



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2565

### ชื่อโครงการ

สมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำจากเส้นใยธรรมชาติ  
Mechanical properties and biodegradation of natural fiber floating mat

ผู้วิจัย หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์

งบวิจัยอุดหนุนที่ได้รับ 80,000.00 บาท

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 1 ตุลาคม 2564 ถึง 30 กันยายน 2565

ขยายเวลาวิจัยครั้งที่ 1 วันที่ 1 ตุลาคม 2565 ถึง 30 มีนาคม 2566

## บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว ได้แก่ ค่าความหนาแน่นรวม ค่าการรับน้ำหนัก ร้อยละการดูดซับน้ำ การรับแรงกด และลักษณะเส้นใย นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนโดยใช้กาว 5 ชนิด ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางพารา กาวยางบง และกาวผง จากการทดลองพบว่าแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่เตรียมได้จากกาว 5 ชนิด มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ส่งผลให้แผ่นลอนน้ำจากกาวทุกชนิดสามารถลอยน้ำได้ และสามารถรับน้ำหนักได้โดยแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวยางพารามีโครงสร้างที่แข็งแรง จากผลการเสริมแรงของกาวยางพารา ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยจากภาพ SEM ผลการดูดซับน้ำพบว่ากาวน้ำใส และกาวลาเท็กซ์มีร้อยละการดูดซับน้ำสูงที่สุด เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของกาวทำให้ ดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้น ผลการทดสอบค่าการรับแรง และการเปลี่ยนรูปร่างจากแรงกดสามารถคำนวณค่าความแข็งแรง (Vicker hardness test; HV) ได้ พบว่าแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากกาวยางพาราสามารถรับแรงได้ดี แต่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาเป็นแผ่นลอนน้ำพุงพีช จากผล FTIR กาวยางพารายังคงสมบัติทางเคมีเมื่อเตรียมเป็นแผ่นลอนน้ำ นอกจากนี้ผลการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า กาวยางบง กาวผง หลุดออกจากเส้นใย และลอยที่ผิวน้ำทำให้เกิดการสลายของเส้นใยได้เร็วที่สุด ส่วนกาวยางพาราให้ผลการยึดเกาะกับเส้นใยได้ดี ส่งผลให้แผ่นลอนน้ำพุงพีชยังคงสภาพเดิมอยู่ได้ในระยะเวลา 2 เดือน ดังนั้นในงานวิจัยนี้แผ่นลอนน้ำพุงพีชจากกาวยางพารา จึงเป็นกาวประสานที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ผลของความดันในการอัดแผ่นในช่วง 50-100 kg/cm<sup>2</sup> ส่งผลต่อค่าการดูดซับน้ำ การรับน้ำหนัก ค่าการรับแรง และค่าความแข็งแรงของแผ่นลอนน้ำพุงพีช

## ABSTRACT

The objective of this project was to study the effect of adhesive type on physical properties of floating mats to support plants from coconut fiber that are total density, weight bearing capacity, water absorption, total hardness, and fiber morphology. Moreover, it was also studied the biodegradable properties of floating mats by using five types of adhesives that are clear adhesive, latex adhesive, para rubber adhesive, *Persea kurzii* rubber adhesive and powder adhesive. From the experimental results, it was found that the floating mats prepared from five types of adhesives have less total density than water meaning that floating mats preparing from all type of adhesive can float on water surface. The floating mat could be bearing the weight of materials due to the reinforcement effect of adhesive. Para rubber adhesive showed the strong structure on coating between coconut fiber elucidated from SEM images. From the water adsorption results, it was found that clear adhesive and latex adhesive have high percentage of the water absorption due to the water solubility of adhesive can increased water absorption. The max force and displacement results can to determine Vicker hardness (HV), it was found that para rubber adhesive have the highest max force and the lowest displacement. From the results, para rubber adhesive showed the optimum properties for floating mat. The FTIR results showed the existence of chemical composition of para rubber in floating mat. Moreover, it was found that of *Persea kurzii* rubber adhesive and powder adhesive fallen out from fiber and floated on the water surface, resulting in fast biodegradable of coconut rubber. Para fiber adhesive showed the good binding on coconut fiber for maintained floating mat structure within 2 months. Therefore, in this research, the floating mats to support plant from para rubber adhesive was the optimized adhesive. Moreover, the compression pressure at 50-100 kg/cm<sup>2</sup> affected on water absorption, weight bearing capacity, max force, and hardness of floating mat.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
สารบัญ	ค
รายการตาราง	จ
รายการรูป	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 แผ่นพุงพีช (Floating mats)	4
2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)	9
2.3 วัสดุคอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติ (Composite material natural)	22
2.4 กาวประสาน (Adhesives)	37
2.5 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)	49
2.6 แรงตึงผิว และแรงลอยตัว	56
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	59
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	63
3.1 วัสดุอุปกรณ์	63
3.2 การเตรียมแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	64
3.3 การศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	67
3.4 การศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอยน้ำจากไยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	67
3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	67
3.6 การศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	71

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์ผล</b>	72
4.1 ผลการศึกษาชนิดของกาวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีช จากไยมะพร้าว	72
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	82
4.3 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอนน้ำจากไยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกล ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	84
4.4 ผลการศึกษาชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของ แผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว และการเกิดเชื้อรา เป็นระยะเวลา 2 เดือน	88
<b>บทที่ 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	95
5.1 สรุปผลการทดลอง	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
5.3 ข้อควรระวัง	96
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	97
<b>ภาคผนวก</b>	104
ภาคผนวก ก การเตรียมแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	105
ภาคผนวก ข การทดสอบทางกายภาพหาค่า ความหนาแน่นรวม ร้อยละการดูดซับน้ำ การรับน้ำหนัก ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว	106
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	112

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบชนิดของหญ้าแฝก	22
2.2 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น	53
2.3 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยมะพร้าว	55
4.1 ผลของชนิดการประสานต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นลอนน้ำพุงพีช	73
4.2 ลักษณะเส้นใยของแผ่นลอนน้ำพุงพีชถ่ายด้วยเลนส์กำลังขยาย 20 เท่า ก่อนย่อยสลายทางชีวภาพ	78
4.3 ลักษณะเส้นใยของแผ่นลอนน้ำพุงพีชถ่ายด้วยเลนส์กำลังขยาย 20 เท่า หลังย่อยสลายทางชีวภาพ	79
4.4 ผลการวัดค่า Max force ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อการประสานแต่ละชนิด	81
4.5 ผลการวัดค่า Displacement ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อการประสานแต่ละชนิด	81
4.6 การคำนวณความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด	82
4.7 ผลการวัดค่า Max force ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อความดันในการอัดแผ่น	87
4.8 ผลการวัดค่า Displacement ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อความดันในการอัดแผ่น	87
4.9 การคำนวณความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ความดันการอัดต่างๆ	88
4.10 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวน้ำใส	89
4.11 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวลาเท็กซ์	90
4.12 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวยางบง	91
4.13 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวยางพารา	92
4.14 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวผง	93
ข.1 ผลความหนาแน่นรวมและน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด	106
ข.2 ผลความหนาแน่นรวมและน้ำหนักที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีช	107
ข.3 ผลร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด	107
ข.4 ลักษณะก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำในการทดสอบร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด	108
ข.5 ผลร้อยละการดูดซับน้ำที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีช	108
ข.6 ลักษณะก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำในการทดสอบร้อยละการดูดซับน้ำความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีช	109
ข.7 ผลการรับน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด	109
ข.8 ผลการรับน้ำหนักที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีช	109

## รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ FWI (ก) โครงสร้างของ FWI (ข) พืชที่ถูกปลูกบน FWI (ค) FWI ที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ	4
2.2 โครงสร้าง และส่วนประกอบของ FWI	5
2.3 ท่อพีวีซี	5
2.4 โครงสร้างระบบบำบัดที่ทำจากท่อพีวีซี	6
2.5 ลักษณะการใช้วัสดุตาข่ายพลาสติก (ก) วัสดุตาข่ายพลาสติก (ข) ปลูกพืชบนวัสดุ (ค) ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ	6
2.6 ตาข่ายพลาสติก (Plastic Net)	6
2.7 ส่วนประกอบของแผ่นพยางค์จากวัสดุเหลือทิ้ง	7
2.8 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรไพลีน	8
2.9 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีน	8
2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีน	8
2.11 บำบัดน้ำเสียโดยใช้โฟมพยางค์	9
2.12 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS	10
2.13 SFS แบบการไหลตามแนวราบ	11
2.14 การไหลตามแนวตั้ง	11
2.15 ลำต้นรูปฤๅษี	13
2.16 ต้นรูปฤๅษี	13
2.17 ใบรูปฤๅษี	13
2.18 ดอกรูปฤๅษี	14
2.19 ผลรูปฤๅษี	14
2.20 ต้นพุทธรักษา	15
2.21 ส่วนต่างๆของ tuberous rhizome	16
2.22 ลักษณะใบ และลำต้น	16
2.23 ลักษณะของดอก (ก) ช่อดอกที่กำลังบาน (ข) ส่วนต่างๆของดอก	17
2.24 ผล (Fruits)	17
2.25 ลักษณะลำต้นที่เป็นเหง้าใต้ดิน (rhizome) และลักษณะลำต้นเหนือดินเป็นไหล (stolon) (ก) E. tenellus (ข) E. magdalenensis	18
2.26 ลักษณะของใบ (ก) กลมหรือรูปหัวใจ (ข) รีหรือรูปไข่ (ค) หอก (ง) ยาวคล้ายริบบิ้น	19

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ลักษณะดอก (ก) ดอกสีขาว 3 กลีบบนก้านช่อดอก (ข) ดอกสมบูรณ์เพศ	19
2.28 ลักษณะผลแก่และเมล็ด (ก) ผลลักษณะกลม (ข) เมล็ดคล้ายหนาม (ค) เมล็ดคล้ายปากนก ลักษณะผลอ่อนและเมล็ด (ง) ผลแบบผลกลุ่ม (จ) รูปร่างกลมหรือรูปไข่ (ฉ) เมล็ดยึดคล้าย ปากนก	20
2.29 ลักษณะหญ้าแฝก และกลไกการบำบัด (ก) น้ำตะกอนดินไหลมาปะทะกอหญ้าแฝก (ข) ตะกอนดินตกค้างอยู่ (ค) น้ำไหลผ่านช้าๆ บางส่วนซึมลงสู่ดิน (ง) รากหยั่งลงลึก แฝกว้างเพียง 50 cm	21
2.30 แผลกลุ่ม และแผลดอน	21
2.31 ลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุคอมโพสิต	24
2.32 ลักษณะ และการจัดเรียงตัวของตัวเสริมแรง	25
2.33 แผนผังการแบ่งประเภทวัสดุคอมโพสิต	25
2.34 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ (ก) เส้นใยต่อเนื่อง และเรียงตัวขนานกัน (ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่อง และเรียงตัวขนานกัน (ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่อง และเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ	27
2.35 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแบบเชิงกล	28
2.36 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยประจุไฟฟ้า	28
2.37 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยพันธะเคมี	29
2.38 กลไกการยึดติดแบบแพร่ผ่าน	29
2.39 แรงกดอัดบริเวณพื้นผิวด้านบนและแรงดึงยึดบริเวณพื้นผิวด้านล่างกับชั้นตัวอย่างเมื่อให้ แรงขณะทดสอบ	30
2.40 ชั้นทดสอบแรงดึง (ก) พื้นที่หน้าตัดกลมลึอกที่ป่า (ข), (ค) พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมลึอกที่ป่า และรู (ง) พื้นที่หน้าตัดกลมโดยใช้เกลียว	30
2.41 เครื่องทดสอบแรงดึง	31
2.42 เครื่องทดสอบแบบชอร์สเกลโรสโคป	32
2.43 เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์	33
2.44 หน้าปัดอ่านค่าความแข็ง	33
2.45 เครื่องทดสอบแบบร็อคเวลล์	34
2.46 เครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์	35
2.47 เครื่องทดสอบแรงกระแทก	35
2.48 ส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงกระแทก	36



## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.49 เครื่องทดสอบความล้า	36
2.50 Lab/Overlap Joint	38
2.51 Joggle Lab Joint	38
2.52 Butt Joint	38
2.53 Scarf Joint	39
2.54 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Cis-1,4-polyisoprene)	39
2.55 กาวยางบง (ก) ลักษณะลำต้นยางบง (ข) ลักษณะเนื้อกาว	40
2.56 กาวยางพารา (ก) ลักษณะลำต้นยางพารา (ข) ลักษณะเนื้อกาว	40
2.57 กาวลาเท็กซ์ (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว	41
2.58 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PVAc	41
2.59 กาวน้ำใส (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว	42
2.60 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PVA	43
2.61 กาวอีพ็อกซี (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว	43
2.62 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพ็อกซีเรซิน	44
2.63 โครงสร้างของไดอะมีน และปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยง	44
2.64 โครงสร้างทั่วไปของซิลิโคน พอลิซิล็อกเซน (Polysiloxanes)	46
2.65 โครงสร้างของซิลิโคนเรซิน พอลิซิล็อกเซน (Polysiloxanes)	46
2.66 ลักษณะผลิตภัณฑ์กาวอะคริลิก	47
2.67 โครงสร้างมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิเมอร์	48
2.68 กาวผง (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว	48
2.69 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน	49
2.70 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ	50
2.71 ลักษณะและองค์ประกอบที่อยู่ภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ	50
2.72 ลักษณะและองค์ประกอบที่อยู่ภายในผนังเซลล์ทุติยภูมิ	51
2.73 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส	51
2.74 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	52
2.75 โครงสร้างของลิกนิน	53
2.76 ไยมะพร้าว	54
2.77 โครงสร้างของมะพร้าว	55

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.78 ภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าว (ก) ที่กำลังขยายต่ำ 4x และ (ข) ที่กำลังขยายสูง 20x	55
2.79 Transmission Electron Microscope (TEM)	56
2.80 แรงลอยตัวของแผ่นเรียบที่จมในของเหลว	57
2.81 เสถียรภาพของวัตถุจม (ก) Stable (ข) Neutrally stable (ค) Unstable	58
2.82 เสถียรภาพของวัตถุลอย (ก) Stable (ข) Neutrally stable (ค) Unstable	59
3.1 ใยมะพร้าว และถาดแม่แบบสำหรับศึกษาสมบัติเชิงกล	65
3.2 ลักษณะกาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง	65
3.3 อบแห้งใยมะพร้าว และกาวประสาน	66
3.4 เครื่องอัด	66
3.5 ถาดแม่แบบสำหรับศึกษาการบำบัดน้ำเสีย	66
3.6 แผ่นลอยน้ำพุงพีชแบ่งส่วน	68
3.7 แช่แผ่นลอยน้ำพุงพีชในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง	68
3.8 ทดสอบการรับน้ำหนัก	69
3.9 เลนส์กำลังขยายจุฬาสมาร์ทเลนส์	70
3.10 แผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวแช่น้ำ	71
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและชนิดกาวประสาน	74
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับน้ำและชนิดกาวประสาน	74
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดีและชนิดกาวประสาน	76
4.4 ภาพ SEM ของแผ่นลอยน้ำพุงพีชเมื่อใช้กาวประสาน (ก) กาวยางพารา (ข) กาวผง	76
4.5 แผ่นคอมโพสิตจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวประสานต่างชนิดกัน	77
4.6 ลักษณะพื้นผิวและช่องว่างระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับกาวประสานจากภาพ SEM	77
4.7 จุดตำแหน่งการถ่ายรูปด้วยเลนส์กล้องกำลังขยาย 20 เท่า	78
4.8 FTIR spectra ของเส้นใยมะพร้าว	83
4.9 FTIR spectra ของกาวยางพารา	83
4.10 FTIR spectra ของแผ่นลอยน้ำพุงพีช	84
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและความดันการอัดแผ่น	85
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับน้ำและความดันการอัดแผ่น	85
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดีและความดันการอัดแผ่น	86
4.14 ลักษณะแผ่นคอมโพสิตและเส้นใยมะพร้าวหลังการทดสอบย่อยสลายเป็นเวลา 2 เดือน	94
ก.1 ปริมาณเส้นใยที่ศึกษา (ก) 30 g (ข) 40 g (ค) 50 g	105

# บทที่ 1

## บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการทำโครงการงานขอบเขตของการทำโครงการงาน และประโยชน์ที่จะได้รับการทำโครงการงาน

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งด้านจำนวนประชากร และเศรษฐกิจโดยอุตสาหกรรม มีการพัฒนาการผลิตเพื่อยังชีพมาเป็นการผลิตเพื่อการค้าส่งผลให้คุณภาพน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงปี พ.ศ. 2552 - 2561 มีการปล่อยน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ตลอดจนกระบวนการธรรมชาติ คุณภาพน้ำมีแนวโน้มลดต่ำลง และมีความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำเพิ่มสูงขึ้น [1] เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารจำพวกสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจนถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจำนวนมากร่วมกับสารอินทรีย์ทำให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำเป็นสาเหตุของการเกิด ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งพืชจะเจริญเติบโตแพร่พันธุ์เร็วขึ้นปกคลุมบริเวณผิวน้ำทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจนส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตาย และแหล่งน้ำไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้กลายเป็นปัญหาความเสื่อมโทรมทางสิ่งแวดล้อม [2] ระบบบึงประดิษฐ์ (Construction wetland) เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำลงสู่ธรรมชาติ การบำบัดในรูปแบบนี้เป็นการใช้รากของพืชน้ำชนิดต่างๆ ดูดซับสารอินทรีย์ และสารแขวนลอย เพื่อลดปริมาณมลพิษที่อยู่ในน้ำโดยระบบ ดังกล่าวมีการออกแบบและการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก มีต้นทุนค่าดำเนินการค่าบำรุงรักษาต่ำ ใช้กับพืชน้ำได้หลากหลายชนิด ระบบการทำงานไม่ซับซ้อน ซึ่งมีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน (Free water surface, FWS) ประเภทที่ 2 แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface flow system, SFS) การเลือกพืชพันธุ์เป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการบำบัดน้ำเสีย พืชที่ใช้สำหรับระบบน้ำไหลใต้ผิวดินต้นพืชต้องลอยตัวอยู่เหนือน้ำเพื่อให้รากอยู่ในน้ำเพื่อการบำบัดสารอินทรีย์ และสารแขวนลอยที่ทนต่อมลภาวะทางน้ำได้สูง เช่น บัวเมซอน (*Echinodorus cordifolius*) [3]

แผ่นลอยน้ำพองพืช (Floating mat) คือ วัสดุที่สามารถรองรับน้ำหนักพืชให้ลอยอยู่บนผิวน้ำผลิตจากวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เช่น พลาสติก โฟม ซึ่งวัสดุดังกล่าวย่อยสลายได้ยาก กลายเป็นขยะในแหล่งน้ำ ดังนั้นการนำแผ่นใยธรรมชาติมาผลิตเป็นแผ่นลอยน้ำพองพืชจึงเป็นหัวข้อวิจัยที่ตอบโจทย์วัสดุเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้เส้นใยธรรมชาติมีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยที่มะพร้าวเป็นพืชที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย และกากมะพร้าวมีเส้นใยนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น อุตสาหกรรมการเกษตร

เป็นฐานรองเพื่อยึดเกาะของต้นกล้าเพื่อรักษาความชื้น ไยมะพร้าวเป็นใยที่ได้จากเปลือกของผลมะพร้าว สามารถแบ่งตามลักษณะการเก็บเกี่ยว หากเก็บเกี่ยวผลมะพร้าวไม่แก่จัดใยที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อน มีความนุ่ม แต่ไม่เหนียว ในขณะที่เก็บเกี่ยวผลมะพร้าวแก่เต็มที่จะได้ใยสีน้ำตาล เหนียว และแข็งกระด้าง สามารถทนต่อความชื้น และการทำลายของจุลินทรีย์เชื้อราได้ดี นอกจากนี้ใยมะพร้าวยังเป็นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง สามารถนำไปปั่นผสมกับเส้นใยอื่นๆโดยใช้ตัวประสานที่เป็น กาวจากธรรมชาติหรือกาวสังเคราะห์ [4] วัสดุประสานหรือกาวเป็นวัสดุที่ใช้ติดวัตถุชนิดเดียวกันหรือ วัตถุต่างชนิดกันเข้าด้วยกันให้แน่นโดยผลิตจากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุสังเคราะห์ เช่น กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง ซึ่งวัสดุประสานนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ [5]

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการผลิตแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวจุดประสงค์ของ งานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาผลของตัวประสานสำหรับใยมะพร้าวเพื่อผลิตแผ่นลอนน้ำพุงพีช

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของชนิดของตัวประสานได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง ในการเตรียมวัสดุคอมพอสิตเส้นใยมะพร้าว

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากเส้นใยธรรมชาติในช่วง 25-50 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากเส้นใยธรรมชาติที่เตรียมได้

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากเส้นใยธรรมชาติ

## 1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1.3.1 ศึกษาผลของชนิดกาวประสาน ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง ต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

1.3.2 เพื่อศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวในช่วง 25-50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) ต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

1.3.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว ได้แก่ (1) ความหนาแน่นรวม (2) การดูดซับน้ำ (3) การรับน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำ (4) การวิเคราะห์พื้นผิว ช่องว่างเส้นใยด้วย SEM (5) การทดสอบแรงกดและระยะการคืนรูปด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) (6) การวิเคราะห์ค่า Vicker hardness test, HV

