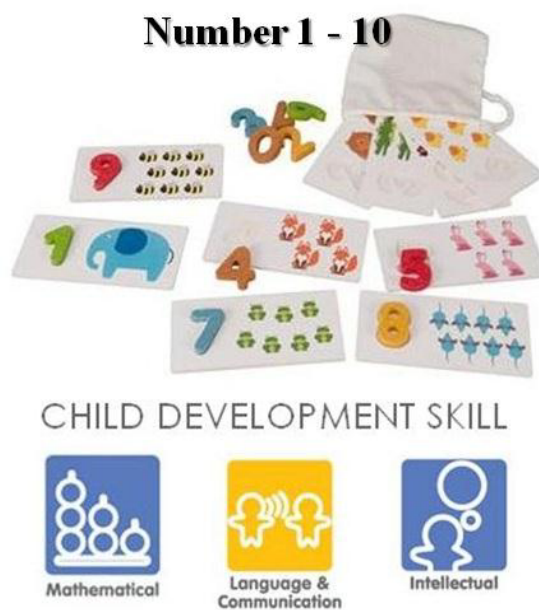
เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% แบบปกติกับการลดปริมาณสี พบว่าจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 1.73 บาทต่อชิ้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ถึง 20.52%

**Table 31.** Cost analysis.

Sample	Product	Materials cost (Baht per piece)	Operating cost (Baht per piece)	Total cost (Baht per piece)
15%pMDI	Composite panel	81.07	86.60	167.67
	Composite toy product	3.99	4.61	8.61
10%pMDI	Composite panel	74.05	86.60	160.65
	Composite toy product	3.82	4.61	8.43
Cost saving of 10%pMDI	Composite panel	7.02 (8.66%)	0.00	7.02 (4.19%)
	Composite toy product	0.17 (4.26%)	0.00	0.17 (1.97%)
10%pMDI Reduced color 3 times	Composite panel	43.79	44.12	87.99
	Composite toy product	2.09	4.61	6.71
Cost saving of 10%pMDI Reduced color 3 times	Composite panel	30.26 (40.86%)	42.48 (49.05%)	72.74 (45.28%)
	Composite toy product	1.73 (45.29%)	0.00	1.73 (20.52%)



**Figure 88.** Sawdust toys product: Alphabet A –Z.



**Figure 89.** Sawdust toys product: Number 1 – 10.

จากการขยายการผลิตจากห้องปฏิบัติการสู่กระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า พบว่าในการผลิตจริงในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีปัญหาหลายประการที่ไม่พบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการผลิตเชิงการค้าจะใช้ซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาคผสม ร่วมกับกาว pMDI ปริมาณ 10% มีความเหมาะสมกับการผลิตจริงในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 4

### สรุป

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของซีลี้อยที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ (>2.00 mm) มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด แต่การใช้ซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (<0.50 mm) มีสมบัติการต้านทานน้ำสูงที่สุด เมื่อพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่สามารถผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.876-2547) และมาตรฐานยุโรป (EN 312) อยู่ในช่วง 0.50-0.84 mm มีความเหมาะสมมากที่สุด

และในการศึกษาผลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าการใช้กาว pMDI ปริมาณ 15% เป็นสารเชื่อมประสาน จะมีสมบัติต่างๆ ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้กาว pMDI ปริมาณ 9% ก็เพียงพอที่จะสามารถผ่าน มอก. 876-2547 และ EN 312 ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้กาว pMDI ปริมาณ 9% ร่วมกับการใช้ซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาค 0.50-0.84 mm เพื่อใช้เป็นชุดการทดลองควบคุมในตอนที่ 3 และ 4 ต่อไป

สำหรับการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าการเติมสารเติมแต่งในวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ PE และ MEL จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบได้แตกต่างกัน โดยที่การเติม PE จะมีข้อดีในด้านสมบัติการต้านทานน้ำ และลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบจะมีสีเป็นสีของซีลี้อยหากต้องการนำไปทำสีเพิ่มเติมจะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสีไม่ผิดเพี้ยนไปจากต้องการ แต่การเติม PE นี้จะมีข้อจำกัดในด้านปริมาณการเติม โดยจะต้องมีการใช้ปริมาณของ pMDI ที่เหมาะสม ส่วนการเติม MEL จะมีความสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำของวัสดุเชิงประกอบได้ดี แต่ลักษณะปรากฏของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีสีขาวตามสีของ MEL หากต้องการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำสี อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีผิดเพี้ยนไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