1.3.4 ศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีช จากใยมะพร้าว และการเกิดเชื้อราของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว โดยศึกษาระยะเวลา 2 เดือน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แนวทางในการทำแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวโดยใช้กาบประสานที่เหมาะสม
- 1.4.2 ได้แนวทางใช้วัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตรที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแทนการใช้วัสดุสังเคราะห์ที่ย่อยสลายยาก
- 1.4.3 ได้แนวทางในการบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์โดยใช้ประโยชน์จากพืชลอยน้ำบนแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว
- 1.4.4 สามารถนำองค์ความรู้จากการวิจัยไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ในชุมชน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว เพื่อเป็นแนวทางในการทำโครงการ โดยมีหัวข้อดังนี้

#### 2.1 แผ่นพุงพีช (Floating mats)

ระบบบึงประดิษฐ์แบบมีแผ่นพุงพีช (Floating wetland) เป็นนวัตกรรมสำหรับการบำบัดแหล่งน้ำ โดยแผ่นพุงพีช (Floating mats) สามารถเคลื่อนย้ายได้ เป็นแหล่งอาศัยของสัตว์น้ำ และจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ช่วยกรองมลพิษ เพิ่มความสามารถในการดูดสารอาหารในแหล่งน้ำเพื่อก่อให้เกิดออกซิเจน มีผลต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำ การใช้แผ่นพุงพีชสำหรับการบำบัด และการจัดการน้ำเสียจึงเป็นที่ยอมรับ เช่น กรมคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งนิวเจอร์ซีย์ (NJDEP) ได้พบว่าติดตั้ง Floating Wetland Islands, FWI ในทะเลสาบ และบ่อน้ำ FWI สามารถดูดซึมธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน (Nitrogen) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) ได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไนโตรเจน และฟอสฟอรัส มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ปกคลุมผิวน้ำทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณออกซิเจนลดลง [6]

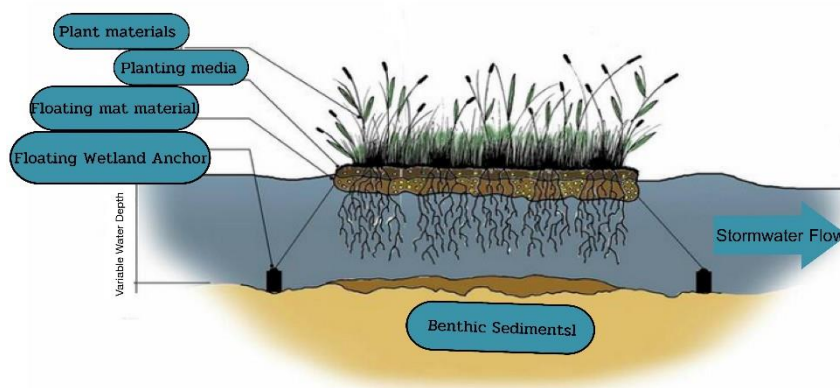


(ก) โครงสร้างของ (FWI)

(ข) พืชที่ถูกปลูกบน FWI

(ค). FWI ที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

รูปที่ 2.1 ลักษณะของ FWI (ก) โครงสร้างของ FWI (ข) พืชที่ถูกปลูกบน FWI (ค). FWI ที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ [6]



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง และส่วนประกอบของ FWI [7]

FWI มักมีโครงสร้างที่ทำมาจากตาข่าย ไม้ พลาสติก โฟม ดังรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งพืชจะถูกปลูกโดยตรงลงบนวัสดุพลาสติกของ FWI โดยสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.1 (ข) จากนั้นจึงปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ดังรูปที่ 2.1 (ค) ซึ่ง FWI มีโครงสร้างที่คงรูป ดังรูปที่ 2.2 โดยรากของพืชเจริญเติบโตผ่านวัสดุพลาสติก ทำให้เกิดที่อยู่อาศัยสำหรับจุลินทรีย์หลายชนิดบริเวณรากพืช สามารถทำได้โดยการสร้างพื้นที่ผิวจำนวนมากคาดว่า FWI 250 ft<sup>2</sup> มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1 Acre ของแผ่นพวงพืช (floating mats) เมื่อติดตั้ง FWI จะทำหน้าที่เป็นแหล่งรวมธาตุอาหารโดยเฉพาะไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จุลินทรีย์ที่หลากหลายทั้งใน และได้ FWI จะดูดซับไนโตรเจนกับฟอสฟอรัส [6]

### 2.1.1 วัสดุที่นิยมนำมาทำแผ่นลอยน้ำพวงพืช

#### 2.1.1.1 วัสดุท่อพีวีซี (Polyvinyl chloride material, PVC)

ท่อพีวีซีเป็นพลาสติกที่แข็งแรงที่สุดแต่ไม่ทนต่อสารละลายมีราคาถูกสามารถใช้ทั้งในงานท่อที่ต้องรับความดันและท่อที่ไม่รับความดัน ท่อชนิดนี้จะไม่ติดไฟแต่ขณะถูกเผาจะเกิดก๊าซที่เป็นพิษ ท่อพีวีซีที่ผลิตขึ้นตามมาตรฐาน มอก. 17 - 2532 ดังรูปที่ 2.3 ส่วนใหญ่เป็นสีฟ้าหรือสีขาว เป็นท่อที่นิยมนำมาใช้ในงานสุขาภิบาลในอาคาร รหัส PVC - 5, PVC - 8.5 และ PVC - 13.5 เป็นการระบุถึงความสามารถในการรับแรงดันของท่อ มีหน่วยเป็น bar หรือ kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งหากใช้งานเป็นประจำหรือท่อที่รับแรงดันจะใช้ท่อ PVC - 8.5 และ PVC - 13 และท่อ PVC เหมาะสำหรับใช้งานภายในอาคารหรือในที่ร่มเท่านั้น เช่น ไม่ควรใช้ภายนอกที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด [8] นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นโครงสร้างของระบบบำบัดซึ่งประกอบด้วยเสาที่ทำจากท่อพีวีซีเพื่อใช้เป็นที่ยึดทุ่นลอย และทุ่นลอยสำหรับปลูกพืชลอยน้ำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ท่อพีวีซี [9]



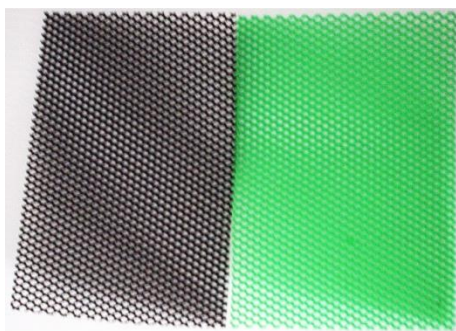
รูปที่ 2.4 โครงสร้างระบบบำบัดที่ทำจากท่อพีวีซี [10]

#### 2.1.1.2 วัสดุตาข่ายพลาสติก (Plastic Net Material)

ตาข่ายพลาสติกผลิตจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพมีส่วนผสมสูตรเฉพาะเหมาะกับอากาศร้อนชื้นไม่กรอบแตกได้ง่าย ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีหลากหลายชนิด และมีอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งลักษณะงานตาข่ายพลาสติก โดยปกติมักจะใช้ทดแทนตาข่ายลวดเหล็กหรือตาข่ายอลูมิเนียมสำหรับบริเวณที่ต้องสัมผัสกับน้ำบ่อยๆ หรืออยู่ในที่ค่อยข้างขึ้น และไม่ต้องการความแข็งแรงแบบเหล็ก เช่น การใช้วัสดุตาข่ายพลาสติกพุงพีชหญ้าแฝกในการบำบัดน้ำเสีย ดังรูปที่ 2.5 โดยใช้วัสดุตาข่ายพลาสติก (ก) มาช่วยในการพุงพีชหญ้าแฝก (ข) แล้วปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสีย (ค) วัสดุตาข่ายพลาสติกมีคุณสมบัติเด่น คือ พลาสติกจะไม่มีรอยคมจึงไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์อีกทั้งยังสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ดังรูปที่ 2.6 [11]



รูปที่ 2.5 ลักษณะการใช้วัสดุตาข่ายพลาสติก (ก) วัสดุตาข่ายพลาสติก (ข) พลุ๊กพีชบนวัสดุ (ค) ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ [12]



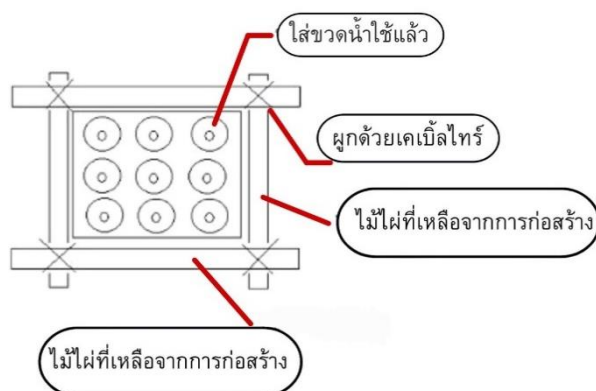
รูปที่ 2.6 ตาข่ายพลาสติก (Plastic Net) [13]



### 2.1.1.3 วัสดุเหลือทิ้ง

วัสดุเหลือทิ้ง คือ การใช้ไม้ไผ่ที่เหลือจากการก่อสร้างผูกด้วยเคเบิลไทร์ และท่อนั้นจะใช้ขวดน้ำขนาดเล็กที่ใช้แล้วเพื่อให้รากพืชแทรกลงไปใต้น้ำได้ ดังรูปที่ 2.7 [14]

การนำวัสดุเหลือทิ้งมาสร้างเป็นแผ่นพวงพีชนั้นสามารถลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นได้ลดการสร้างมลพิษ และยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่าแทนที่จะถูกทิ้ง และนอกจากช่วยลดปริมาณขยะลงได้แล้วยังช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม [15]



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของแผ่นพวงพีชจากวัสดุเหลือทิ้ง [14]

### 2.1.1.4 วัสดุโฟม (Foam material)

โฟมเป็นพลาสติกที่นำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้สารช่วยขยายตัวซึ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ที่มีคุณสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบา รองรับแรงกระแทกได้ดี ทนทานต่อแรงดึง กันความร้อน และยังสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ [16]

#### 2.1.1.4.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

พอลิสไตรีนเป็นวัสดุกันชนที่ใช้กันมากที่สุดในการบรรจุหีบห่อ โดยทั่วไปมักเป็นเนื้อแข็ง ความหนาแน่นต่ำประมาณ  $0.015 - 0.07 \text{ g/cm}^3$  กันกระแทกดี ทนทานต่อความชื้นได้ดี อัตราการดูดซึมน้ำต่ำ และราคาถูก ข้อเสียที่สำคัญ คือ ความเหนียวที่ไม่ดีปริมาณของเสียมีขนาดใหญ่ยากต่อการจัดการ และก๊าซสไตรีนที่ผลิตเมื่อถูกเผาไหม้สามารถก่อให้เกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการจำกัดการใช้งาน [17] ผลิตภัณฑ์ทำจากพอลิสไตรีน เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร [18] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิสไตรีน [18]

#### 2.1.1.4.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU)

พอลิยูรีเทนเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงกระแทก การสั่นสะเทือนได้ดี มีความยืดหยุ่นสูง เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีเสถียรภาพของอุณหภูมิ ความชื้น และความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [17] ผลิตภัณฑ์ที่ใช้พอลิยูรีเทน เช่น เฟอร์นิเจอร์ ฟองน้ำ [19] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิยูรีเทน [20]

#### 2.1.1.4.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)

พอลิเอทิลีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันฉนวนกันความร้อน มีความแข็งแรงสามารถต้านทานต่อการขีดถู การดูดซึมน้ำต่ำ และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [17] บรรจุภัณฑ์ที่ใช้พอลิเอทิลีน เช่น แผ่นเคลือบบอร์ดกระดาษ ถุงพลาสติก ขวดน้ำยาซักผ้า [21] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีน [21]

ดังนั้นจึงได้มีการนำสารประกอบพอลิเมอร์ดังกล่าวมาใช้งานประเภทต่างๆ มากมาย เช่น งานห่อบรรจุภัณฑ์อาหาร อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ งานเฟอร์นิเจอร์ งานแกะสลัก และการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โฟมช่วยพยุงพืช [16] ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บำบัดน้ำเสียโดยใช้โฟมพยุงพืช [22]

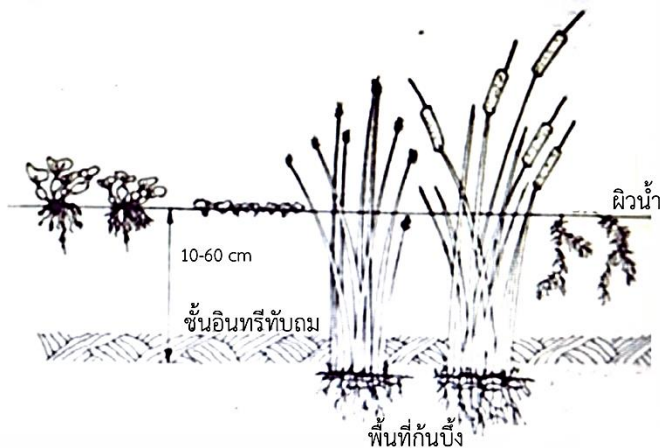
## 2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

การบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ เป็นระบบที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่ให้ประสิทธิภาพสูง มีค่าดำเนินการก่อสร้างต่ำ โดยจะใช้บำบัดน้ำเสียจากหลายๆ แหล่ง เช่น น้ำเสียจากอุตสาหกรรม โรงงาน และชุมชน ซึ่งระบบบึงประดิษฐ์มีความสามารถในการบำบัดค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand, BOD) ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS) ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้ดีในขณะเดียวกันก็มีความสามารถลด โลหะหนัก สารอินทรีย์ และเชื้อโรคได้ โดยมีกลไกการบำบัด 3 กระบวนการ คือ (1) กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอน วิธีการนี้สามารถกำจัดสารแขวนลอย สารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (2) กระบวนการทางเคมี ได้แก่ การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวของพืช (3) กระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และเกิดการกินกันเองของจุลินทรีย์ต่างๆ [23] ระบบบึงประดิษฐ์แบ่งตามลักษณะการไหลของน้ำได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน (Free water surface, FWS) และแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface flow system, SFS)

### 2.2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน

เป็นระบบที่เลือกใช้ในการศึกษาซึ่งมีลักษณะคล้ายกับบึงธรรมชาติ (Natural wetlands) โดยใช้หลักการของการไหลของน้ำเหนือผิวดิน ผ่านรากพืชที่ปลูกไว้ภายในระบบ ซึ่งน้ำจะไหลแพร่กระจายไปโดยมีระดับน้ำที่ตื้นมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนน้ำเข้า บ่อน้ำ ต้นพืชในบึงประดิษฐ์ และส่วนน้ำออก ดังรูปที่ 2.12 โดยส่วนน้ำเข้าจะเริ่มต้นที่ทางเข้าของบ่อน้ำ โดยขนาดจำนวน และรูปร่างของบ่อน้ำต้นมีความสำคัญสำหรับการออกแบบ นอกจากนี้รูปร่างของบ่อขึ้นอยู่กับสภาพ และขอบเขตของที่ดิน และการเลือกชนิดของพืชที่จะนำมาปลูกขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำเสียสภาพทางอุทกวิทยา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน [3]

ส่วนน้ำออกของบึงประดิษฐ์แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน (FWS) จะต้องออกแบบให้ปรับระดับน้ำควบคุมการไหลของน้ำได้สามารถวัดค่าอัตราการไหลออกของน้ำได้ ถ้าการกระจายน้ำเข้าระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และมีน้ำไหลเข้าอย่างช้าๆ ผ่านราก และกิ่งก้านของพืชที่แผ่กระจายอยู่ทั่วไปในระบบจะทำให้เกิดการไหลของน้ำตามกัน (Plug flow) [3]



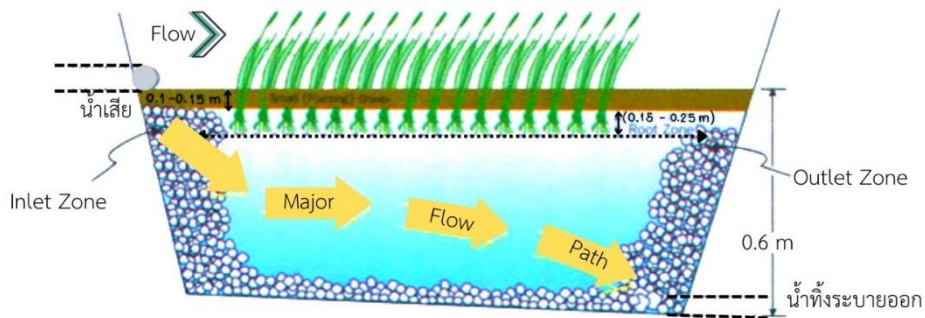
รูปที่ 2.12 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS [24]

### 2.2.2 แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยการไหลของน้ำทั้งแนวราบและแนวตั้งผ่านแผ่นลอยน้ำพองพืช ซึ่งเป็นวัสดุตัวกลางใช้พองพืชที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ และรากพืชขุดใต้ผิวน้ำทำให้แบคทีเรียยึดเกาะโดย SFS จะแตกต่างกับ FWS ในเรื่องขององค์ประกอบต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานของ SFS ได้แก่ ช่องทางน้ำเข้าสู่บึงชั้นกรองน้ำธรรมชาติ วัสดุตัวกลางพองพืช และช่องทางน้ำออก ซึ่งรูปแบบของบ่อน้ำแบบ SFS จะคล้ายกับแบบ FWS แต่การออกแบบจะแตกต่างกันไปตามความนิยมของผู้ออกแบบ ในการดำเนินการที่ถูกต้อง SFS จะต้องให้มีการไหลของน้ำส่วนใหญ่ในแนวราบ และผ่านวัสดุตัวกลาง สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ ราคาของวัสดุตัวกลางความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน และพื้นที่หน้าตัดที่จำเป็นสำหรับให้น้ำไหลเข้าระบบ และ SFS จะต้องสามารถรวบรวมน้ำจากส่วนที่อยู่ต่ำกว่าชั้นวัสดุตัวกลางไปประมาณ 0.3 - 0.6 m โดยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำใต้ผิวดิน [3] แบ่งออกเป็น 2 ระบบดังนี้

#### 2.2.2.1 การไหลตามแนวราบ (Horizontal subsurface flow)

การไหลตามแนวราบประกอบด้วยบึงที่ปลูกด้วยพืชใล่ล้นน้ำ และพองพืชด้วยแผ่นลอยน้ำพองพืช นอกจากนี้ยังมีตัวกลางที่อาจเป็นดิน กรวด หรือทราย น้ำเสียจะถูกปล่อยออกจากท่ออย่างช้าๆ ตามแนวนอนผ่านแผ่นลอยน้ำพองพืช และตัวกลางจนกระทั่งถึงทางน้ำออก ในระหว่างการไหลผ่านชั้นรากพืชจะเกิดกระบวนการกรองอนุภาค การดูดซึมสารอาหาร และการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ที่รากและแผ่นลอยน้ำพองพืช ระบบ SFS ดังรูปที่ 2.13 กระบวนการทางกายภาพ เช่น การปล่อยให้ตกตะกอน และกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การบำบัดสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ [3]



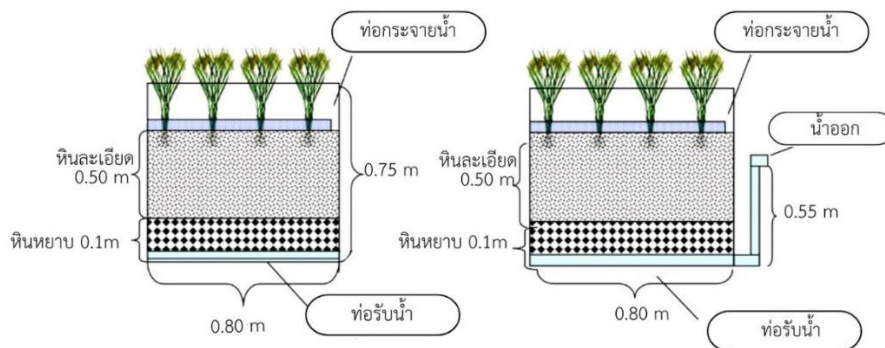
รูปที่ 2.13 SFS แบบการไหลตามแนวราบ [25]

ข้อดีของบึงประดิษฐ์ที่ไหลตามแนวราบ คือ เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย และไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป นอกจากนี้ระบบยังสามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากกว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน FWS และมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่า

ข้อจำกัดของบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอน คือ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลง และยุ่งนอกจากนี้ระบบยังมีค่าก่อสร้างที่สูงกว่าบึงประดิษฐ์แบบ FWS เพราะต้องคำนึงถึงชั้นกรองและระบบท่อที่จะใช้ภายในระบบ [3]

2.2.2.2 การไหลตามแนวตั้ง (Vertical subsurface flow)

การไหลตามแนวตั้งประกอบด้วยชั้นกรวดหรือหินละเอียดต่อด้วยหินหยาบโดยปลูกต้นพืชบนชั้นหินละเอียดหรือบนตัวกลาง เช่น แผ่นลอนน้ำพุงพืชให้ไหลพื้นน้ำ น้ำเสียจะไหลในแนวตั้งลงสู่พื้นของระบบบึงประดิษฐ์ และที่ก้นบึงจะเป็นที่กักเก็บน้ำเป็นการเติมออกซิเจนไปสู่พื้นของระบบบึงประดิษฐ์ ในช่วงที่น้ำแห้งอากาศจะแทรกเข้ารูพรุนของหินเมื่อทำการสูบน้ำเข้าอากาศจะถูกผลักรูพรุนของชั้นหินทำให้น้ำเสียที่ถูกปล่อยเข้าระบบได้รับปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น [3] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การไหลตามแนวตั้ง [26]

ข้อดีของบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวดิ่ง คือ เป็นระบบที่ง่ายต่อการควบคุมดูแล บำรุงรักษา และพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสิ่งปฏิกูลได้ดีกว่าการใช้ลานตากตะกอน โดยทั่วไปความถี่ในการตกเอาชั้นตะกอนออกจากระบบจะน้อยกว่าการใช้ลานตากตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำที่ผ่านออกมาจากชั้นกรองยังสามารถทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ในชั้นกรองทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียในส่วนที่เป็นของเหลวได้ดีอีกด้วย [26]

ข้อจำกัดของบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวดิ่ง คือ ปัญหาการเหี่ยว และร่วงโรยของพืชในระยะเริ่มต้นของการเดินระบบในกรณีที่ใช้ระบบในการบำบัดสิ่งปฏิกูลซึ่งความเข้มข้นสูง [26]

### 2.2.3 พืชสำหรับระบบบึงประดิษฐ์

พืชที่นิยมปลูกในบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่มักจะเป็นพืชจำพวก ธูปฤๅษี อ้อ กก แผลง และหญ้าทรงกระเทียมเพราะเป็นพืชที่สามารถดึงออกซิเจน (Oxygen) จากชั้นบรรยากาศได้ดี ซึ่งความสามารถในการดึงออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืช และปริมาณออกซิเจนในดินหรือชั้นกรอง นอกจากนี้พืชที่ใช้ควรเป็นพืชที่ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี และทนต่อมลภาวะทางน้ำได้สูง [3]

#### 2.2.3.1 พืชธูปฤๅษี

ชื่อภาษาไทย	ธูปฤๅษี
ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Typha angustifolia</i> L.
วงศ์	TYPHACEAE
ชื่อสามัญ	Cat-tail, Elephant grass, Lesser reedmace Narrow-leaved Cat-tail
ชื่ออื่นๆ	กกช้าง กกรูป ปรีอ หญ้าสลาบลวง

#### 2.2.3.1.1 การขยายพันธุ์

เมล็ดมีขนอ่อนนุ่ม ปลิวไปตามลม มีอาณาเขตการกระจายพันธุ์อยู่ทั่วโลกในเขตร้อน และเขตอบอุ่น สำหรับประเทศไทยพบได้ทั่วไปในทุกภูมิภาค ขึ้นตามพื้นที่ต่างๆ สามารถควบคุมการขยายพันธุ์ได้โดยวิธีเขตกรรม (Cultural control) การไถพรวน เตรียมดิน เตรียมพื้นที่ปลูกพืชในขณะเดียวกันก็เป็นการกำจัดวัชพืชไปพร้อมๆ กัน การไถพรวนควรกระทำสองครั้ง ครั้งแรกเมื่อไถพรวนแล้ว ตากแดดทิ้งไว้ให้เศษของธูปฤๅษีแห้งตาย แต่เมล็ดจะสามารถงอกขึ้นมาอีกครั้งหนึ่งได้ จึงควรพรวนดินอีกครั้งหนึ่ง เพื่อกำจัดเมล็ดวัชพืชที่งอกขึ้นมาในภายหลัง [27]

#### 2.2.3.1.2 ลักษณะทางด้านพฤกษศาสตร์

ธูปฤๅษีเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่เป็นไม้ล้มลุก อายุหลายปี มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรป และอเมริกา ลำต้นมีลักษณะตั้งตรง ดังรูปที่ 2.15 มีความสูงประมาณ 1.5 - 3 m เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ ขยายพันธุ์ด้วยผลหรือเมล็ด [28] ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ลำต้นรูปฤๅษี [27]



รูปที่ 2.16 ต้นรูปฤๅษี [28]

ใบรูปฤๅษี ใบเป็นใบเดี่ยว มีกาบใบเรียงสลับในระนาบเดียวกัน ลักษณะใบเป็นรูปแถบ มีความกว้างประมาณ 1.2 - 1.8 cm และยาวประมาณ 50 - 120 cm [28] ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ใบรูปฤๅษี [28]

ดอกรูปฤๅษี ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ช่วงดอกเพศผู้มีความยาวประมาณ 8 - 40 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางข้อประมาณ 0.2 - 0.7 cm และมีใบประดับประมาณ 1 - 3 ใบ ส่วนช่วงดอกเพศเมียจะมีความยาวประมาณ 5 - 30 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของข้อประมาณ 0.6 - 2 cm ไม่มีกลีบเลี้ยง และกลีบดอก เกสรเพศผู้ส่วนมากแล้วจะมี 3 อัน มีขนชั้นล้อมรอบ ก้านเกสรเพศผู้จะสั้น มีอับเรณูยาวประมาณ 1.5 - 2 mm ส่วนดอกเพศเมียจะมีใบประดับย่อยเป็นรูปเส้นด้าย มีรังไข่เป็นรูปกระสวย ก้านของรังไข่เรียว และยาวประมาณ 5 mm มีขนยาว ส่วนก้านเกสรเพศเมียจะ

ยาวประมาณ 1 - 1.5 mm มีขนสั้นกว่าก้านของรังไข่ยอดเกสรมีลักษณะเป็นรูปแถบหรือรูปใบหอก และยังสามารถออกดอกได้ตลอดทั้งปี [28] ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ดอกรูปถั่ว [28]

ผลรูปถั่ว ผลมีขนาดเล็กมาก เมื่อแก่จะแตกตามยาว ลักษณะเป็นรูปรี ดัง

รูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลรูปถั่ว [28]

#### 2.2.3.2 พืชพุทธรักษา

ชื่อภาษาไทย

พุทธรักษา

ชื่อวิทยาศาสตร์

*Canna indica*, Linn

ชื่อวงศ์

Cannaceae

ชื่อสามัญ

indian shot

ชื่ออื่น

พุทธร, ดอกบัวหลวง, สาคุมอญ, สาคุหัวข่า [29]

##### 2.2.3.2.1 การขยายพันธุ์ [30]

การขยายพันธุ์แบ่งออกเป็น 2 วิธีโดยวิธีที่ 1 ขยายพันธุ์โดยการแบ่ง tuberous rhizome โดยมีต้นติดจะให้ดอกเร็วกว่าการแบ่งเป็นชิ้นๆทำให้สามารถขยายพันธุ์ได้มากกว่า



และเก็บได้นาน การขยายพันธุ์แบบนี้จะได้ลักษณะตรงตามพันธุ์ของพ่อแม่ และวิธีที่ 2 ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดของดอกพุทธรักษาที่เพาะแล้วนำไปปลูกแต่การขยายพันธุ์แบบนี้จะมีลักษณะไม่เหมือนของพ่อแม่

#### 2.2.3.2.2 ลักษณะทางด้านพฤกษศาสตร์ [30]

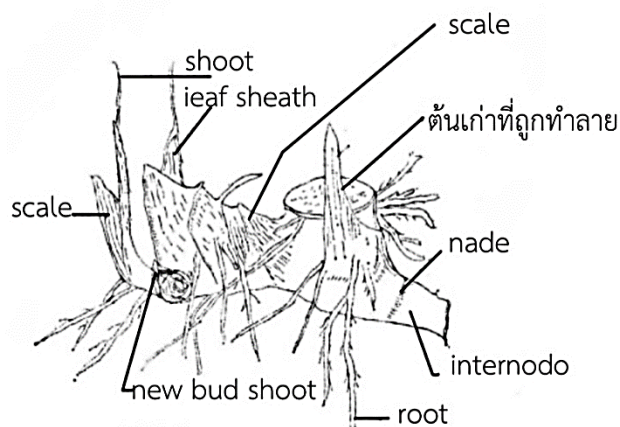
พุทธรักษาเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว อวบน้ำไม่มีเนื้อไม้ ลักษณะของต้นพุทธรักษา ดังรูปที่ 2.20 เมื่อปลูกในเขตร้อนพืชจะมีอายุหลายปีแต่ถ้าปลูกในเขตอบอุ่นหรือเขตหนาวจะมีอายุเพียงปีเดียว (Annual plant)



รูปที่ 2.20 ต้นพุทธรักษา [31]

ราก (Root) ของพุทธรักษาเป็นระบบแบบ Fibrous root system รากออกจากส่วนของหัว (Tuberous rhizome) และโคนของลำต้น โดยรากแตกออกมาใหม่จะมีลักษณะอวบ ไม่มีแขนงสีขาว และจะมีสีเข้มขึ้น เมื่ออายุมากขึ้นแขนงจะแตกออกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1/3 cm ดังรูปที่ 2.21

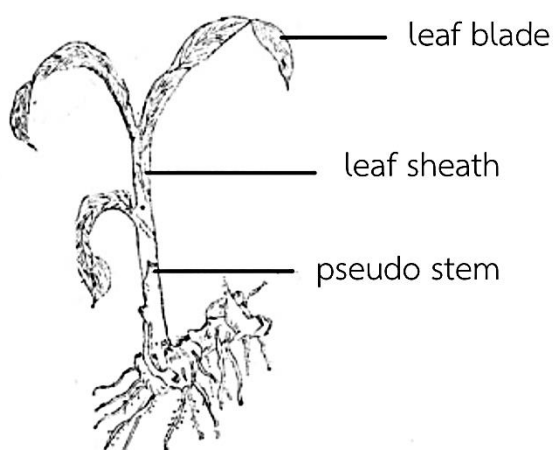
หัว (Tuberous rhizome) ของพุทธรักษาแบบ Tuberous rhizome เมื่อปลูกพุทธรักษาด้วยเมล็ด หัวจะเติบโตเป็นแบบ Tuber ก่อนแล้วแตกกิ่ง (Tiller) เป็นแบบ Rhizome ซึ่ง Rhizome จะแทงออกด้านข้างขนานไปตามพื้นดิน และบนตายอดของ Tiller ที่อยู่ปลายสุดนั้นเป็นตาที่ Active ที่สุดจะเติบโตหัวเป็นแบบ Tuber และแทงขึ้นมาเหนือพื้นดินเมื่อต้นแรกที่เกิดจากตายอดของกิ่งนี้โตมากขึ้นหรือถูกทำลายหรือออกดอก ตาที่อยู่ถัดลงมา ก็จะเติบโตเป็นต้นขึ้นมาแทนในเวลาต่อมา ต่อจากนั้นกิ่ง (Tiller) ก็อาจจะแตกออกมาอีกจาก Tuberous rhizome ซึ่งต้นพุทธรักษา ก็จะกลายเป็นกอใหญ่ขึ้นโดยมี rhizome ติดต่อกันหมดเป็นกลุ่มๆ ซึ่ง Tuberous rhizome เป็นลำต้นที่แท้จริงและยังเป็นทีสะสมอาหาร ประกอบด้วย Node, Internode, Bud และ Leaf scale ซึ่ง Bud จะอยู่เหนือ Node โดยมี Leaf scale เป็นแผ่นสีน้ำตาลหุ้มไว้ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนต่างๆของ tuberous rhizome [30]

ลำต้น (Pseudo-Stem) เป็นแบบลำต้นเทียม (Pseudo-Stem) ขึ้นอยู่บน Tuberous rhizome ลำต้นมีสีเขียวประกอบด้วยกาบใบ (Leaf sheath) ข้อ (Node) ปล้อง (Internode) และตา (Bud) เหมือนกัน โดยตาจะอยู่เหนือข้อ และถูกกาบใบหุ้มเอาไว้จะไม่แตกออกมาเป็นกิ่งก้านสาขา ดังรูปที่ 2.22

ใบ (Leaf) ประกอบด้วยแผ่นใบ (Leaf blade) และกาบใบ (Leaf sheath) แผ่นใบมีสีเขียว ปลายแหลม รูปใบพาย (oblong and acute green) กว้าง 4 - 7 in ยาว 1 - 2 ft ขอบใบ (Rim) อ่อน และเรียบ มีสีเขียวใสเมื่ออายุมากจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล มีเส้นกลางใบ (Mid rib) ใหญ่ มีเส้นใบ (Vein) ขนานกัน และทำมุมประมาณ 35 องศา กับเส้นกลางใบ แผ่นใบจะมีสาร คิวติน (Cutin) สีขาวเคลือบไว้ ดังรูปที่ 2.22



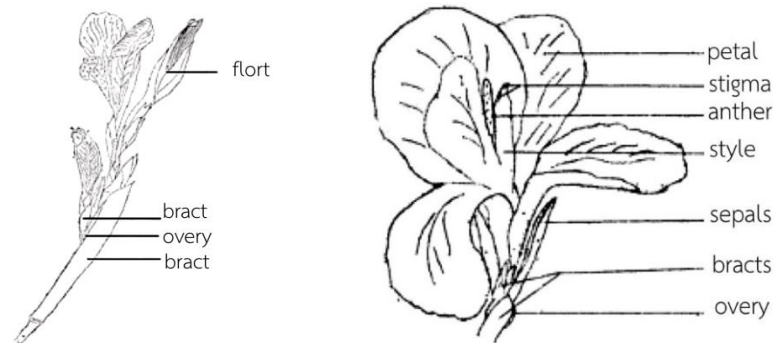
รูปที่ 2.22 ลักษณะใบ และลำต้น [30]

ช่อดอก (Inflorescence) เป็นแบบ Panicle เกิดจากตายอด (Terminal bud) ความยาว 1 - 2 ft โดยส่วนโคนของก้านช่อดอกที่แตกแขนง (Lateral axis) และส่วนโคนของก้านช่อดอก (Main axis) จะมีลักษณะกลมส่วนของก้านช่อดอกที่อยู่ตอนปลายจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม และ

ลักษณะของช่อดอกจะขึ้นอยู่กับความยาวของก้านแกนกลาง และก้านแขนงตลอดจำนวนของก้านแขนง ดังรูปที่ 2.23

ต้นหนึ่งๆ จะมีช่อดอกช่อเดียว และเมื่อออกดอกแล้วจะไม่ออกดอกอีก จะมีชีวิตอยู่อีกหลายเดือน หลังจากออกดอกแล้ว การบานของดอก (Floret) แต่ละกลุ่มดอกจะบานไม่พร้อมกัน โดยบานทีละ 1 - 2 ดอก ตาข้างล่างขึ้นมาข้างบนต่อเนื่องกันไป ซึ่งกลุ่มดอกบนสุดของ Main axis จะบานก่อน แล้วจึงเป็นกลุ่มของ Lateral axis ที่อยู่ถัดลงมาแล้วจึงเป็นกลุ่มดอกของ Lateral axis ที่อยู่ล่างสุดจะบานทีหลังสุด ดังรูปที่ 2.23

ช่อหนึ่งๆ ประกอบด้วย (1) ก้านช่อดอก (Peduncle) มีแกนกลาง และก้านแขนง ซึ่งจะแตกออกจากแกนกลาง (2) Bracts มีลักษณะเป็นแผ่นสีเขียวทำหน้าที่ หุ้มหรือรองรับส่วนต่างๆ ของดอกมิให้ได้รับอันตราย Bracts แบ่งออกได้ 3 ชนิดตามตำแหน่งที่อยู่ ชนิดที่ 1 Bracts รองรับก้านช่อดอก ชนิดที่ 2 Bracts รองรับดอก อยู่ตามฐานของดอกย่อยหุ้มเอาส่วนของรังไข่ของดอกเอาไว้ ชนิดที่ 3 Bracts รองรับส่วนของกลีบเลี้ยง และกลีบดอก และ (3) ดอก (Floret) เป็นแบบ Perfect complete flower ดอกมีหลายสี ทั้งสีเรียบ จุด แถบ ซึ่งเกิดจากการผสมของแม่สี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีขาวย ดังรูปที่ 2.23

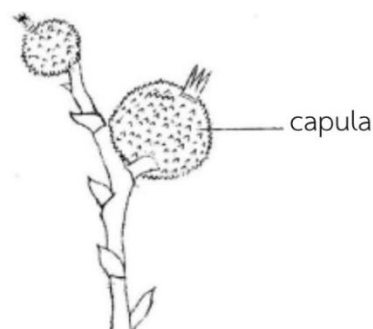


(ก) ช่อดอกที่กำลังบาน

(ข) ส่วนต่างๆของดอก

รูปที่ 2.23 ลักษณะของดอก (ก) ช่อดอกที่กำลังบาน (ข) ส่วนต่างๆของดอก [30]

ผล (Fruit) มีหนามเกิดจาก ovary เมื่อผลอ่อนจะเป็นสีเขียว เมื่อผลแก่จะเปลี่ยนเป็นสีดำ และผลๆหนึ่งจะประกอบด้วยเมล็ดที่แก่แล้วประมาณ 1 - 10 เมล็ด ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ผล (Fruits) [30]

## 2.2.3.3 พืชอะเมซอนใบกลม

ชื่อภาษาไทย	อะเมซอนใบกลม ( <i>Echinodorus cordifolius</i> )
ชื่อสามัญ	<i>Burhead, Texas Mud Baby</i>
ชื่อวงศ์	ALISMATACEAE

เป็นพืชน้ำล้มลุกที่มีอายุหลายปี ลำต้นเป็นเหง้าสั้นๆ อยู่ใต้ดิน ลำต้นเหนือดินเป็นกอ สูง 30 - 60 cm ใบเดี่ยวแตกเป็นกอ ใบรูปไข่ถึงรูปหัวใจ กว้าง 8 - 20 cm ยาว 10 - 20 cm โคนใบหยักเว้า ปลายใบแหลมมน ขอบใบเรียบ สีเขียว ก้านใบ และก้านดอกเป็นเหลี่ยม ยาว 40 - 50 cm โดยก้านใบแผ่กว้างหุ้มประกบกันไว้ ดอกช่อสีขาว ก้านช่อดอกยาว ดอกย่อย จำนวนมากออกเป็นคู่ มีใบประดับสีเขียวรองรับ ดอกสมบูรณ์เพศ แต่ละช่อย่อยมี 5 - 15 ดอก กลีบเลี้ยงสีเขียวขนาดเล็ก 3 กลีบ กลีบดอกใหญ่บาง 3 กลีบ เกสรเพศผู้จำนวนมากสีเหลืองสด เกสรเพศเมียภายในมีรังไข่เป็นกลุ่มบนฐานรอง ดอกเดี่ยวกันผลแห้งรูปทรงกลม ขนาดประมาณ 1 cm แต่ละผลย่อยมีเมล็ดเพียง 1 เมล็ดสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับน้ำ 10 - 50 cm ที่มีแสงครึ่งวัน เต็มวัน ทั้งนี้นิยมใช้ปลูกเป็นไม้ประดับในการจัดสวนเขตร้อนในหลายประเทศ [32]

## 2.2.3.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ [32]

เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ไม่มีเนื้อไม้เป็นพืชน้ำล้มลุกอายุ 1 - 2 ปี บางชนิดอาจจะมีอายุยืนนานหลายปี โดยจะมีลักษณะอาศัยขึ้นในดินโคลนที่ชื้นแฉะบริเวณที่น้ำท่วมถึง

ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้า (rhizome) อยู่ใต้ดินมีข้อปล้อง และตาเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 2.25 (ก) อาจจะมีไหล (Stolon) เป็นลำต้นเหนือดินที่ทอดนอนไปตามพื้น และแตกหน่อพร้อมรากใหม่ที่ข้อ ดังรูปที่ 2.25 (ข)

(ก) *E. tenellus*(ข) *E. magdalenensis*

รูปที่ 2.25 ลักษณะลำต้นที่เป็นเหง้าใต้ดิน (rhizome) และลักษณะลำต้นเหนือดินเป็นไหล (stolon)  
(ก) *E. tenellus* (ข) *E. magdalenensis* [32]

ใบแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะ และมีความผันแปรสูงมากตั้งแต่ใบกลมหรือรูปหัวใจ ดังรูปที่ 2.26 (ก) รูปร่างรี รูปไข่ ดังรูปที่ 2.26 (ข) รูปหอก ดังรูปที่ 2.26 (ค) และยาวแบบริบบิ้น ดังรูปที่ 2.26 (ง) ความสูงต้นมีตั้งแต่เล็กมากสูงเพียง 5 - 8 cm จนถึงใหญ่มาก สูงได้ถึง 1 - 4 m

ในบางชนิด แผ่นใบมีหลายสีบางชนิดสีเขียวอ่อน บางชนิดมีสีเขียวเข้มเกือบดำหรือสีน้ำตาลอมแดง บางชนิดเส้นใบบางแต่บางชนิดมีเส้นใบหนามาก และนูนเป็นสัน โดยทั่วไปเส้นใบจะมีสีอ่อนกว่าสีเขียว



(ก) กลมหรือรูปหัวใจ

(ข) รีหรือรูปไข่

(ค) หอก

(ง) ยาวคล้ายริบบิ้น

รูปที่ 2.26 ลักษณะของใบ (ก) กลมหรือรูปหัวใจ (ข) รีหรือรูปไข่ (ค) หอก (ง) ยาวคล้ายริบบิ้น [32]

ลักษณะกลีบดอกมีสีขาวมี 3 กลีบ ติดบนก้านช่อดอก มีกลีบเลี้ยง 3 กลีบ ซึ่งดอกจะบานอยู่บนก้านช่อดอกที่เรียงตัวแบบช่อกระจายเป็นระยะๆ ดังรูปที่ 2.27 (ก) ซึ่งเป็นดอกสมบูรณ์เพศมีเกสรเพศผู้จำนวน 6 อันหรือมากกว่า เกสรเพศเมียจำนวนมากอัดแน่นกันอยู่บนฐานรองดอกรูปกรวย ดังรูปที่ 2.27 (ข)



(ก) ดอกสีขาว 3 กลีบบนก้านช่อดอก

(ข) ดอกสมบูรณ์เพศ

รูปที่ 2.27 ลักษณะดอก (ก) ดอกสีขาว 3 กลีบบนก้านช่อดอก (ข) ดอกสมบูรณ์เพศ [32]

ผล และเมล็ดจะออกผลย่อยขนาดเล็ก โดยผลแก่จะมีผลเป็นลักษณะกลม ดังรูปที่ 2.28 (ก) เมื่อผลแก่รูปร่างของเมล็ดยี่ดอกคล้ายหนาม ดังรูปที่ 2.28 (ข) เมื่อแก่ลงอีกจะยี่ดอกคล้ายปากนก ดังรูปที่ 2.28 (ค) และผลอ่อนจะมีลักษณะเป็นผลแบบกลุ่ม ดังรูปที่ 2.28 (ง) เมล็ดรูปร่างกลมหรือไข่ ดังรูปที่ 2.28 (จ) และเมล็ดยี่ดอกคล้ายปากนก ดังรูปที่ 2.28 (ฉ)