นอกจากนี้ในการศึกษาการขยายขนาดการผลิตสู่กระบวนการเตรียมผลิตเชิงการค้า การขยายการผลิตจากห้องปฏิบัติการสู่การผลิตเชิงการค้า พบว่าในการผลิตจริงในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีปัญหาหลายประการที่ไม่พบในห้องปฏิบัติ ซึ่งการผลิตเชิงการค้าจะใช้ซีลี้อยที่มีขนาดอนุภาคผสม ร่วมกับกาว pMDI ปริมาณ 10% จึงจะเหมาะสมกับการผลิตจริงในระดับอุตสาหกรรม ลดปริมาณสีในขั้นตอนการผสมสีลงในซีลี้อยลง 3 เท่าจากเดิม มีต้นทุนการผลิตรวม

เท่ากับ 87.99 บาทต่อแผ่น ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 72.74 บาทต่อแผ่น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 45.28%

ซึ่งของเล่นจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% เมื่อทำการลดปริมาณสีในขั้นตอนการผสมสีลงในจี้อย่าง 3 เท่า มีต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 6.71 บาทต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากกาว pMDI ปริมาณ 10% แบบปกติกับการลดปริมาณสี พบว่าจะสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้เท่ากับ 1.73 บาทต่อชิ้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 20.52%

## ข้อเสนอแนะ

1. ในการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยในเชิงการค้า ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Finished product) คือ ของเล่น ซึ่งทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ได้แก่ โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) และสมบัติการต้านทานน้ำ ได้แก่ การดูดซับน้ำ (Water absorption) และ การพองตัวหลังแช่น้ำ (Thickness swelling, TS) ในการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยในเชิงการค้าเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์นั้น เพื่อให้มีความสมบูรณ์ในข้อมูลของสมบัติผลิตภัณฑ์ จึงควรทำการวิเคราะห์ความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Internal bonding) เพิ่มเติมหากต้องการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่ต้องการความแข็งแรง เพื่อให้ผลการทดสอบที่ได้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น
2. การทดสอบวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยฉบับนี้มีการเตรียมจากวัสดุหลายชนิดซึ่งมีส่วนประกอบของพลาสติกในการศึกษาด้วยจึงได้มีการเลือกใช้มาตรฐาน ASTM D 790 สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลและ ASTM D570 สำหรับการทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ แต่เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากวัสดุจำพวกไม้ควรใช้มาตรฐาน ASTM D 1037 แทน
3. จากการศึกษาวิจัยพบว่าสามารถนำเอาวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ในการเตรียมผลิตเชิงการค้าได้ดี และในอนาคตงานวิจัยฉบับนี้ยังมีความน่าสนใจในการศึกษาแบบบูรณาการ เพื่อต่อยอดการศึกษาวิจัยให้เหมาะสมกับการผลิตเชิงการค้าอื่นๆ เช่น วัสดุเชิงประกอบที่สามารถต้านทานน้ำได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากปัญหาหลักของวัสดุเชิงประกอบจากไม้ คือ ปัญหาการไม่ทนทานต่อน้ำ เชื้อรา เป็นต้น การปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้สามารถต้านทานน้ำได้อย่างสมบูรณ์จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต
4. ถึงแม้ว่ากาวพอลิเมอร์ ไซไฟนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาต (Polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) จะมิทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำที่ดี และมีความคุ้มค่าแก่การลงทุน แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตควรมีความระมัดระวังอันตรายที่สามารถเกิดจากกาวชนิดนี้ เนื่องจากกาวชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับน้ำ ซึ่งน้ำเป็นองค์ประกอบหลักของร่างกาย จึงควรมีความระมัดระวังในระหว่างการผลิตต้องมีการแต่งกายที่มิดชิด มีการใช้น้ำยากปกป้องกันการสูดดมละอองกาวเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ และควรใช้ถุงมือเพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับกาวโดยตรง

## เอกสารอ้างอิง

- กรมป่าไม้. 2552. โครงการพัฒนาวัสดุประกอบชีวภาพทดแทนไม้. สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ (ออนไลน์). สืบค้นจาก:  
<http://www.forest.go.th/Forprod/WoodComposite/wsbweb/menu.html>. (10 มิถุนายน 2552).
- แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- สมคิด ทองบุญ. 2541. แผ่นขึ้นไม้อัดจากเกล็ดไม้ยางพาราโดยใช้สารพอลิเมอร์ที่ยึดเอ็มดีไอ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณม อุจน์จิตติชัย และคณะ. 2550. ผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้จากเศษไม้และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด อักษรสยามการพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- Adhikary, K.B., Pang, S. and Staiger, M.P. 2007. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust. *Chemical Engineering Journal*. 142 (2): 190-198.
- American Society for testing and Materials. Standard test method for Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. 2002. ASTM D790-02. West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. 2002. Standard test method for Water Absorption of Plastics. ASTM D570-98, West Conshohocken, PA.
- Ashori, A. and Nourbakhsh, A. 2008. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Ind Crop and Prod*. 28: 225–230.
- Beg, M. D. H. 2007. The improvement of interfacial bonding, weathering and recycling of wood fibre reinforced polypropylene composites. Ph.D. Material product engineering. The University of Waikato.
- Bledzki, A. K., and Gassan, J. 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*. 24: 221–274.