รูปที่ 2.28 ลักษณะผลแก่และเมล็ด (ก) ผลลักษณะกลม (ข) เมล็ดคล้ายหนาม (ค) เมล็ดคล้ายปากนก ลักษณะผลอ่อนและเมล็ด (ง) ผลแบบผลกลุ่ม (จ) รูปร่างกลมหรือรูปไข่ (ฉ) เมล็ดยึดคล้ายปากนก [32]  
 บัวเมซอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งปริมาณของธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโตของบัวเมซอน คือ เมื่อบัวเมซอนมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียนี้อาจลดลง [33]

#### 2.2.3.4 พืชหญ้าแฝก

ชื่อภาษาไทย

หญ้าแฝก

ชื่อสามัญ

*Vetiver grass, Khuskhus, Cuscus, Sevendara grass*

ชื่อวิทยาศาสตร์

*Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty*

ชื่อพ้องวิทยาศาสตร์

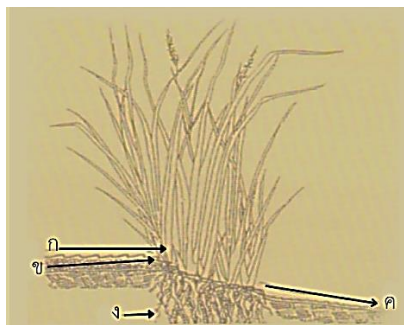
*Vetiveria zizanioides (L.) Nash*

จัดอยู่ในวงศ์หญ้า

(POACEAE หรือ GRAMINEAE) [34]

หญ้าแฝก เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้า เช่นเดียวกับข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย หญ้าแฝกที่พบในสภาพธรรมชาติมีถิ่นกำเนิดตามพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วม ริมนองบึง และในป่า โดยหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพภูมิประเทศที่เป็นที่ราบใกล้เคียงระดับน้ำทะเล ถึงพื้นที่ภูเขาสูงที่ระดับ 2,000 m จากระดับน้ำทะเล หรือในพื้นที่ดินเปรี้ยว ดินต่าง ดินเค็ม ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ รวมทั้งพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนน้อย 200 mm ถึงพื้นที่ที่มีฝนตกชุก 3,900 ถึง 5,000 mm และพื้นที่สภาพภูมิอากาศหนาวเย็น -9 °C ถึงอากาศร้อนจัด 45 °C

ลักษณะกลไกการบำบัดของหญ้าแฝก คือ น้ำตะกอนดินจะไหลมาปะทะกอหญ้าแฝก ดังรูปที่ 2.29 แล้วตะกอนดินจะตกค้างอยู่เมื่อเวลาผ่านไปหญ้าแฝกจะแตกหน่อสูงขึ้นมาเป็นชั้นๆ น้ำที่ไหลผ่านไปอย่างช้าๆ จะมีบางส่วนซึมลงสู่ดิน ซึ่งรากนั้นจะหยั่งลงลึกแผ่ไปได้กว้างเพียง 50 cm



รูปที่ 2.29 ลักษณะหญ้าแฝก และกลไกการบำบัด [35]

(ก) น้ำตะกอนดินไหลมาปะทะกอหญ้าแฝก

(ข) ตะกอนดินตกค้างอยู่

(ค) น้ำไหลผ่านช้าๆ บางส่วนซึมลงสู่ดิน

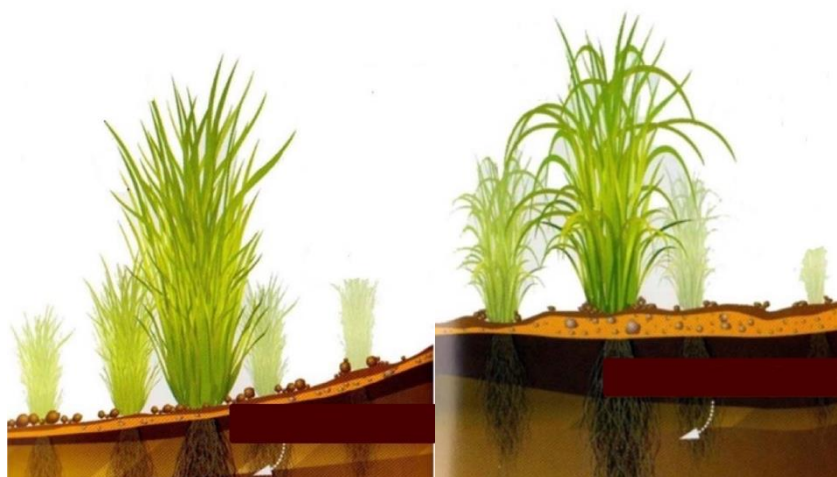
(ง) รากหยั่งลงลึก แฝกวางเพียง 50 cm

#### 2.2.3.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ [35]

ชนิดของหญ้าแฝกสำหรับหญ้าแฝกในประเทศไทย กรมพัฒนาที่ดิน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้สำรวจตัวอย่างทั่วประเทศ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ หญ้าแฝกกลุ่ม และหญ้าแฝกดอน ซึ่งมีความแตกต่างในทางพฤกษอนุกรมวิธาน หญ้าแฝกที่ขึ้นในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ

แฝกกลุ่ม หรือ แฝกหอม เดิมมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria zizanioides* ปัจจุบันเริ่มใช้ชื่อใหม่เป็น *Chrysopogon zizanioides* ซึ่งมีลักษณะใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง หลังใบมีลักษณะโค้งมนถึงเหลี่ยม และใบมีความยาว 45 - 100 cm กว้าง 0.6 - 12 cm เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบทำให้ดูมัน ดังรูปที่ 2.30 (ก)

แฝกดอน เดิมมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria nemoralis* ปัจจุบันใช้ชื่อใหม่เป็น *Chrysopogon nemoralis* ใบยาว 35 - 80 cm กว้าง 0.4 - 0.8 cm ปลายยอดใบแผ่โค้งลงคล้ายกอดตะไคร้ ด้านหลังใบพันเป็นสันสามเหลี่ยม เส้นกลางใบสังเกตเห็นได้ชัดเจน เนื้อใบหยาบกร้าน ไม่เคลือบมัน ดังรูปที่ 2.30 (ข) และเปรียบเทียบลักษณะของหญ้าแฝกดังตารางที่ 2.1



(ก) แฝกกลุ่ม

(ข) แฝกดอน

รูปที่ 2.30 แฝกกลุ่ม และแฝกดอน [35]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบชนิดของการหญ้าแฝก [35]

ลักษณะ	หญ้าแฝกกลุ่ม	หญ้าแฝกดอน
ถิ่นกำเนิด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย พบในพื้นที่ลุ่ม มีความชื้นสูงหรือมีน้ำขัง</li> <li>- มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์ทั่วไป</li> <li>- เป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง</li> <li>- สูงประมาณ 150 - 250 cm</li> <li>- มีการแตกกิ่งและแตกแขนงลำต้นได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศไทย ลาว เขมร และเวียดนาม พบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง</li> <li>- กระจายพันธุ์ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติไม่มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์</li> <li>- เป็นพุ่มใบยาวปลายจะแผ่โค้งลง</li> <li>- สูงประมาณ 100 - 150 cm</li> <li>- ปกติไม่มีการแตกแขนงลำต้น</li> </ul>
ใบ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยาว 45 - 100 cm กว้าง 0.6 - 1 cm</li> <li>- ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาวมีรอยกั้นขวาง ในเนื้อใบส่องกับแดดเห็นชัดเจน</li> <li>- เนื้อใบค่อนข้างเหนียวมีไขเคลือบมากทำให้นุ่มมัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยาว 35 - 80 cm กว้าง 0.4 - 0.8 cm</li> <li>- ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นเส้นแข็งสามเหลี่ยมท้องใบสีเดียวกับด้านหลังใบแต่ซีดกว่า</li> <li>- เนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูกร้านไม่เคลือบมัน</li> </ul>
ช่อดอกและดอก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่อดอกสูง 150 - 250 cm</li> <li>- ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง</li> <li>- ดอกย่อยส่วนใหญ่ไม่มีรยางค์แข็ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สูง 100 - 150 cm</li> <li>- มีได้หลายสี ตั้งแต่สีขาวครีม สีม่วง</li> <li>- ดอกย่อยมีรยางค์แข็ง</li> </ul>
เมล็ด	- ขนาดโตกว่าหญ้าแฝกดอนเล็กน้อย	- ขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกกลุ่ม
ราก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหย อยู่เฉลี่ย 1.4 - 1.6% ของน้ำหนักแห้ง</li> <li>- โดยทั่วไปรากจะหยั่งลึกได้ประมาณ 100-300 cm ที่อายุประมาณ 1 ปี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีความหอม</li> <li>- รากสั้นกว่าโดยทั่วไปจะหยั่งลึกประมาณ 80-100 cm ที่อายุประมาณ 1 ปี</li> </ul>
การใช้ประโยชน์	- รากใช้ทำน้ำมันหอม สบู่ เครื่องประดับ เช่น กระเป๋า พัด ไม้แขวนเสื้อ สมุนไพร และเป็นยากันแมลงในตัวเสื้อผ้า	- ชาวพื้นบ้านใช้ใบมาทำวัสดุบุหลังคา แต่ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน

### 2.3 วัสดุคอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติ (Composite material natural)

วัสดุคอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติมีความสำคัญในการใช้ผลิตวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นสารเสริมแรงแทนเส้นใยสังเคราะห์โดยวัตถุดิบสามารถหาได้ทั่วไปในประเทศไทย บางชนิดเป็นวัสดุเหลือใช้จากทางการเกษตร ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะมีลักษณะเบา ใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับผลิตภัณฑ์ ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ [36]



### 2.3.1 ลักษณะของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติ [36]

วัสดุจากเส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเลือกสำคัญที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite) แบ่งชนิดของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 2.3.1.1 คอมโพสิตจากวัสดุธรรมชาติ

คอมโพสิตจากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ ไยยูคาลิปตัส ไยกล้วยง ไยปอ ไยผักตบชวา ไยสับปะรด ไยกล้วยและ ไยมะพร้าว วัสดุที่มาจากธรรมชาติสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานดังนี้

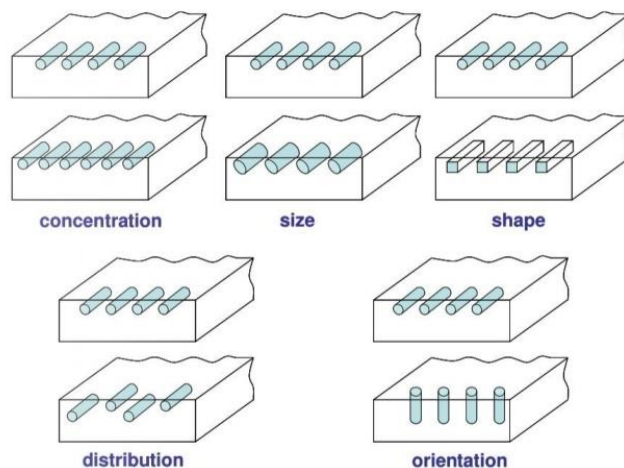
1. เส้นใยถูกนำมาใช้งานโดยตรง ได้แก่ ไยยูคาลิปตัส ไยกล้วยง ไยปอ ไยผักตบชวา ไยสับปะรด ฯลฯ
2. เศษของวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ ได้แก่ ชานอ้อย ฟางข้าว หญ้าแฝก ชางข้าวโพด ไยมะพร้าว ฯลฯ

#### 2.3.1.2 คอมโพสิตจากวัสดุสังเคราะห์

คอมโพสิตจากวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ ไยพอลิพอฟิลีน พอลิเอทิลีน ฯลฯ ซึ่งถูกสังเคราะห์เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง

### 2.3.2 หลักการทำวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต (Composite) เป็นการนำเอาโครงสร้างทางเคมีหรือโครงสร้างเส้นใยตั้งแต่สองชนิดที่แตกต่างกันมาผสมกัน โดยที่ยังสามารถแยกวัฏภาค (Phase) ของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อวัสดุคอมโพสิตได้ โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย 2 วัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนหลักหรือส่วนเมทริกซ์ (Matrix) และอีกส่วนหนึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้นหรือเรียกว่าตัวเสริมแรง (Reinforcement) [4] ซึ่งมีผลต่อสมบัติคอมโพสิตเป็นการเพิ่มความแข็งแรง การจัดเรียงตัวเส้นใย การยึดติดกันของเส้นใยและเมทริกซ์ จากงานวิจัยพบว่าอัตราส่วนเส้นใยธรรมชาติมีความสำคัญในการนำมาใช้ผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อเป็นสารเสริมแรงแทนเส้นใยสังเคราะห์ โดยที่วัสดุเหล่านี้มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย บางชนิดก็เหลือทิ้งจากวัสดุทางการเกษตร นอกจากนี้ยังเป็นการลดต้นทุน เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก เป็นการเพิ่มปริมาณการผลิต เพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับผลิตภัณฑ์ วัสดุคอมโพสิตจะได้มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และผู้ผลิต สามารถเป็นฉนวนกันความร้อน ย่อยสลายง่าย ส่วนข้อด้อยของวัสดุเส้นใยธรรมชาติ นั้นคือความไม่ทนความร้อน ความแข็งแรงไม่สูงมาก การดูดซึมน้ำมาก จึงต้องมีการปรับปรุงผิวให้เหมาะสมกับการใช้งาน [36] นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าแม้จะเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์ และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน ถ้ามีความเข้มข้น ปริมาณ ขนาด รูปร่าง ลักษณะการจัดเรียงตัว และการกระจายตัวที่ต่างกันอย่างสุดทายเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน [4] ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุคอมโพสิต [37]

### 2.3.3 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต (Composite component)

#### 2.3.3.1 ส่วนเมทริกซ์ [4]

เมทริกซ์เป็นส่วนหลักมีหน้าที่ คือ ป้องกันเส้นใยหรืออนุภาคไม่ให้เกิดความเสียหายจากสิ่งแวดล้อม ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาค และช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุคอมโพสิต พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือ เทอร์โมเซต (Thermoset)

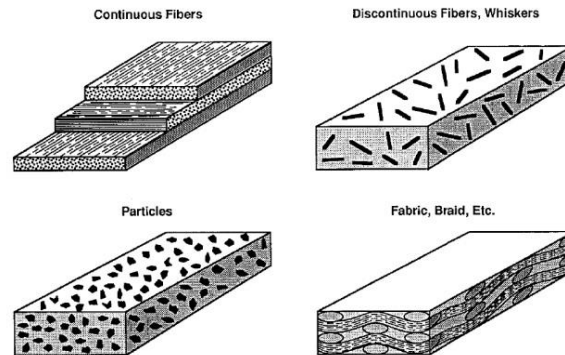
1. เทอร์โมเซตพอลิเมอร์ กลุ่มนี้จะหลอมตัวในเฉพาะครั้งแรกที่ได้รับความร้อนและเกิดการเชื่อมโยง (Cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยความร้อนหรือตัวเชื่อมขวาง (Cross linking agent) ทำให้มีเครือข่ายเป็นแบบร่างแห (Network) โครงสร้างของ พอลิเมอร์จะคงตัวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกเมื่อได้รับความร้อน เช่น อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resins) เป็นเมทริกซ์ที่มีความแข็งแรงเข้ากันได้ดีกับเส้นใยทุกชนิด

2. เทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อนแล้วแข็งตัวเมื่อทำเย็นตัวลง การหลอมตัวด้วยความร้อนทำได้หลายครั้งเนื่องจากไม่มีการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่โมเลกุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และสมบัติเชิงกล เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพอฟิลีน และพอลิสไตรีน

#### 2.3.3.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

ตัวเสริมแรงมีหน้าที่ คือ เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต ทั่วไปมักมีค่าโมดูลัสสูงมากกว่าส่วนเมทริกซ์เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผ่านมาจากเมทริกซ์ โดยประสิทธิภาพของตัวเสริมแรงขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นส่วนสำคัญ สารที่ใช้เสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แผ่น เส้นใย อนุภาคขนาดเล็ก และผืนผ้า ดังรูปที่ 2.32 [38] โดยเส้นใยหรืออนุภาคเป็นตัวเสริมแรงที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) และเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เช่น ไยมะพร้าว ไยสัปะรด ไยไหม ไยปอ ซึ่งหน้าที่ของตัวเสริมแรง คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม และเพื่อให้สามารถรับแรงกระทำจากภายนอกโดยแรงจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใยหรืออนุภาค โดยที่ลักษณะของเส้นใยที่เป็นตัวเสริมแรงที่ดีจะต้องมีลักษณะดังนี้ [4]

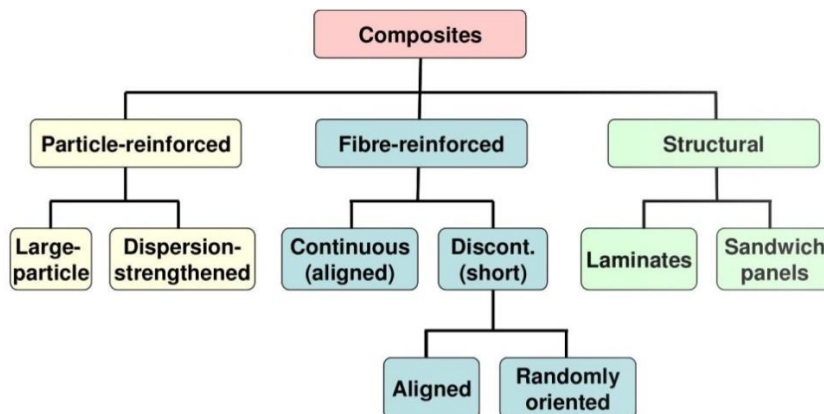
- เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็ก
- เส้นใยมีความโค้งงอ และความยืดหยุ่นสูง
- เส้นใยมีค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.32 ลักษณะ และการจัดเรียงตัวของตัวเสริมแรง [38]

#### 2.3.4 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle - reinforced composite) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber - reinforced composite) และวัสดุผสมโครงสร้าง (Structural composite) นอกจากนี้แล้ววัสดุผสมแต่ละประเภทยังสามารถเป็นประเภทย่อยๆได้อีก ดังรูปที่ 2.33 [4]



รูปที่ 2.33 แผนผังการแบ่งประเภทวัสดุคอมโพสิต [4]

##### 2.3.4.1 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle - reinforced composite) [4]

เป็นวัสดุที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรงมีรูปร่างหลายแบบ เช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุ

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Dispersion - strengthened composite) และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large - particle composite)

1. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก คือ (Dispersion - strengthened composite) อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคขนาดใหญ่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 nm อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Particle-matrix interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือ โมเลกุล

2. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large - particle composite) คือ มองเป็นภาพรวมของอนุภาคไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุลเท่านั้น เพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร

#### 2.3.4.2 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber - reinforced composite) [4]

เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดูลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสความยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ โดยมีส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยดังนี้

##### 2.3.4.2.1 เส้นใย วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใย

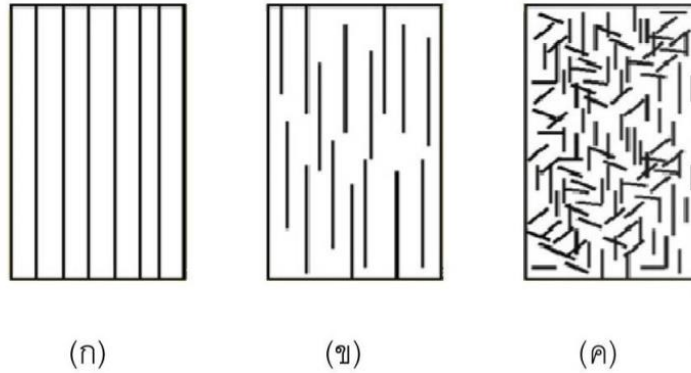
1. วิสเกอร์ คือ ผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ๆ มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูง และมีความแข็งแรงสูง มีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก เช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ และอะลูมินา

2. ไฟเบอร์ คือ เส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก มักเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก เช่น แก้ว คาร์บอน และอะลูมินา

3. ลวดเล็ก มีขนาดใหญ่กว่า วิสเกอร์และไฟเบอร์ และมักจะหมายถึงโลหะ เช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน

##### 2.3.4.2.2 ความยาวเส้นใยที่มีต่อสมบัติของคอมโพสิต

เส้นใยแบ่งตามความยาวได้เป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) นอกจากนี้เมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเมทริกซ์ให้เกิดเป็นคอมโพสิตจะ สามารถจัดเรียงตัวได้ 3 แบบ คือ (1) เส้นใยต่อเนื่อง และเรียงตัวขนาน (Continuous fiber and aligned) คือ เส้นใยมีความยาวของคอมโพสิต และเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นที่ติดตั้งรูปที่ 2.34 (ก) (2) เส้นใยเรียงตัวไม่ต่อเนื่อง แต่เรียงตัวขนาน (Discontinuous fiber and aligned) คือ เส้นใยไม่ยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิต แต่ยังจัดเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าในกรณีแรก ดังรูปที่ 2.34 (ข) และ (3) เส้นใยไม่ต่อเนื่อง และเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Discontinuous fiber and randomly oriented) คือ เส้นใยเรียงตัวไม่เป็นระเบียบไม่ขนานกันทำให้มีประสิทธิภาพการเสริมแรงต่ำที่สุด ดังรูปที่ 2.34 (ค)



รูปที่ 2.34 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ [4]

(ก) เส้นใยต่อเนื่อง และเรียงตัวขนานกัน

(ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่อง และเรียงตัวขนานกัน

(ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่อง และเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

#### 2.3.4.3 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงโครงสร้าง (Structural composite) [4]

วัสดุคอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียว และสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุคอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

1. วัสดุคอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) ประกอบด้วยแผ่นซีทที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวมาเรียงซ้อนกัน เช่น แผ่นวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัวขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นวัสดุผสมแบบชั้น เพื่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นซีทแบบสลับทิศทางของเส้นใย

2. ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel) มีส่วนประกอบเป็นแกนกลางหรือที่เรียกว่า Core ประกบที่ด้านบน และล่างด้วยแผ่นซีทที่เป็นผิวนอกหรือที่เรียกว่า Face โดยมีแผ่นกาวทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น Core และ Face ติดกัน และมักจะเป็นโครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน รูปแบบโครงสร้างของ Core ที่นิยมใช้คือแบบรังผึ้ง (Honeycomb) วัสดุที่ใช้ทำเป็น Core ได้แก่ โพลีเมอร์โฟม และยางสังเคราะห์

#### 2.3.5 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตผลิตภัณฑ์ [36]

การทำให้ยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติหรือในการขึ้นรูปเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์สามารถทำได้หลากหลายวิธีการดังนี้

##### 2.3.5.1 การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใย

การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยสามารถดัดแปรทางเคมีและทางกายภาพ มีผลทำให้สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ได้ เนื่องจากการเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใย และการเพิ่มแรงตึงผิวของเส้นใยด้วยการเคลือบ

##### 2.3.5.2 การดัดแปรเมทริกซ์

การดัดแปรเมทริกซ์เป็นการนำวัสดุธรรมชาติที่มีสมบัติด้านความยาวเป็นตัวหลักมาผสมเพื่อให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงหรือยืดหยุ่นตัวดีขึ้น

### 2.3.5.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน

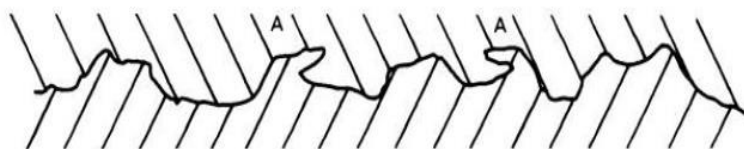
เป็นการเติมสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย เช่น การเพิ่มความเสถียร เพิ่มความหล่อลื่น เพิ่มความแข็งแรง

### 2.3.6 กลไกแรงยึดติดระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยภายในวัสดุคอมโพสิต [38]

สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตไม่ได้ขึ้นกับความแข็งแรงของส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์เพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นกับการยึดติดกันที่ติระหว่างส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์ด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตซึ่งสามารถแบ่งกลไกการยึดติดภายในของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

#### 2.3.6.1 การยึดติดเชิงกล (Mechanical Bonding)

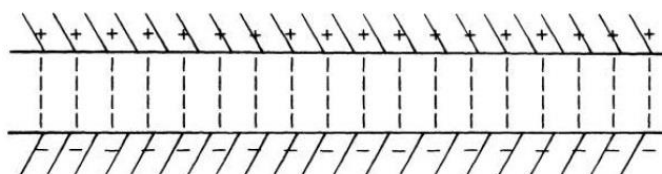
เป็นการยึดติดที่เกิดจากพื้นผิวที่มีความขรุขระของส่วนเสริมแรง ซึ่งเมทริกซ์ที่กระจายล้อมรอบส่วนเสริมแรงนั้นจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวเชิงกล (Interlocking) กับส่วนเสริมแรงขึ้นโดยความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวแบบนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวส่วนเสริมแรง ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแบบเชิงกล [38]

#### 2.3.6.2 การยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า (Electrostatic Bonding)

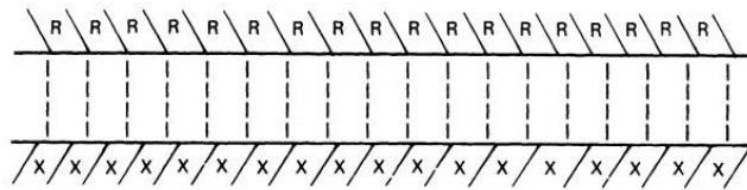
เป็นการยึดติดที่เกิดขึ้นชั่วคราวเนื่องจากเมทริกซ์ และส่วนเสริมแรงมีประจุที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่แตกต่างกัน และความแข็งแรงของการยึดติดแบบนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณประจุของแต่ละพื้นผิว และระยะห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองต้องน้อยมาก หากพื้นผิวมีการปนเปื้อนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยประจุไฟฟ้า [38]

#### 2.3.6.3 การยึดติดทางเคมี (Chemical Bonding)

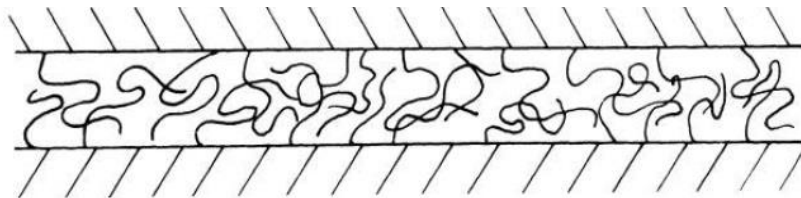
เป็นการยึดติดที่เกิดขึ้นจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์เกิดพันธะเคมีระหว่างกันขึ้นโดยระดับความแข็งแรงของการยึดติดขึ้นกับชนิดของพันธะ และจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้น โดยอาจใช้สารช่วยยึดติด (Coupling agent) ที่จะเกิดพันธะกับส่วนเสริมแรง และเมทริกซ์ทำให้เกิดการยึดติดทางเคมีระหว่างกันขึ้น ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 กลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยพันธะเคมี [38]

#### 2.3.6.4 การยึดติดแบบแพร่ผ่าน (Interdiffusion Bonding)

เป็นการยึดติดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแพร่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ระหว่างสองพื้นผิวเกิดขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จากส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์เกิดการเกี่ยวพันกันขึ้น และความแข็งแรงของการยึดติดแบบนี้ขึ้นกับความยืดหยุ่น (Flexibility) ความสามารถในการเคลื่อนที่แพร่ผ่านและระดับการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.38



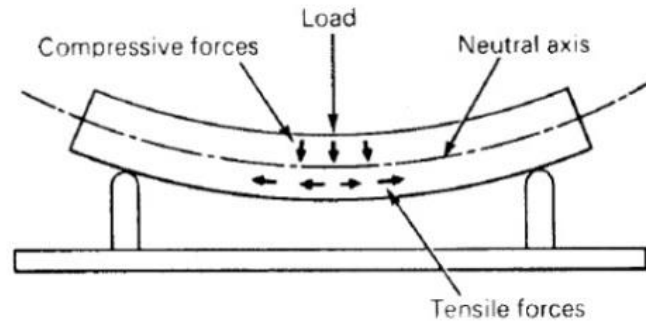
รูปที่ 2.38 กลไกการยึดติดแบบแพร่ผ่าน [38]

#### 2.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

เป็นการทดสอบขั้นพื้นฐานเพื่อตรวจวัดสมบัติของวัสดุในการรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้พิจารณาความแข็งแรงของวัสดุ โดยวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลกับวัสดุคอมโพสิต [38] ได้แก่ การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural testing) การทดสอบแรงดึง (Tensile test method) การทดสอบความแข็ง (Hardness test) การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) การทดสอบความล้า (Fatigue test)

##### 2.3.7.1 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural testing) [38]

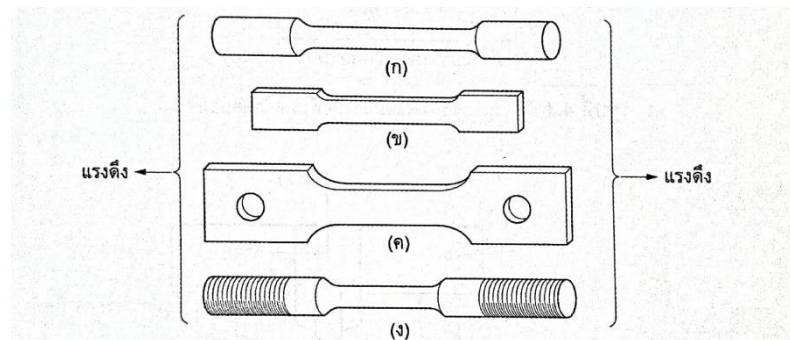
เป็นการทดสอบความต้านทานต่อแรงดัดโค้งสามารถใช้ในการประมาณหาค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุได้จากการเกิดแรงดึงยึดที่บริเวณพื้นผิวด้านล่างของชิ้นตัวอย่างโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดัดโค้งแบบ 3 จุด (3 point bending) มีลักษณะฐานรองรับสองจุดซึ่งอยู่ห่างกันแล้วให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.39 และการดัดโค้งแบบ 4 จุด (4 point bending) ที่มีลักษณะฐานรองรับสองจุดซึ่งอยู่ห่างกันแต่ให้แรงกดสองจุดที่มีระยะห่างระหว่างชุดกดแบบ 1/3 หรือ 1/4 ลงบนชิ้นตัวอย่าง โดยการทดสอบนี้สามารถบ่งบอกคุณสมบัติต่างๆของวัสดุได้ เช่น ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) และค่าโมดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus)



รูปที่ 2.39 แรงกดอัดบริเวณพื้นผิวด้านบนและแรงดึงยืดบริเวณพื้นผิวด้านล่างกับขึ้นตัวอย่างเมื่อให้แรงขณะทดสอบ [38]

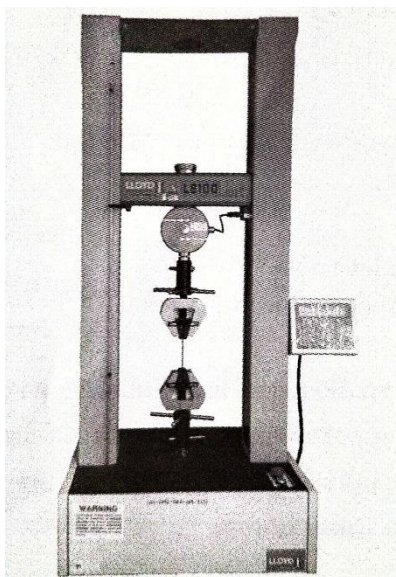
### 2.3.7.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test method) [39]

การทดสอบแรงดึงเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุโดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Static load) จนกระทั่งวัสดุขนาดจากกัน ขึ้นทดสอบมีหลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.40 ขึ้นกับเครื่องทดสอบ หัวจับขึ้นทดสอบ และขนาดของแรงที่ใช้ดึง โดยขึ้นทดสอบจะมีการกำหนดขนาดต่างๆ ไว้เป็นมาตรฐานไม่ว่าจะเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาวขึ้นทดสอบ และรัศมีความโค้งของบริเวณบ่าล็อคเพื่อจับดึง เครื่องทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.40 ขึ้นทดสอบแรงดึง (ก) พื้นี่หน้าตัดกลมล๊อคที่บ่า (ข), (ค) พื้นี่หน้าตัดสี่เหลี่ยมล๊อคที่บ่า และรู (ง) พื้นี่หน้าตัดกลมโดยใช้เกลียว [39]





รูปที่ 2.41 เครื่องทดสอบแรงดึง [39]

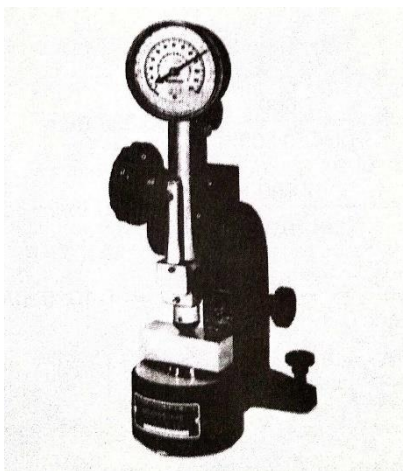
### 2.3.7.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test) [39]

การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอย บวม การขีดหรือขีด ให้เป็นรอย การหาค่าความแข็งวัสดุ อาศัยหลักการ 3 อย่าง คือ (1) การหาความต้านทานต่อพลังงานการยืดหยุ่น (Elastic Hardness) โดยให้วัสดุชนิดหนึ่งตกลงมากระทบอีกชนิดหนึ่ง แล้วสังเกตขณะกระดอนขึ้น วัสดุใดมีความแข็งมากจะกระดอนได้สูง ส่วนวัสดุที่มีความแข็งต่ำจะกระดอนได้ต่ำ (2) หาความต้านทานต่อการตัดหรือขีดข่วน (Resistance to cutting or abrasion) เป็นการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาขีดหรือถูกัน วัสดุใดมีความแข็งสูงจะสามารถขีดหรือถูวัสดุที่มีความแข็งต่ำให้เป็นรอยได้ (3) หาความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยบวม (Types of hardness test) เป็นการนำเอาวัสดุชนิดหนึ่งมากดลงบนผิววัสดุอีกชนิดหนึ่งวัสดุที่สามารถทำให้เกิดรอยบวมได้แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งต่ำ แต่ถ้ารอยกดเล็กหรือตื้น แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งสูง

#### 2.3.7.3.1 วิธีทดสอบความแข็งแบบต่างๆ

2.3.7.3.1.1 การวัดความแข็งแบบชอร์สเกลโรสโคป (Shore scaleroscope hardness test)

ทดสอบโดยใช้ค้อนหัวเพชร ปล่อยจากที่สูงห่างจากชิ้นงานทดสอบ 10 in ตกกระทบผิวชิ้นงาน สังเกตดูการกระดอนกลับของค้อนหัวเพชรว่าสูงหรือต่ำจากหน้าปัทม์เข็มของเครื่อง วัสดุที่แข็งจะทำให้การกระดอนกลับของค้อนหัวเพชรสูงกว่าวัสดุอ่อน เครื่องทดสอบแบบชอร์สเกลโรสโคป ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 เครื่องทดสอบแบบชอร์สเกลโรสโคป [39]

#### 2.3.7.3.1.2 การวัดความแข็งแบบสเกลของโมส์ (Moh's)

ผู้คิดค้นอาศัยการแบ่งความแข็งออกเป็น 10 ชั้นตามชนิดของสินแร่ ซึ่งทดสอบโดยเอานำเอาสินแร่ทั้ง 10 ไปขีดวัสดุที่ต้องการทราบความแข็ง สังเกตดูว่าสินแร่ตามมาตรฐานความแข็งชั้นใดขีดวัสดุเป็นรอย แสดงว่าวัสดุความแข็งอยู่ในชั้นนั้น การทดสอบมีช่วงของความแข็งกว้างมากและเป็นค่าหยาบ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในทางวิศวกรรม และเครื่องทดสอบแบบสเกลของโมส์ (Moh's)

#### 2.3.7.3.1.3 การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test, BHN)

เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักมาตรฐานกดผ่านหัวกดเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ดังรูปที่ 2.43 ให้หัวกดลงบนชิ้นงานเป็นเวลา 10 - 30 s จากนั้นปลดน้ำหนักมาตรฐานออก หัวกดจะทำให้เกิดรอยกดที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดขนาดความโตของรอยกดด้วยกล้องขยาย แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความแข็ง BHN (Brinell hardness number) ได้จากสมการที่ 2.1

$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

เมื่อ

P คือ น้ำหนักที่ใช้หัวกด

D คือ ความโตของหัวกด

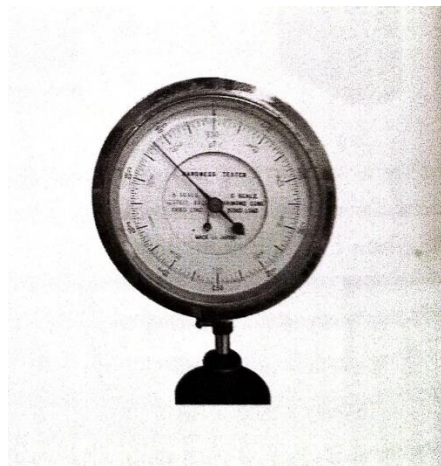
d คือ ความโตของรอยกด



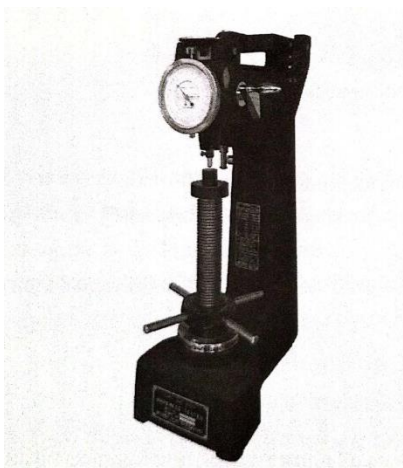
รูปที่ 2.43 เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ [39]

2.3.7.3.1.4 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test, HR)

นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เพราะทดสอบได้ง่าย รวดเร็ว และสามารถทราบค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องโดยการอ่านที่หน้าปัด ดังรูปที่ 2.44 และ เครื่องทดสอบแบบร็อคเวลล์ ดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.44 หน้าปัดอ่านค่าความแข็ง [39]



รูปที่ 2.45 เครื่องทดสอบแบบร็อกเวลล์ [39]

2.3.7.3.1.5 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker hardness test, HV)

สามารถทำได้โดยใช้แรงกดระหว่าง 1 - 200 kg กดผ่านหัวกดไปบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 10 - 30 s จากนั้นปลดแรงกดออก แล้วนำชิ้นงานไปวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความแข็งได้จากที่สมการที่ 2.2

$$HV = \frac{1.854P}{D^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ

P คือ แรงหรือน้ำหนักกด

D คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด

2.3.7.3.1.6 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro vicker hardness, H<sub>MV</sub>)

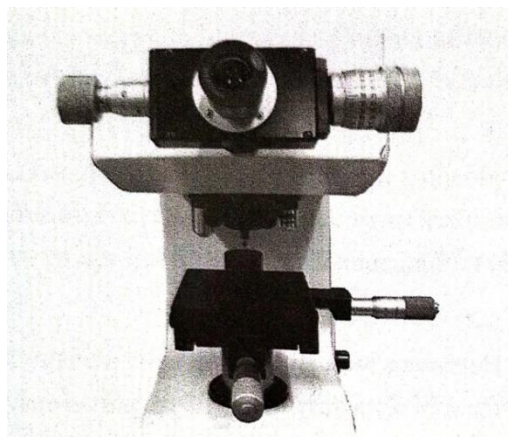
เหมาะสำหรับทดสอบความแข็งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบาง ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง ชิ้นงานชุบเคลือบผิว ลักษณะเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ดังรูปที่ 2.46 และการทดสอบคล้ายคลึงกับแบบวิกเกอร์ สามารถทำได้โดยใช้แรงกดระหว่าง 15 - 3600 g กดผ่านหัวกดไปบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 5 - 45 s สามารถคำนวณหาความแข็งได้จากสมการที่ 2.3

$$H_{MV} = \frac{2P(\sin 136^\circ/2)}{d^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ

P คือ แรงหรือน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด



รูปที่ 2.46 เครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ [39]

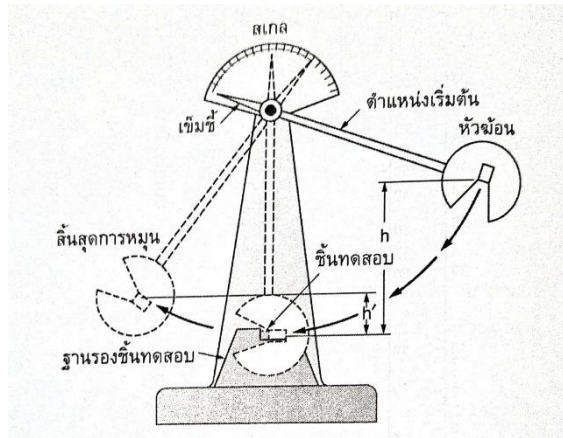
#### 2.3.7.4 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) [39]

เป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงที่มากับวัสดุด้วยความรวดเร็ว เครื่องทดสอบแรงกระแทก ดังรูปที่ 2.47 ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุ หมายถึงการที่วัสดุสามารถดูดกลืนหรือเก็บสะสมพลังงานกระแทกไว้ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าวัสดุสามารถเก็บสะสมพลังงานต่อหน่วยปริมาตรตั้งแต่เริ่มต้นได้รับแรงกระแทกจนกระทั่งแตกหักไว้ได้สูง ก็หมายความว่าวัสดุนั้นมีความทนทานต่อการแตกหักสูงนั่นเอง

หลักการทดสอบจะใช้ค้อนเหวี่ยงกระทบชิ้นทดสอบซึ่งทำเป็นขนาดมาตรฐานไว้ ลักษณะการเหวี่ยงจะใช้ลูกตุ้มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.47 เครื่องทดสอบแรงกระแทก [39]

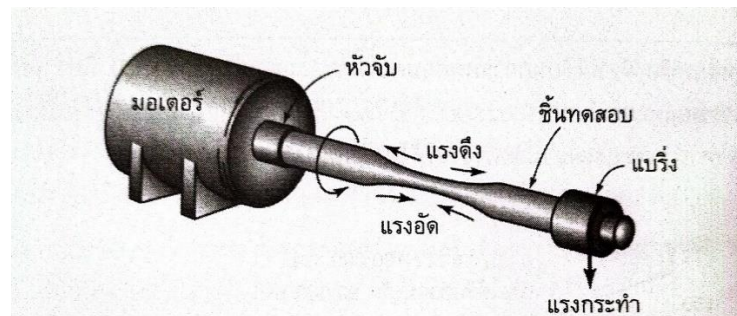


รูปที่ 2.48 ส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงกระแทก [39]