- Chen, Y., Wang, Q., Yan, W., and Tang H. 2006. Preparation of flame retardant polyamide 6 composite with melamine cyanurate nanoparticles in situ formed in extrusion process. *J. Polym Degrad Stab.* 91: 2632-2643.
- Colak, S. Colakoglu, G., Aydin, I., and Kalaycioglu, H. 2007. Effects of steaming process on some properties of eucalyptus particleboard bonded with UF and MUF adhesives. *Building and Environment.* 42 (1): 304-309.
- FAO, 2010. FAO Yearbooks of Forest Products (Online). Available <http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>. (April 10, 2010)
- Frihart, C. R. 2005. Wood adhesion and adhesives. In *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2nd ed. (Rowell, R. M., ed.) USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. CRC press. New York.
- Godfrey, T. A. 2008. Strain effects on percolation conduction in conductive particle filled composites. *J. Mater Sci.* 43:1128–1134.
- Gollob, L. and Wellons, J. D. 2003. Wood adhesion. In *Handbook of adhesives*. 2nd ed. p. 598-610.
- Huang, H. and Talreja, R. 2005. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology.* 65 (13): 1964-1981.
- Hyer, M.W. 1998. *Stress analysis of fiber-reinforced composite material*. WCB McGraw-Hill. Boston.
- Ibeh, Christopher C. 1999. *Amino and furan resins*. H. Goodman. Sidney.
- Karmarkar, A., Chauhan, S.S., Modak, J. M. and Chanda, M. 2007. Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 38 (2): 227-233.
- Kim, S., Kim, H. S., Kim, H. J., and Yang, H. S. 2008. Fast curing PF resin mixed with various resins and accelerators for building composite materials. *Construction and Building Materials.* 22 (10): 2141-2146.
- Koch, K., Bhushan, B. and Barthlott, W. 2008. Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces. *Soft Matter.* 4: 1943–1963.



- Maloney, T. M. 1977. *Modern Particle board and Dry-process Fiber-board Manufacturing*. Miller Freeman Publication. p. 672.
- Matthews, F.L. and Rawling, R.D. 1994. *Composite Materials: Engineering and Science*. 1st ed. Chapman and Hall. London and New York.
- McKeever, D. B. and Falk, R. H. 2004. Woody residues and solid waste wood available for recovery in the United States. In *Proceeding of Management of recovered wood recycling, bioenergy and other options*, C. Gallis, (Ed.) Thessaloniki. 22-24 April 2004. p. 307-316.
- Michigan State University Extension. 2003. *Melamine Plastic* (Online).  
[http://www.msue.msu.edu/objects/content\\_revision/download.cfm/revision\\_id.493538/workspace\\_id.-4/01500096.html/](http://www.msue.msu.edu/objects/content_revision/download.cfm/revision_id.493538/workspace_id.-4/01500096.html/). (10 November 2010).
- Pan, Z., Zheng, Y., Zhang, R., and Jenkins, B. M. 2007. Physical properties of thin particleboard made from saline eucalyptus. *Ind Crop Prod*. 26 (2): 185-194.
- Pascault, J. P., Sautereau, H., Williams, R., and Verdu, J. 2002. *Thermosetting Polymers*. CRC Press. Bath.
- Preechatiwong, W., Malanit, P., Kyokong, B., and Kamlangdee, N. 2006. Effect of polymer impregnation on properties of bamboo. *Walailak J. Sci and Tech*. 3 (1): 79-91.
- Ray, D. and Rout, J. 2005. *Thermoset Biocomposites*. CRC Press. Bath.
- Sanadi, A.R., Caulfield, D.F., Jacobson, R.E. and Rowell, R.M. 1995. Renewable Agricultural Fibers as Reinforcing Fillers in Plastics: Mechanical Properties of Kenaf Fiber–Polypropylene Composites. *Ind. Eng. Chem. Res.* 34. No. 5. 1889-1896.
- Selke, Susan E.M. 1997. *Understanding plastic packaging technology*. Hanser Publishers. Munich.
- Shafirin, E. G. and Zisman W. A. 1960. Constitutive relations in the wetting of low energy surfaces and the theory of the retraction method of preparing monolayers. *J. Phys Chem*. 64 (5): 519–524.
- Sharma, G. 2003. *Digital Color Imaging Handbook* . 2nd ed.. CRC Press.
- Sombatsompop, N., and Chaochanchaikul, K. 2004. Effect of moisture content on mechanical properties, thermal and structural stability and extrudate texture of poly (vinyl chloride) / wood sawdust composites. *J. Polym Int*. 53: 1210-1218.