### 2.3.7.5 การทดสอบความล้า (Fatigue test) [39]

เป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำกับวัสดุในลักษณะซ้ำๆ มากครั้งจนวัสดุเกิดความล้า และแตกหักในที่สุด การทดสอบนี้จำเป็นต้องทำสำหรับวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องหมุนเกิดการดัดหรือการสั่น เช่น เฟลาส่งกำลัง

ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดด้วยหัวจับติดกับมอเตอร์หมุน ดังรูปที่ 2.49 และปลายอีกด้านหนึ่งจะประกบกับแบริ่ง และอุปกรณ์รับรอบการหมุน จากนั้นให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบที่คงที่ โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะโค้งขึ้นทำให้ผิวด้านบนรับแรงดึงผิวด้านล่างรับแรงกดจากนั้นหมุนมอเตอร์จนกว่าชิ้นทดสอบจะแตกหัก และบันทึกจำนวนรอบที่วัสดุแตกหักกับความเค้นที่ให้ นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับจำนวนรอบ (Number of cycles)



รูปที่ 2.49 เครื่องทดสอบความล้า [39]

## 2.4 การประสาน (Adhesives)

กาวติดประสานเป็นสารที่ใช้สำหรับยึดเหนี่ยวผิวหน้าของวัสดุสองชิ้นให้ยึดติดกันได้โดยมีความแข็งแรงของวัสดุที่เชื่อมติดกันเพียงพอต่อการนำไปใช้งานต่างๆ ตามต้องการ

### 2.4.1 ส่วนประกอบของกาวประสาน [40]

1. พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารที่ทำให้เกิดการยึดติดวัสดุเข้าด้วยกันซึ่งสารที่ใช้เป็นเนื้อกาวอาจแบ่งได้ตามลักษณะดังนี้ (1) กาวธรรมชาติ เช่น ยางมะตอย ยางพารา (2) กาวสังเคราะห์ ได้แก่ สารพวก Thermoplastic resin เช่น Cellulose ester and ester, Alkyd and acrylic esters, Polyamide และ (3) กาวยางสังเคราะห์ เช่น Neoprene, Nitrile

2. ตัวกระตุ้น (Activator) เป็นสารเคมีที่เติมลงบนผิววัสดุได้โดยตรงหรือสามารถผสมกับกาวเพื่อเพิ่มการแห้งของกาวให้เร็วขึ้น

3. สารเร่งปฏิกิริยา (Catalysts/Accelerators) เป็นสารเคมีที่ใช้ในปริมาณน้อยเป็นตัวเร่งเพื่อให้กาวเกิดการแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

4. สารทำให้คงรูป (Curing agent) เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อให้กาวเกิดการแข็งตัวและมีโครงสร้างแบบเชื่อมโยงสามมิติ

5. สารอื่นๆ เช่น สารป้องกันการแข็งตัวป้องกันการเชื่อม สารป้องกันการติดไฟ และสี

6. สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเคมีที่เติมเพื่อป้องกันการเปราะของกาว กาวหลายชนิดมีความแข็งแรงสูงแต่หากอยู่ในสภาวะที่ได้รับแรงกดสูงกาวมีโอกาสเกิดการแตกได้พลาสติกไซเซอร์ช่วยทำให้กาวนิ่มมากขึ้นเพื่อลดความเปราะของกาว

7. ตัวทำละลาย (Solvents) เป็นของเหลวที่เติมลงไปเพื่อให้กาวกระจายหรือแขวนลอยอยู่ในรูปของเหลวเพื่อที่จะให้กาวเปียกบนผิววัสดุได้ง่ายขึ้นซึ่งตัวทำละลายจะระเหยออกจากกาวภายหลังการทำ หรือในขณะที่กาวกำลังเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างแบบสามมิติ

8. แทคคิไฟเออร์ (Tackifier) ใช้เติมในกาวบางประเภทเท่านั้น สามารถเพิ่มความเหนียวหรือเพิ่มความสามารถในการเกาะติดแทคคิไฟเออร์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- Rosin resins เป็นสารที่ใช้เป็นแทคคิไฟเออร์สำหรับอุตสาหกรรมกาวมีอยู่ 3 ชนิดที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันคือ gum rosin, wood rosin และ tall oil rosin สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์

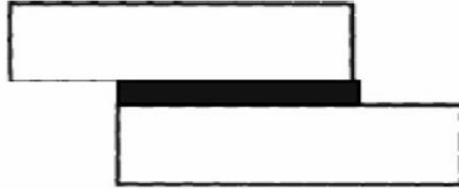
- Hydrocarbon resins สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมกาวแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ C5 aliphatic resins, C9 aromatic resins และ C5/C9 aliphatic/aromatic resins

- Terpene resin แหล่งกำเนิดมาจากไม้ และพืชจำพวกมะนาว

### 2.4.2 รูปแบบการติดกาบประสาน (Type of joint) [40]

ความกว้างและความลึกของชิ้นงานที่จะใช้ติดกาบสามารถแบ่งรูปแบบของการติดประสานกาบกับวัสดุได้เป็น 3 แบบดังนี้

1. Lab/Overlap Joint ลักษณะรอยต่อที่วางวัสดุสองชิ้นมาทับกัน ดังรูปที่ 2.50



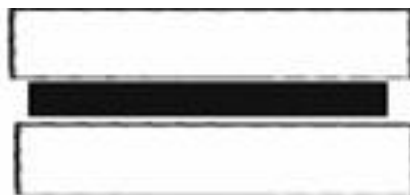
รูปที่ 2.50 Lab/Overlap Joint [40]

2. Joggle Lab Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่คล้ายกับ Overlab Joint แตกต่างกันตรงที่ Joggle Lab Joint เป็นรอยต่อบริเวณข้อต่อ ดังรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 Joggle Lab Joint [40]

3. Butt Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่ปลายของทั้งสองวัสดุ ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 Butt Joint [40]



4. Scarf Joint เป็นรอยต่อแบบ Butt Joint ที่มีมุมเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 Scarf Joint [40]

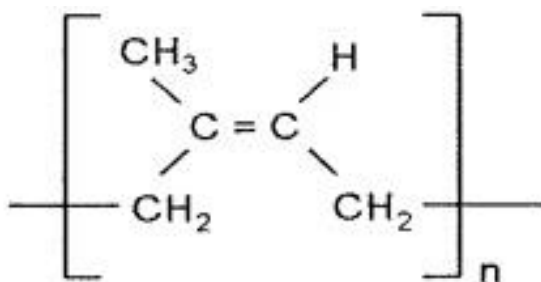
2.4.3 กาวธรรมชาติ (Natural adhesives) และกาวสังเคราะห์ (Synthetic adhesives)

2.4.3.1 กาวธรรมชาติ (Natural adhesives)

กาวธรรมชาติส่วนใหญ่ได้จากพืช เช่น ยางเหนียวของต้นไม้ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง หรือจากสัตว์เช่นกาวที่ผลิตขึ้นจากหนัง และกระดูกสัตว์ ซึ่งโดยปกติกาวที่ได้จากธรรมชาติจะมีความแข็งแรง [40]

สมบัติทางเคมีของยางธรรมชาติ [41]

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังรูป 2.54



รูปที่ 2.54 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Cis-1,4-polyisoprene)

ยางธรรมชาติมีโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอน ไม่มีขั้ว มีสภาพไม่นำไฟฟ้าเป็นฉนวน ซึ่งไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันพืช โดยในสูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ และพันธะคู่ในโมเลกุลทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยการกำมะถัน นอกจากนี้ยังมีหมู่เมทิลส่งอิเล็คตรอนเข้าสู่พันธะคู่ ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าปกติและพันธะคู่ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ไม่ทนต่อการออกซิเดชันและโอโซน ทั้งมีสายโซ่ที่ต่อกับพันธะคู่จะอ่อนตัวมากกว่าปกติทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่ายใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และมีค่าอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว (Tg) เท่ากับ  $-72^{\circ}\text{C}$

#### 2.4.3.1.1 กาวยางบง

สมบัติเชิงกล

ยางบงเป็นพันธุ์ไม้ที่ขึ้นได้ง่าย แตกหน่อได้ดี เนื้อไม้เหมาะสำหรับใช้ในการทำเครื่องมือเครื่องใช้ ส่วนเปลือกจะนำไปทำรูป และผสมสารกำมะถันทำยากันยุงได้ ยางใช้อุดรอยร้าวต่างๆได้ดี [42] และลำต้นยางบงมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ดังรูป 2.55 (ก) โดยเนื้อกาวยางบงมีลักษณะเป็นผงๆ สีน้ำตาลอ่อน ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุประสานต้องนำมาผสมกับน้ำก่อน ดังรูปที่ 2.55 (ข)



(ก) ลักษณะลำต้นยางบง

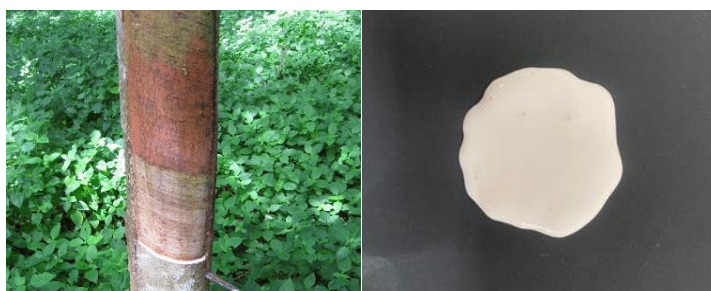
(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.55 กาวยางบง (ก). ลักษณะลำต้นยางบง (ข) ลักษณะเนื้อกาว [43]

#### 2.4.3.1.2 กาวยางพารา

สมบัติเชิงกล

มีความยืดหยุ่นตัวสูงเมื่อตั้งให้ยัดแล้วสามารถหดกลับเข้ารูปเดิมได้ทันทีเมื่อปล่อย เนื้อมีความเข้มข้นแน่นทึบกันน้ำได้ [44] ดังรูป 2.56



(ก) ลักษณะลำต้นยางพารา

(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.56 กาวยางพารา (ก) ลักษณะลำต้นยางพารา (ข) ลักษณะเนื้อกาว [45]

#### 2.4.3.2 กาวสังเคราะห์ (Synthetic adhesives)

กาวชนิดนี้ผลิตจากพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตหรือเทอร์โมพลาสติกซึ่งกาวประเภทเทอร์โมเซตจะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวหรือละลายได้อีกหลังจากได้รับการอบด้วยความร้อนแล้วแต่กาวประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถทำให้อ่อนตัวได้โดยการให้ความร้อนอีกครั้งหรือด้วยตัวทำละลาย [40]

## 2.4.3.2.1 กาวลาเท็กซ์

## สมบัติเชิงกล

กาวลาเท็กซ์มีลักษณะเนื้อเหนียวข้น คือ ส่วนผสมของของเหลวหรือวัสดุแข็งของเหลวที่สามารถเชื่อมติดหรือประสานวัสดุสองชิ้นหรือหลายๆ ผนังเข้าด้วยกัน ใช้ติดวัสดุที่มีลักษณะบางหรือวัสดุที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่ผลิตมาจาก สารไฮโครคาร์บอน ที่เรียกว่า (Polyvinyl acetate, PVAc) ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ปกติจะมีปริมาณพอลิไวโนลอะซีเตท อยู่ในน้ำ 50% โดยน้ำหนัก ในลักษณะอนุภาคแขวนลอยและกระจายอยู่ในน้ำในลักษณะอิมัลชัน ทำให้เห็นเป็นสีขาวขุ่น กาวลาเท็กซ์เป็นประโยชน์ มากในอุตสาหกรรมหีบห่อ เช่น ทำกล่องกระดาษ ผนังสิ่งต่างๆ เข้าด้วยกัน สลากปิดซอง หรือภาชนะกระดาษ ทั้งนี้ เพราะกระดาษมีความพรุนตัวสูง และมีโครงสร้างไม่แข็งแรงนัก จึงสามารถติดกาวได้ง่าย [46] ดังรูป 2.57



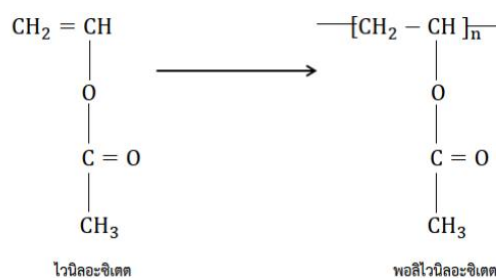
(ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์

(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.57 กาวลาเท็กซ์ (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาวลาเท็กซ์ [47]

## สมบัติทางเคมี [48]

พอลิไวโนลอะซีเตต PVAc เตรียมได้จากเทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk polymerization), แบบสารละลาย (Solution polymerization), แบบแขวนลอย (Suspension polymerization), แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) โดยผ่านกลไกแบบลูกโซ่ผ่านตัวกลางอนุมูลอิสระ โดยปกติแล้วในทางอุตสาหกรรมจะนิยมใช้เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์แบบอิมัลชันในการสังเคราะห์ PVAc โดยเทคนิคนี้จะทำให้ได้พอลิเมอร์ในรูปแบบของลาเท็กซ์ซึ่งจะสามารถนำไปใช้สำหรับเป็นสารยึดติด สมบัติที่สำคัญของ PVAc คือ สามารถละลายในตัวทำละลายต่างๆ หลายชนิด เช่น เบนซีน โทลูอีน เมทานอล เมทิลคลอไรด์อะซีโตนและเอทิลอะซีเตต ดังรูป 2.58



รูปที่ 2.58 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PVAc [48]

### 2.4.3.2.2 กาวน้ำใส

สมบัติเชิงกล

กาวน้ำใส เป็นกาวที่มักจะมีลักษณะเป็นสีขาวใสคล้ายกับน้ำแรงยึดเกาะน้อย เหมาะสำหรับนำไปใช้กับวัสดุทั่วไป เช่น กระดาษและผ้า นอกจากนี้กาวน้ำยังสามารถนำไปทำเป็นสไลม์ [48] เป็นกาวที่ไม่มีสารเคมีอันตราย ปลอดภัยต่อสุขภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [51] ดังรูปที่ 2.59



(ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์



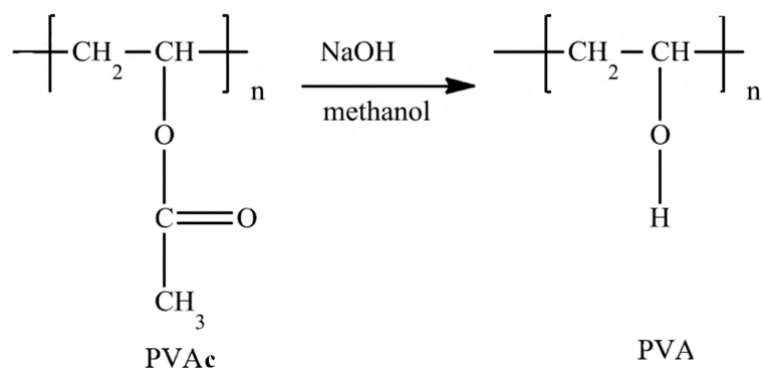
(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.59 กาวน้ำใส (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว [51]

ข้อดีของการใช้กาวน้ำคือเมื่อกาวน้ำแห้งสนิทจะไม่เป็นคราบเนื้อกาวน้ำมีลักษณะเป็นสีใส ดังนั้น เมื่อนำไปใช้ เมื่อกาวแห้งจะไม่ทิ้งคราบไว้ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานฝีมือเป็นอย่างมาก โดยที่กาวน้ำสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานไม่มีกลิ่น

สมบัติทางเคมี [48]

พอลิไวน์แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) เตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทำได้โดยการนำ PVAc ซึ่งละลายอยู่ในเมทานอลมาทำปฏิกิริยากับกรดแก่หรือเบสแก่ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินิยมใช้เบสแก่จำพวก NaOH สาเหตุที่ไม่ใช้กรดแก่เนื่องจากเป็นการยากที่จะแยกเอากรดที่หลงเหลืออยู่ในพอลิเมอร์ออกไปจึงส่งผลทำให้ถ้าใช้กรดแก่มาทำปฏิกิริยาจะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีการเสื่อมสภาพเนื่องจากกรด สำหรับการใส่เบสแก่ก็อาจจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของโซเดียมอะซิเตตในพอลิเมอร์ได้ซึ่งเป็นการยากที่จะแยกออกจากพอลิเมอร์แนวทางแก้ไข คือ เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นเบสลงไป สมบัติที่สำคัญของ PVA คือ ละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง เช่น น้ำ สารDimethyl Sulfoxide, DMSO และ สารDimethylformamind, DMF PVA ใช้เป็นสารยึดติดในงานไม้ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PVA ดังรูปที่ 2.60



รูปที่ 2.60 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PVA [48]

#### 2.4.3.2.3 กาวอีพ็อกซี

สมบัติเชิงกล

เป็นกาวประสานที่ต้องผสมกันระหว่างเนื้อกาว และสารที่ทำให้กาวแข็ง มีคุณสมบัติยึดติดแน่น แข็งเร็ว ทนต่อแรงกระแทก การขีดขูด เสียดสี ทนกรด และเบสทนความร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อรังสียูวี (UV) จึงมักถูกประยุกต์ใช้ภายในอาคาร [52]

ประโยชน์และการนำไปใช้ คือ สามารถใช้เป็นกาวประสานยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายประเภท เช่น ไม้ เหล็ก ไฟเบอร์ พลาสติก [53] ดังรูปที่ 2.61



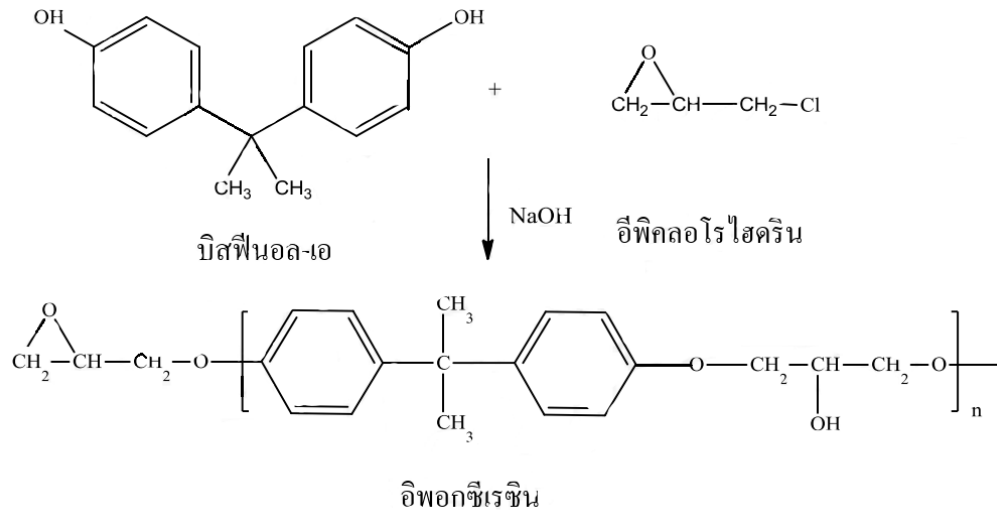
(ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์

(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.61 กาวอีพ็อกซี (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว

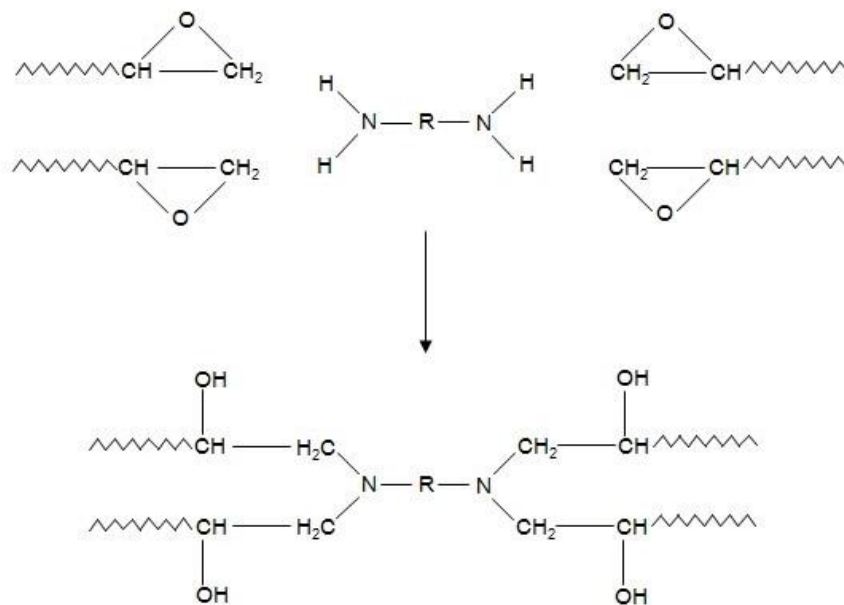
สมบัติทางเคมี [48]

อีพ็อกซี หรือพอลิอีพ็อกไซด์ (Polyepoxide) เป็นพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ที่สังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) และบิสฟีนอล-เอ (Bisphenol-A) ซึ่งตั้งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.62



รูปที่ 2.62 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน [48]

โครงสร้างของอีพอกซีเรซินจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยส่วนที่แรกจะเป็นส่วนที่มีหมู่อีพอกซี อยู่ที่ปลายขณะที่ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่เรียกว่า ไดอะมีน (Diamine) ปกติแล้วค่า  $n$  ของอีพอกซีจะมีค่าสูงสุดที่ 25 ในกรณีหมู่ที่ปลายทั้ง 2 ข้างเป็นหมู่อีพอกซีจะเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า ไดอีพอกซี (Diepoxy) ซึ่งจะมีสมบัติเป็นสารยึดติดที่ดีมาก อย่างไรก็ตามถ้าค่า  $n$  ของไดอีพอกซีมีค่าเท่ากับ 25 จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแข็ง หนา อุดหนุมิห้อง และเมื่อเพิ่มอุนหนุมิสูงขึ้นทำให้ ไดอีพอกซีเกิดการหลอมตัว ส่วนที่ 2 คือ ไดอะมีน เป็นส่วนที่เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ ไดอีพอกซีจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงสายโซ่ของไดอีพอกซีเข้าด้วยกันซึ่งส่งผลให้ได้พอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซตติง และโครงสร้างของไดอะมีน และปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.63 [48]



รูปที่ 2.63 โครงสร้างของไดอะมีน และปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยง [48]

#### 2.4.3.2.4 กาวซิลิโคน

สมบัติเชิงกล [54]

เป็นกาวประสานที่มีผิวมันวาวแห้งเร็ว โดยหลังจากการแห้งตัวแล้วจะมีลักษณะแข็ง มีความยืดหยุ่นสูง คงทนต่อสภาพอากาศและรังสียูวี (UV) ได้สูง

ประโยชน์ และการนำไปใช้ คือ สามารถใช้เป็นกาวประสานยึดติดกับวัสดุ เช่น รอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมกับกระจกและยังถูกใช้ทั้งในงานอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กาวซิลิโคนแบบมีกรด (Acetic Cure Silicone) และกาวซิลิโคนแบบไม่มีกรด (Neutral Cure Silicone)

- ซิลิโคนแบบมีกรด (Acetic Cure Silicone)

มีลักษณะ คือ ในขณะที่ใช้งานจะมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวเหมือนน้ำส้มสายชู เนื่องจากสารระเหยที่เป็นส่วนผสม ซึ่งมีผลทำให้กาวชนิดนี้แห้งเร็ว และมีความแข็งแรงสูง แต่อาจมีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุที่นำไปติดได้ เนื่องจากกาวมีความเป็นกรด จึงนิยมในการนำไปใช้ติดกระจกที่มีความทนทานต่อสารเคมีสูง

- ซิลิโคนแบบไม่มีกรด (Neutral Cure Silicone)

มีลักษณะ คือ แห้งตัวช้ากว่า มีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่มีความยืดหยุ่นสูงกว่ากาวซิลิโคนที่เป็นกรด มีกลิ่นเหม็นน้อยกว่า และไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทย่อย ได้แก่ กาวซิลิโคนชนิดออกไซด์ (Oxime-Based Silicone) และกาวซิลิโคนชนิดอัลโคซี่ (Alcoxy-Based Silicone)

สมบัติทางเคมี [48]

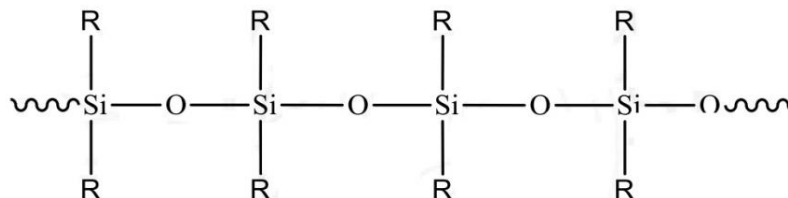
ซิลิโคนจัดเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่อยู่ในสายโซ่มีอะตอมอื่นเป็นองค์ประกอบนอกจาก คาร์บอนอะตอม ซึ่งพอลิเมอร์จำพวกนี้ เช่น ซิลิโคน (Silicone) ซิลิโคนเรซิน (silicone resin)

- ซิลิโคน

ซิลิโคนหรือพอลิซิล็อกเซน (Polysiloxanes) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสูตรทั่วไปเป็น  $[R_2SiO]_n$  เมื่อ R คือ หมู่แทนที่เช่น เมทิล เอทิล และฟีนิล เป็นต้น ดังนั้นซิลิโคนจึงเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยพันธะระหว่าง -Si-O-Si- อยู่ในสายโซ่หลัก และมีหมู่แทนที่ที่เป็นสารอินทรีย์ที่จับกับซิลิกอนอะตอม นอกจากนี้แล้วในบางกรณีหมู่แทนที่อินทรีย์ยังสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงกับสายโซ่ของซิลิโคนของแต่ละสายเข้าด้วยกัน ซิลิโคนจะสามารถสังเคราะห์ให้มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราส่วนของหมู่อินทรีย์ที่พบในโครงสร้างส่งผลให้ได้ซิลิโคน มีสถานะตั้งแต่เป็นของเหลว เจล ยาง และพลาสติกแข็ง สำหรับโครงสร้างที่ง่ายที่สุดของซิลิโคน ได้แก่ พอลิไดเมทิลซิล็อกเซน (polydimethyl siloxane) หรือ PDMS และโครงสร้างที่ใหญ่และมีความซับซ้อนได้แก่ ซิลิโคนเรซิน ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นกิ่งแขนง

โดยทั่วไปซิลิโคนจะเป็นวัสดุที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ทนทานต่อความชื้น ทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูง แรงดึงผิวต่ำ มีจุดเยือกแข็งต่ำ และไม่นำไฟฟ้า จากสมบัติที่กล่าวมาทำให้ซิลิโคนสามารถนำไปผลิตเป็นสารยึดติด สารหล่อลื่น และหลอดไฟขนาดเล็ก นอกจากนี้แล้วซิลิโคนยังถูกนำไปใช้ในงานด้านการแพทย์ทั้งนี้เนื่องจากมีความ

เป็นพืชน้อย ซิลิโคนสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้เหมือนยางธรรมชาติ โดยใช้ตัวริเริ่มเป็นสารจำพวกเพอร์ออกไซด์ โครงสร้างทั่วไปของซิลิโคน ดังรูปที่ 2.64

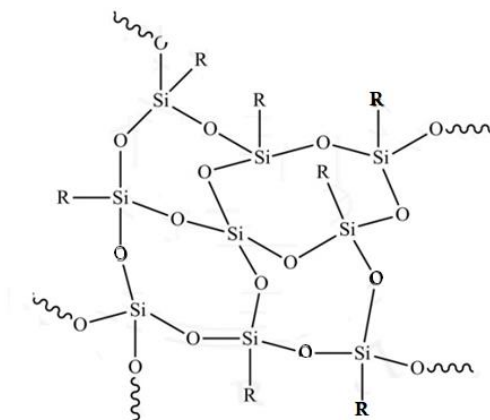


รูปที่ 2.64 โครงสร้างทั่วไปของซิลิโคน พอลิไซล๊อกเซน (Polysiloxanes) [48]

- ซิลิโคนเรซิน

ในทางอุตสาหกรรม ได้มีการนำซิลิโคนเรซินไปใช้ประโยชน์ในการผลิต สารยึดติด และสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ เป็นต้น

ซิลิโคนเรซินจัดอยู่ในกลุ่มซิลิโคนที่มีกิ่งแขนงอยู่ในโครงสร้างสายโซ่มีสูตรทั่วไป คือ  $R_nSiX_mO_y$  เมื่อ R คือ หมู่แทนที่ที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งปกติจะเป็นหมู่ Me Ph และ X (H OH Cl หรือ OR) โครงสร้างของซิลิโคนเรซินจะเป็นโครงสร้างตาข่ายของพอลิไซล๊อกเซน ดังรูปที่ 2.65



รูปที่ 2.65 โครงสร้างของซิลิโคนเรซิน พอลิไซล๊อกเซน (Polysiloxanes) [48]

#### 2.4.3.2.5 กาวอะคริลิก

สมบัติเชิงกล

อะคริลิก คือ กาวยาแนวระหว่างแผ่นกระเบื้อง มีส่วนประกอบหลักเป็นพอลิเมอร์อะคริลิก หรืออะคริลิครีซิ่นสูตรน้ำ โดยอาจถูกเรียกกันอย่างแพร่หลายกันในหลายๆ



ชื่อ เช่น แด็บ (DAP) เมื่อแห้ง และแข็งตัวจะมีความแข็งแรง แต่มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ากาวซิลิโคน มักถูกนำไปใช้ในงานภายในอาคารและในงานตกแต่งต่างๆ

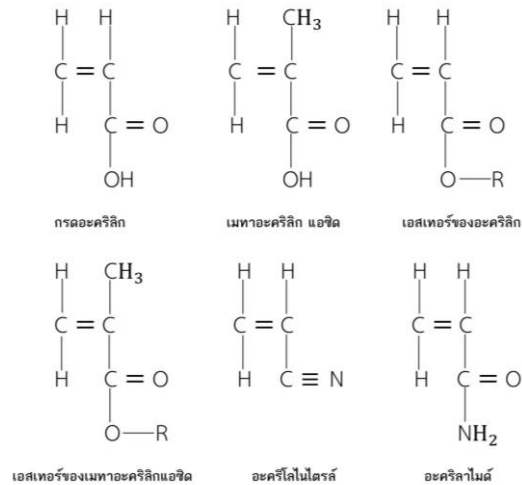
อะคริลิกมีทั้งข้อดี และข้อเสียในการใช้งาน ข้อดีที่เด่นที่สุดของอะคริลิก คือ อะคริลิกนั้นสามารถทาสีทับได้ เนื่องจากอะคริลิกมีลักษณะพื้นผิวที่ด้าน และยังมีราคาที่ถูกกว่าซิลิโคน แต่ด้วยความที่อะคริลิกมีส่วนประกอบที่เป็นสูตรน้ำ ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านอะคริลิกได้ (Water Permeable) จึงไม่สามารถนำไปใช้ในที่ที่เปียกหรือแฉะได้ มิฉะนั้นกาวอะคริลิกจะสามารถขึ้นราได้ นอกจากนี้กาวอะคริลิกมีโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่หยابกว่าซิลิโคน จึงทำให้อะคริลิกดักฝุ่นและสกปรกได้ง่ายกว่าซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบมัน และหลังจากแห้งตัว กาวอะคริลิกจะมีการหดตัว และอาจจะมีการแตกได้ถ้าหากรอยต่อมีการขยับตัวมาก เนื่องจากกาวอะคริลิกมีความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า ฉะนั้นกาวอะคริลิกจึงเหมาะสมกับแก่การใช้งานภายใน ที่ไม่มีการโดนน้ำฝน ไม่มีความชื้น เหมาะกับการตกแต่งทั้งภายใน และภายนอกที่มีการสีทับ สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีรูพรุนสูง เพราะกาวอะคริลิกจะไม่ทำให้เกิดคราบบนวัสดุที่มีรูพรุนอย่างเช่นกาวซิลิโคน เช่น บนคอนกรีต แผ่น Precast หินธรรมชาติ อิฐ และไม้ [55] ดังรูปที่ 2.66



รูปที่ 2.66 ลักษณะผลิตภัณฑ์กาวอะคริลิก [56]

สมบัติทางเคมี

อะคริลิกพอลิเมอร์ (acrylic polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากกรดอะคริลิก (acrylic acid) และอนุพันธ์ของอะคริลิก อะคริลิกพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์มาจากมอนอเมอร์ต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.67



รูปที่ 2.67 โครงสร้างมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิเมอร์ [48]

เมื่อ R คือหมู่แอลคิลจากสารตัวอย่างสารตั้งต้น จะเห็นได้ว่า อะคริลาไมด์กับอะครีโลไนไตรล์ จะจัดอยู่ในกลุ่มของอะคริลิกพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากอะคริลิก ได้แก่ สิ่งทอ พลาสติก เป็นต้น [48]

#### 2.4.3.2.6 กาวผง

##### สมบัติเชิงกล

กาวผง มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะดี สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ เหมาะสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์ และงานไม้ทุกชนิดใช้ผสมกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [58] กาวผงกั้นน้ำ ทนต่อความร้อน และแรงกระแทก กาวมีลักษณะเป็นผง ใช้ผสมน้ำ แห้งเร็ว การยึดเกาะของกาวมีความแข็งแรงทนทาน สามารถนำไปกลึง ไส กั้นน้ำไม่มีเชื้อรา ทนทานต่อน้ำมัน และสารระเหย [59] ดังรูปที่ 2.68



(ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์

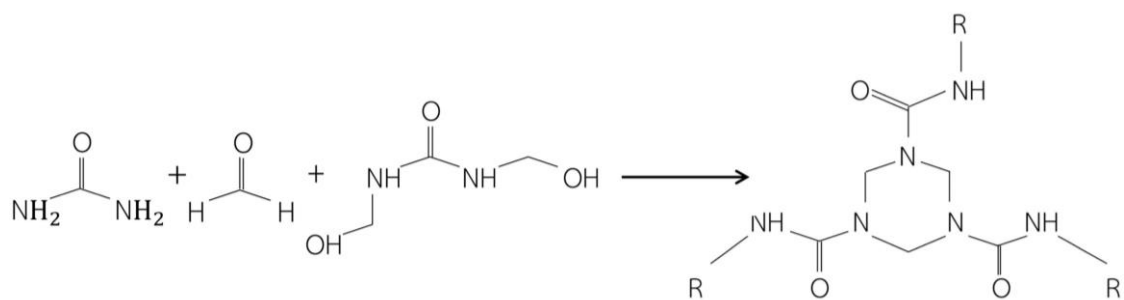
(ข) ลักษณะเนื้อกาว

รูปที่ 2.68 กาวผง (ก) ลักษณะผลิตภัณฑ์ (ข) ลักษณะเนื้อกาว

## สมบัติทางเคมี [48]

สารตั้งต้นที่ใช้ คือ ยูเรียที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน 2 หมู่โดยหมู่ อะมิโนนี้จะทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ ได้ทั้งในสถานะที่เป็นกรดหรือเบส โดยทั่วไปแล้วจะไม่นิยมทำ ปฏิกิริยาในสถานะที่ pH ต่ำกว่า 9 กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ มีการจำหน่ายกันทั้งในลักษณะของเหลว และเป็นผง การเตรียมกาวโดยนำกาวมาผสมกับสารช่วยให้กาวแข็งตัว (hardener) สารช่วยให้กาวแข็งตัวที่ ใช้กับกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ควรเป็นชนิดกรดอ่อนมากๆ เนื่องจากหากใช้กรดแก่จะทำให้ผิววัสดุ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นผลให้แนวกาวเสียหายกาวชนิดนี้หากจะนำมาใช้งานในกรณีที่จะลดการ ปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์จากผลิตภัณฑ์โดยการสังเคราะห์โดยใช้สัดส่วนโมลฟอร์มัลดีไฮด์: ยูเรียต่ำ โดยปกติแล้วจะใช้สัดส่วนฟอร์มัลดีไฮด์: ยูเรียจาก 1.8:1 หรือ 2.0:1 ให้ต่ำกว่า 1.6:1 หรือในบางกรณี ลดสัดส่วนลงถึง 1.2:1 (การลดสารฟอร์มัลดีไฮด์ของกาวยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ในการปฏิบัติงานนั้นสามารถ ทำได้โดยเติมสารเพิ่มอื่น เช่น ยูเรีย เมลามีน แทนนินโซเดียมไดซัลไฟต์ และกรดอนินทรีย์อ่อน เป็นต้น ซึ่งการใช้สัดส่วนโมลต่ำลงจะต้องเพิ่มระยะเวลาในการสังเคราะห์เรซิน กาวที่ได้จะต้องใช้ระยะเวลาใน การทำให้แข็งตัวนานขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลในด้านการยึดติดยังทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดมี แนวโน้มต่ำลง ความทนต่อความชื้นลดลง และระยะเวลาการเก็บรักษา (ความเสถียร) ลดลง กาวยูเรีย ฟอร์มัลดีไฮด์ มีสมบัติทนต่อความชื้นแต่ไม่ทนน้ำ กาวชนิดนี้นิยมใช้การผลิตไม้อัด ไม้พาร์ติเกิล ไม้ MDF แผ่นไม้ไม้อัด และนิยมใช้กันมากในการปิดผิวไม้บางบนชิ้นงานเครื่องเรือนไม้ [60]

ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (urea formaldehyde resin) เป็น เทอร์โมเซตติงที่มีลักษณะโปร่งแสง สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ยูเรียกับฟอร์มัลดีไฮด์ ใน สถานะที่เป็นเบส ตัวอย่างเบสที่เติมเข้าไปในปฏิกิริยา เช่น แอมโมเนีย และโพรติน เป็นต้น ปกติแล้ว ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์จะมีความแข็งแรงมากกว่า ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ส่งผลให้เรซินชนิดนี้ได้มีการ นำไปใช้ทำกาวสารยึดติด แม่แบบ หรือแม่พิมพ์ เป็นต้น สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยูเรีย ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ดังรูปที่ 2.69



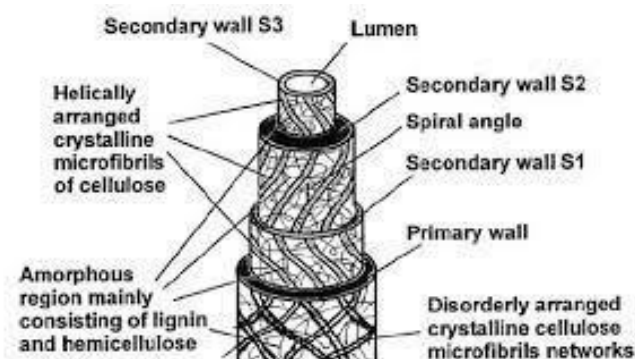
รูปที่ 2.69 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน [48]

## 2.5 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural fiber) แบ่งประเภทของเส้นใยตาม แหล่งกำเนิด เป็น 2 ประเภทคือ เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ โดยเส้นใยธรรมชาติสามารถ แบ่งย่อยได้เป็นเส้นใยจากพืช สัตว์ และแร่ [35] โดยเส้นใยธรรมชาติ เป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่าย มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการโดยเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อม และต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์

เส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยจากพืช สัตว์ และสารอนินทรีย์หรือแร่ธาตุ โดยเส้นใยพืชที่ได้มาจากส่วนลำต้น เช่น เส้นใยกล้วย ฝ้าย ปอ ลินิน เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากใบ เช่น เส้นใยศรนารายณ์ กล้วย เส้นใยที่ได้จากผล เช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยที่ได้มาจากเมล็ด เช่น เส้นใยฝ้าย นุ่น ส่วนเส้นใยที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ ไหมพรมที่มาจากขนแกะ เป็นต้น [4] ในที่นี้ได้กล่าวถึงเส้นใยจากพืช โดยมุ่งเน้นไปที่เส้นใยมะพร้าว

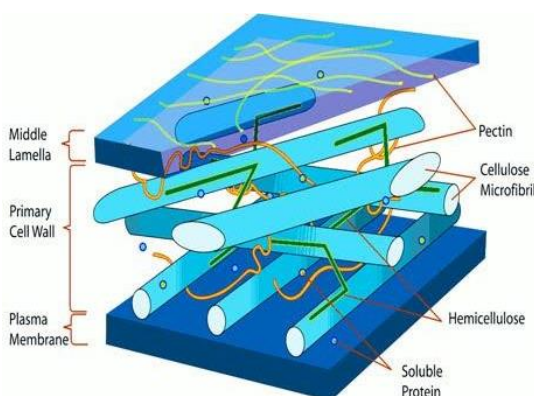
### 2.5.1 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ [61]



รูปที่ 2.70 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ [61]

เส้นใยธรรมชาติได้รับการพิจารณาว่าเป็นวัสดุคอมพอสิตของเส้นใยโฮโลเซลลูโลส (Hollow cellulose fiber) ซึ่งยึดติดเข้าด้วยกันโดยมีลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ โดยผนังเซลล์ของเส้นใยไม่ได้มีลักษณะเป็นเยื่อหุ้มเซลล์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.70 เส้นใยแต่ละเส้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากโดยผนังเซลล์ในเส้นใยมี 2 ชั้น คือ

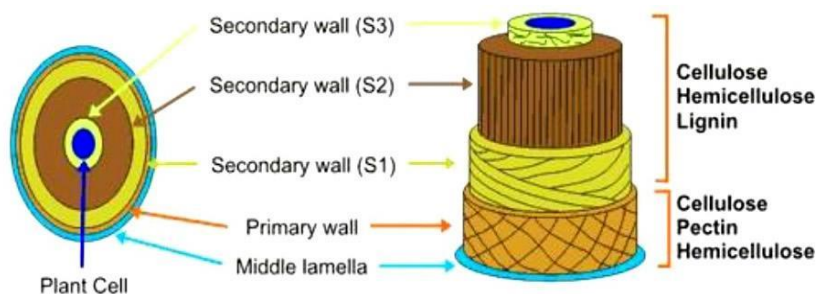
1. ผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) จะมีลักษณะเป็นชั้นบาง อยู่บริเวณด้านนอกสุดของเซลล์โดยเกิดขึ้นในระยะที่เซลล์แบ่งตัว ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน ดังรูป 2.71



รูปที่ 2.71 ลักษณะและองค์ประกอบที่อยู่ภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ [61]

2. ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) เป็นผนังชั้นในสุดที่สร้างขึ้นหลังจาก ขยายตัว เกิดจากการสะสมของสารประกอบพวกลิกนิน ซูเบอร์ิน (Suberin) นอกจากนี้ยัง ประกอบด้วย

เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และคิวติน (Cutin) ดังรูปที่ 2.72 ผนังเซลล์นี้มีความหนา และความแข็งแรงมากกว่าผนังเซลล์ปฐมภูมิ โดยสามารถแบ่งย่อยเป็นชั้นนอก (S1) ชั้นกลาง (S2) และชั้นใน (S3) ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสขนาดไมโคร (Cellulose microfibrils) ที่แตกต่างกัน โดยมีการเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลซึ่งโดยปกติจะมีการวางตัว 5 ถึง 30 °C จากแนวแกนความหนาของผนังเซลล์ จะถูกกำหนดโดยชั้น S2