- Stark, N. M., and Matuana, L. M. 2007. Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. *J. Polymer Degradation and Stability*. 92: 1883-1890.
- Thai MFC Company Limited. 2010. Material safety data sheet of melamine molding compound.
- Torrey, K. S. 2001. Influence of thermally conductive fillers on the physical properties of waferboard. Chemical engineering. Michigan technological university.
- TPI Polene Public Company Limited. 2010. Technical data sheet of LDPE powder.
- Tserki, V., Matzinos, P. and Panayiotou, C. 2006. Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler. Part II. Development of biodegradable composites using treated and compatibilized waste flour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37 (9). 1231-1238.
- Vick, C. B. 1999. Adhesive bonding of wood materials. In *Wood handbook—Wood as an engineering material*. p. 463
- Vilaseca, F., Mendez, J. A., Pelach, A., Llop, M., Canigual, N., Girones, J., Turon, X., and Mutje, P. 2007. Composite materials derived from biodegradable starch polymer and jute strands. *J. Process Biochemistry*. 42 (3):329-334.
- Wang, S., Yang, T., Lin, L., Lin, C. and Tsai, M. 2007. Properties of low-formaldehyde-emission particleboard made from recycled wood-waste chips sprayed with PMDI/PF resin. *Building and Environment* 42: 2472–2479.
- Wang, Z., Wang, E., Zhang, S., Wang, Z., and Ren, Y. 2009. Effects of cross-linking on mechanical and physical properties of agricultural residues/recycled thermoplastics composites. *Industrial Crops and Products*. 29: 133-138.
- Wu, C. 2009. Renewable resource-based composites of recycled natural fibers and maleated polylactide bioplastic: Characterization and biodegradability. *Polym Degrad Stab*. 94. 1076-1084.
- Zheng, Y., Pan, Z., Zhang, R., Jenkins, B. M., Blunk, S., 2006. Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. *J. Ind Crop Prod*. 23 (3), 318–326.
- Zamora, A. 2008. Carbohydrates - Chemical structure (Online). Available: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html>. (5 January 2009).

### ภาคผนวก

#### 1. ตัวอย่างวิธีการคำนวณวัสดุเพื่อใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

##### 1.1 สำหรับกาวเมลามีนยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และกาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์

กำหนดให้	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่น (แห้ง)	0.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมีขนาด	25×30 เซนติเมตร
	แผ่นวัสดุมีความหนา	0.6 เซนติเมตร
	ใช้น้ำหนักกาวสังเคราะห์	5 % ของน้ำหนักวัสดุแห้ง
	วัสดุมีความชื้น	3 %
	กาวมีความชื้น	35 %
	25% NH <sub>4</sub> Cl (ตัวเร่ง)	4 % ของน้ำหนักกาวที่มีความชื้น
	สารดักจับฟอร์มัลดีไฮด์	10 % ของน้ำหนักกาวที่มีความชื้น

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตรความหนาแน่น} &= \text{มวล} / \text{ปริมาตร} \\
 \text{จะได้} \quad \text{มวล (วัสดุ + กาว)} &= \text{ปริมาตร} \times \text{ความหนาแน่น} \\
 &= (\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา}) \times \text{ความหนาแน่น} \\
 &= (25 \times 30 \times 0.6) \times 0.8 \\
 &= 360 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

วัสดุ :	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 100 g	ใช้วัสดุมวลแห้ง	95	กรัม
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 360 g	ใช้วัสดุมวลแห้ง	$\frac{95 \Delta 360}{100}$	กรัม
ดังนั้น	จะใช้วัสดุมวลแห้ง		342	กรัม
กาว :	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 100 g	ใช้เนื้อกาวมวล	5	กรัม
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 360 g	ใช้เนื้อกาวมวล	$\frac{5 \Delta 360}{100}$	กรัม
ดังนั้น	จะใช้กาวมวล		18	กรัม

เพราะฉะนั้น

วัสดุ :	ปริมาณวัสดุที่มีความชื้นที่ใช้	$342 \times 1.03$	=	352.26	กรัม
กาว :	ปริมาณกาวที่มีความชื้นที่ใช้	$18 \times 1.35$	=	24.3	กรัม
	ปริมาณสารตัวเร่ง 4% ของน้ำหนักกาว	$24.3 \times 0.04$	=	0.97	กรัม
	ปริมาณสารดักจับฟอร์มัลดีไฮด์ 10% ของน้ำหนักกาว	$24.3 \times 0.1$	=	2.43	กรัม

ซึ่งน้ำหนักวัสดุที่ผสมเพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูป  $352.26 + 24.3 + 0.97 + 2.43 = 379.96$  กรัม

## 1.2 สำหรับกาว pMDI (100% Solid content)

กำหนดให้	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่น (แห้ง)	0.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมีขนาด	25×30 เซนติเมตร
	แผ่นวัสดุมีความหนา	0.6 เซนติเมตร
	ใช้น้ำหนักกาวสังเคราะห์	5 % ของน้ำหนักวัสดุแห้ง
	วัสดุมีความชื้น	3 %

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตรความหนาแน่น} &= \text{มวล / ปริมาตร} \\
 \text{จะได้} \quad \text{มวล (วัสดุ + กาว)} &= \text{ปริมาตร} \times \text{ความหนาแน่น} \\
 &= (\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา}) \times \text{ความหนาแน่น} \\
 &= (25 \times 30 \times 0.6) \times 0.8 \\
 &= 360 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

วัสดุ :	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 100 g	ใช้วัสดุมวลแห้ง	95	กรัม
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 360 g	ใช้วัสดุมวลแห้ง	$\frac{95 \Delta 360}{100}$	กรัม
ดังนั้น	จะใช้วัสดุมวลแห้ง		342	กรัม
วัสดุ :	ปริมาณวัสดุที่มีความชื้นที่ใช้	$342 \times 1.03$	= 352.26	กรัม
กาว :	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 100 g	ใช้น้ำหนักกาวมวล	5	กรัม
	แผ่นวัสดุเชิงประกอบมวล 360 g	ใช้น้ำหนักกาวมวล	$\frac{5 \Delta 360}{100}$	กรัม
ดังนั้น	จะใช้กาวมวล		18	กรัม
	เพราะฉะนั้น			

ชั่งน้ำหนักวัสดุที่ผสมเพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูป  $352.26 + 18 = 370.26$  กรัม

**Table 32.** The characteristic of low density polyethylene powder.

Properties	Characteristic result
General properties	
4 Appearance	White powder
4 Density	0.91 – 0.94 g/cm <sup>3</sup>
Thermal properties	
4 Vicat softening point	70 – 110°C
4 Low temperature brittleness	(-20) – (-70) °C
4 Service temperature	
4 Minimum	(-30) °C
4 Maximum (Continuous/Intermittent)	50/60°C
Mechanical properties	
4 Tensile strength at break	5 – 20 MPa
4 Elongation at break	50 – 650 %
4 1% secant modulus	90 – 300 MPa
Flammability properties	
4 Oxygen index	15 – 17
4 Flammability rating	Class HB or better must be used for enclosures which are not considered fire enclosures
Chemical properties	
4 Resistance to weak acids	Fair
4 Resistance to strong acids	Fair except for oxidizing acids
4 Resistance to weak alkalis/ strong alkalis	Good/Good
4 Resistance to organic solvents	Good below 60°C
4 Resistance to oils and greases	Attacked by some
4 Resistance to UV	Bad if unprotected

**Source:** TPI Polene Public Company Limited (2010)

**Table 33.** The characteristics of melamine molding compound.

Properties	Characteristic
Appearance	White powder
pH (at 20°C)	6.4 – 9.2 (50% water dispersion)
Melting point	>50°C
Inflammability	Not inflammability
Temperature of decomposition	>150°C
Self flammability	None
Explosive limit of powder in air	Not available
Specific gravity (at 20°C)	0.35 – 0.45
Water solubility	Dispersible within 35 and 65% solid content

**Source:** Thai MFC Company Limited (2010)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวชนากานต์ เจริญวงษ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5111020045

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (อุตสาหกรรมเกษตร)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษาที่ได้รับ (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนทักษะนักอุตสาหกรรมเกษตร ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Charoenwong, C. and Pisuchpen, S. 2010. Effect of adhesives and particle sizes on properties of composites materials from sawdust. BioScience for the Future 2010. In Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Joint International PSU-UNS Conferences. The 60<sup>th</sup> Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Prince of Songkla University, Thailand. 7-8 October 2010.