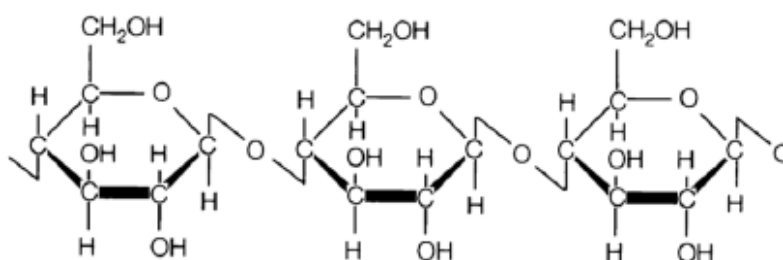
รูปที่ 2.72 ลักษณะและองค์ประกอบที่อยู่ภายในผนังเซลล์ทุติยภูมิ [61]

## 2.5.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [35]

เส้นใยธรรมชาติเกิดจากการรวมตัวขององค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลของเส้นใยองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

### 2.5.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

ลักษณะเป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ตำแหน่งปีต้า 1,4 ( $\beta$ -1,4) เป็นสายยาวซึ่งยาวมากกว่า 2,000 โมเลกุล เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช โดยอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และเพกทิน เซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยว และของมนุษย์ ดังรูปที่ 2.73

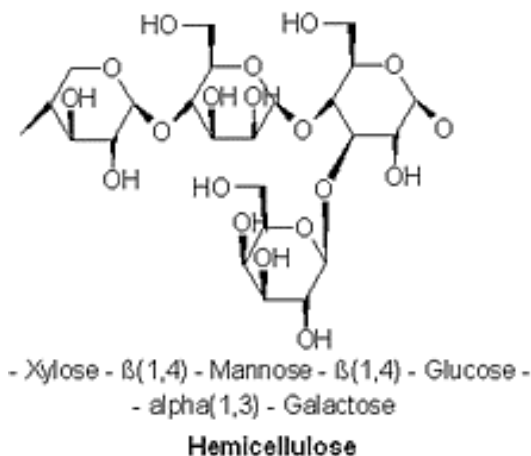


รูปที่ 2.73 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส [35]

### 2.5.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลของน้ำตาลที่มีจำนวนคาร์บอน 5 - 6 อะตอมต่อโมเลกุลเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งก้าน มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า

เซลลูโลส และปริมาณที่พบในเส้นใยมีค่าน้อยกว่าเซลลูโลส หน้าที่หลักของเฮมิเซลลูโลส คือ ช่วยยึดโครงสร้างส่วนเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความหนืดในอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.74



รูปที่ 2.74 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [35]

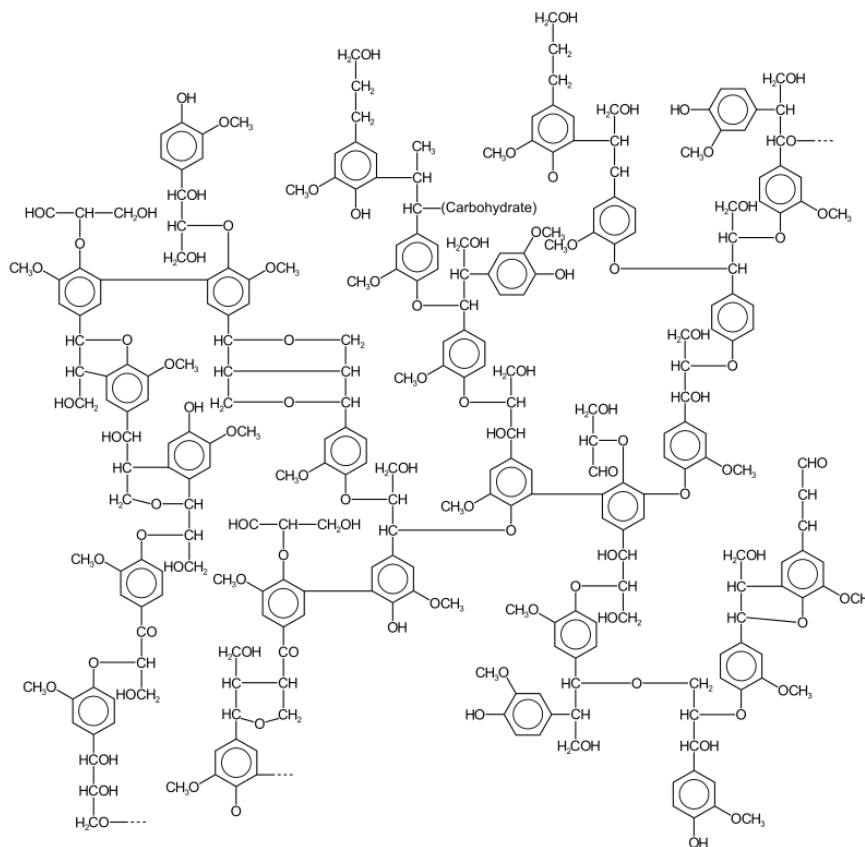
#### 2.5.2.3 ลิกนิน (Lignin)

เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทใยอาหาร (Dietary fiber) ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลของออกซิเจนเตตฟีนิลโพรเพน (Oxygenated phenyl propane) มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000 - 4,500 Dalton โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.75 สันเคราะห์จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล (Coumaryl) โคนิเฟอริล (Coniferyl) และ ซินาพิล (Sinapy) ไม่สลายใน กรด - ต่างแก่ ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช พบในส่วนของผนังเซลล์ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง อยู่ร่วมกับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบของเปลือก เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบมากในผลไม้สุกมากกว่าผลไม้ดิบ

ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินมีการนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายดังนี้

1. ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesives) เช่น สารเชื่อมติด สารกันซึม และสารเคลือบในอุตสาหกรรมกระดาษ
2. ใช้ในด้านเคมีภัณฑ์เกษตร (Agricultural chemicals) เช่น เคมีปรับปรุง ดิน เคมีภัณฑ์ควบคุมฝูง ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และกำจัดวัชพืช ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์
3. ใช้ทำเคมีภัณฑ์สำหรับผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ และเคมีในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ใช้ทำเคมีภัณฑ์สำหรับผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ และเคมีภัณฑ์
4. ใช้ผสมในซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ เช่น ช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดีขึ้น เพิ่มความแข็งแรง
5. ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นสารเติมแต่ง สารเร่งปฏิกิริยา สารช่วยให้มีการยึด (Elastomer)

6. ใช้เป็นสารช่วยกระจาย (Dispersing agent) มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การกำจัดหมึกในอุตสาหกรรมกระดาษ การชุบเคลือบ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ การฟอกย้อม



รูปที่ 2.75 โครงสร้างของลิกนิน [35]

สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลถึงสมบัติของเส้นใยขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น [5]

เส้นใย	เซลลูโลส (wt%)	เฮมิเซลลูโลส (wt%)	ลิกนิน (wt%)	เพกทิน (wt%)	ปริมาณความชื้น (wt%)	แวกซ์ (wt%)
ปอ	71	18.6 - 20.6	2.2	2.3	8 - 12	1.7
กัญชง	70-74	17.9 - 22.4	3.7 - 5.7	0.9	6.2 - 12	0.8
ปอกระเจา	61 - 71.5	13.6 - 20.4	12 - 13	0.2	12.5 - 13.7	0.5
ปอแก้ว	45 - 57	21.5	8 - 13	3 - 5	-	-

กล้วย	63-64	10	5	-	10 - 12	-
ต้นปาล์ม	65	-	19	-	-	-
เปลือกต้นปาล์ม	60	-	11	-	-	-
ฝ้าย	85 - 90	5.7	-	0 - 1	7.85 - 8.5	0.6
มะพร้าว	32.43	0.15 - 0.25	40 - 45	3 - 4	8	-
ฟางข้าว	38 - 45	15 - 31	12 - 20	8	-	-

ในปี ค.ศ. 1838 Anselme ได้ศึกษาว่าผนังเซลล์ของพืชโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงภายในผนังเซลล์ โดยที่เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ส่วนเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์เมื่อกำจัดลิกนินออกไป องค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่กับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของเฮมิเซลลูโลส คือ มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส และเนื่องจากมันเป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) ดังนั้นจึงส่งผลต่อสมบัติการสลายตัวตามธรรมชาติ การดูดความชื้น และการสลายตัวโดยความร้อน องค์ประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ ลิกนิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดติดภายในผนังเซลล์ มีความเสถียรทางความร้อนสูงแต่มีผลกระทบกับการย่อยสลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และองค์ประกอบสุดท้าย คือ เพกทิน เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharides) เป็นเมทริกซ์ภายในผนังเซลล์ [5]

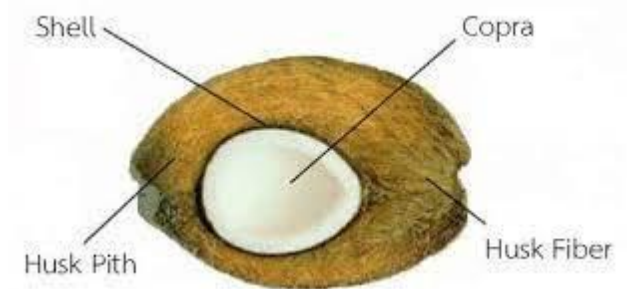
### 2.5.3 เส้นใยมะพร้าว

ใยมะพร้าวเป็นเส้นใยที่ได้จากเปลือกชั้นในที่อยู่ระหว่างผล และเปลือกชั้นนอกถือเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด (Seed fiber) มะพร้าวเป็นพืชยืนต้นอยู่ในตระกูลปาล์ม นอกจากนี้มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Cocos nucifera L.* ปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศไทย โดยสีธรรมชาติของใยมะพร้าวเป็นสีน้ำตาล ดังรูปที่ 2.76 ซึ่งเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะโครงสร้างทางธรรมชาติ คือ เป็นเส้นที่เหนียว แข็งแรง ทนทาน ทนต่อความชื้น และน้ำได้ดี ทนต่อการขัดสี มีอายุการใช้งานยาวนาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [52] ดังรูปที่ 2.77



รูปที่ 2.76 ใยมะพร้าว



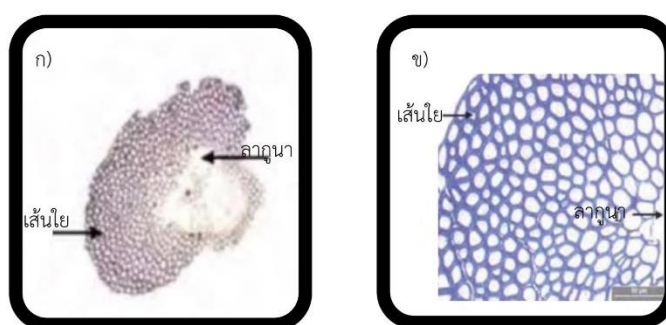


รูปที่ 2.77 โครงสร้างของมะพร้าว [62]

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเส้นใยมะพร้าว [35]

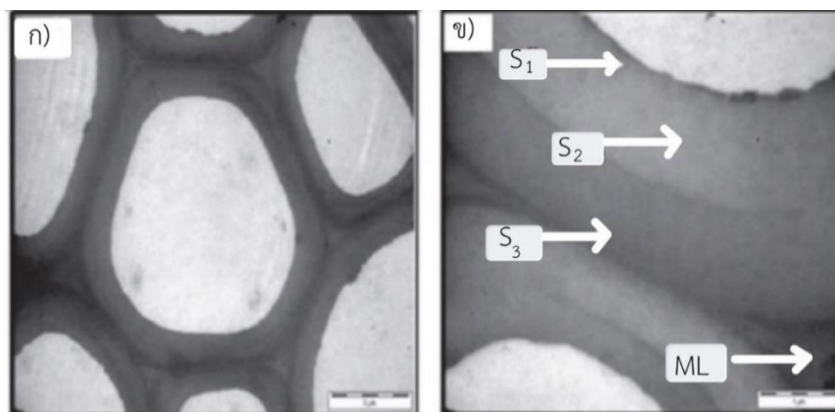
สมบัติเชิงกล	ปริมาณ
ปริมาณเซลลูโลส	32 - 43 wt%
เฮมิเซลลูโลส	0.15 - 0.25 wt%
ลิกนิน	40 - 45 wt%
ความหนา	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Aspect ratio (L/D)	35
Spiral angle	45 °C
ความต้านทานต่อการดึง	175 MPa

โดยปกติเส้นใยมะพร้าวจะประกอบด้วยปริมาณของลิกนินที่สูงมาก ดังตารางที่ 2.2 ทำให้เส้นใยมีลักษณะเหนียวและแข็งที่มากกว่าเส้นใยชนิดอื่นที่มีปริมาณลิกนินต่ำกว่า และจากการศึกษา ลักษณะทางกายวิภาค พบว่าเส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลล์หลายแบบ ได้แก่ เซลล์เส้นใย เซลล์ท่อลำเลียง (Phloem) และเซลล์พาราไคม่า (Parenchyma) โดยจากภาพตัดขวาง ดังรูปที่ 2.89 (ก), (ข) จะพบเซลล์ที่เป็นเส้นใย และเซลล์พาราไคม่า นอกจากนี้ยังพบส่วนที่เรียกว่า ลูคานา (Lucana) คือ บริเวณที่เป็นช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งลักษณะของพื้นผิวของรูพรุนนี้มีประโยชน์ในการเกิดการเกี่ยวพันเชิงกลที่ดีกับเนื้อเรซินสำหรับการผลิตวัสดุคอมพอสิต [61]



รูปที่ 2.78 ภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าว (ก) ที่กำลังขยายต่ำ 4x และ (ข) ที่กำลังขยายสูง 20x [36]

โดยทั่วไปเส้นใยทุกชนิดต่างก็มีความหลากหลายทั้งขนาด รูปร่าง และโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งจากการตรวจสอบภาคตัดขวางของเส้นใยมะพร้าวด้วย Transmission Electron Microscope (TEM) ของเส้นใยมะพร้าวหลังจากการทำปายด้วย Urayl acetate และ Lead citrate ที่กำลังขยายต่ำ 3400x ดังรูปที่ 2.79 (ก) และภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าวที่กำลังขยายสูง 1700x และเป็นหลักฐานที่ยืนยันได้ว่าชั้นโครงสร้างของเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วย ผนังเซลล์ชั้นแรก (Primary cell wall, P) และผนังชั้นย่อย (Secondary cell wall, S) ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น ชั้นนอก (S1) ชั้นกลาง (S2) ชั้นใน (S3) และชั้นมิตติเลลลามลลา



(ก) หลังจากทำการปายด้วย Uranyl acetate และ Lead citrate ที่กำลังขยายต่ำ (3400x)

(ข) ภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าวที่กำลังขยายสูง (17000x)

รูปที่ 2.79 Transmission Electron Microscope (TEM) [36]

## 2.6 แรงตึงผิว และแรงลอยตัว [63]

### 2.6.1 แรงตึงผิว และสภาพคาปิลลารี

แรงตึงผิว (Surface tension) คือ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเขตของพื้นผิวที่อยู่ระหว่างรอยต่อของของไหลหรือระหว่างของไหลกับของแข็ง แรงที่เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวประกอบด้วย Adhesive force คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหลกับของแข็งหรือผนังภาชนะ และ Cohesive force คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหลด้วยกันเองโดยแรงทั้งสองจะส่งผลกับการยึดติด และลักษณะรูปร่างของไหลบนพื้นผิวอัตราส่วนระหว่างแรงตึงผิวต่อความยาวของผิวของเหลวในของเหลวชนิดเดียวกันมีค่าเท่ากันเสมอ โดยถูกกำหนดให้เป็นขนาดของแรงต่อหน่วยความยาว มีหน่วย N/m เรียกว่า ความตึงผิวของของเหลว ( $\sigma_s$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$(\sigma_s) = \frac{F}{L} \quad (2.4)$$

เมื่อ

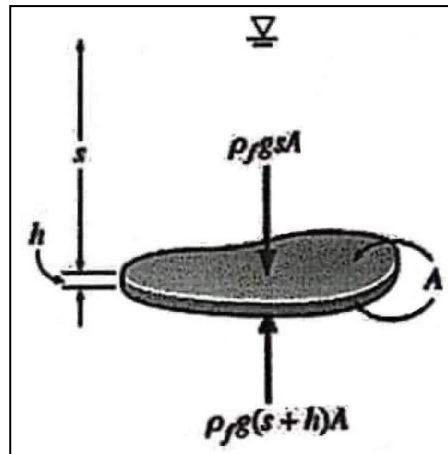
$\sigma_s$  คือ ความตึงผิว (N/m)

F คือ แรงตึงผิว (N)

L คือ ระยะที่ผิวของเหลวสัมผัสกับของเหลวหรือของแข็ง (m)

### 2.6.2 แรงลอยตัว

แรงลอยตัวเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความดันตามระดับความลึกในของไหล ดังรูปที่ 2.80 แผ่นเรียบความหนา  $h$  จมในของไหลที่มีความหนาแน่น  $\rho_f$  พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเรียบเท่ากับ  $A$  ระยะความลึกจากผิวของไหลถึงพื้นที่ด้านบนของแผ่นเรียบเท่ากับ  $s$  จะได้ว่า แรงที่กระทำกับผิวด้านบนของแผ่นเรียบมีค่า  $F_{\text{top}} = \rho_f g s A$  และแรงที่กระทำกับผิวด้านล่างของแผ่นเรียบมีค่าเท่ากับ  $F_{\text{bottom}} = \rho_f g (s+h) A$  ดังนั้นจึงสามารถหาความสามารถในการลอยของวัตถุได้ดังนี้



รูปที่ 2.80 แรงลอยตัวของแผ่นเรียบที่จมในของเหลว [63]

พิจารณาสมการแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2.4

$$\sum F_b = F_{\text{bottom}} - F_{\text{top}} = \rho_f g (s+h) A - \rho_f g s A = \rho_f g h A = \rho_f g V \quad (2.5)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า แรงลอยตัว (Buoyancy force,  $F_b$ ) คือ แรงที่กระทำกับวัตถุที่ลอยหรือจมอยู่ในของไหล เป็นแรงยกวัตถุขึ้นซึ่งแรงลอยตัวนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุนั้นตามหลักของ อาร์คิมิดีส (Archimedes's principle) จากสมการที่ 2.5

$$F_b = W = \rho_f g V \quad (2.6)$$

เมื่อ  $(\rho_f)$  คือ ความหนาแน่นของของไหล  
 $V$  คือ ปริมาตรของไหลที่ถูกแทนที่  
 $W$  คือ น้ำหนักของวัตถุ

จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 แสดงให้เห็นว่าถ้าน้ำหนักของวัตถุมากกว่าแรงลอยตัววัตถุจะจม และในทางตรงข้ามถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าน้ำหนักของวัตถุ วัตถุนั้นจะลอย หลักการแรงลอยตัวของ อาร์คิมิดีสสรุปได้ดังนี้

(ก) ถ้าวัตถุจมในของไหลทั้งหมด แสดงว่าการลอยตัวขึ้นด้วยแรงที่เท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุแทนที่

(ข) เมื่อวัตถุลอยในของไหล จะแทนที่ปริมาตรของของไหลนั้นเพียงการสมดุลกับน้ำหนักของวัตถุเท่านั้น

### 2.6.2.1 สมดุลของวัตถุจมและวัตถุลอย

ความเสถียรของวัตถุเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าวัตถุที่จมในของเหลวนั้นสามารถหมุนกลับสู่ตำแหน่งเดิมหลังจากที่เอียงไปได้หรือไม่ โดยสถานะของความเสถียรจะขึ้นอยู่กับลักษณะการจมของวัตถุว่าจมในของไหลทั้งหมดหรือจมบางส่วน โดยหาเสถียรภาพจากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วง (จุด G) และจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัว (จุด B) ดังรูปที่ 2.81 และ 2.82

#### 2.6.2.1.1 วัตถุจม

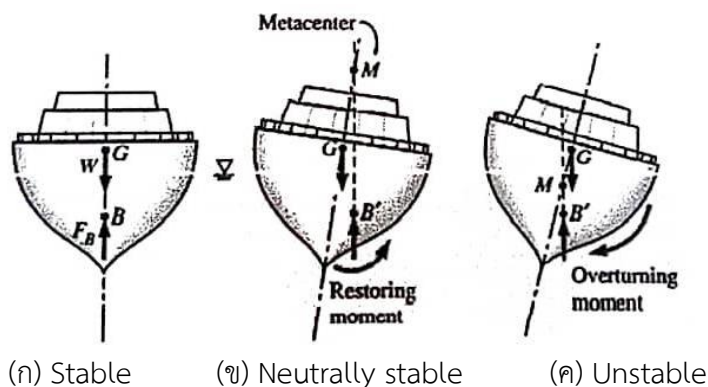
วัตถุที่จมในของไหลทั้งหมด เช่น เรือดำน้ำ เมื่อได้รับแรงกระทำจากกระแสน้ำแล้วเกิดการเอียงเล็กน้อย วัตถุนั้นสามารถกลับสู่ตำแหน่งสมดุลได้ แสดงว่าวัตถุนั้น มีเสถียรภาพ (Stable) ตำแหน่งศูนย์กลางถ่วง และจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัวจะคงที่ ส่วนจุด B อยู่เหนือจุด G ดังรูปที่ 2.81 ถ้าวัตถุเอียงเล็กน้อยจากตำแหน่งสมดุลแรงลอยตัวที่กระทำในทิศขึ้น และน้ำหนักของวัตถุที่กระทำในทิศลง จะทำให้เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบในทิศตรงข้ามกับการเอียงของวัตถุ วัตถุจึงกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้ แต่ถ้าตำแหน่งศูนย์กลางของแรงลอยตัวอยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์กลางถ่วง เมื่อวัตถุเอียงจะเกิดโมเมนต์แรงคู่ควบที่ทำให้วัตถุพลิกคว่ำ และไม่สามารถหมุนกลับไปตำแหน่งเดิมได้ จึงเรียกว่า ไม่เสถียร (Unstable) ในกรณีที่จุดศูนย์กลางของแรงลอยตัวและจุดศูนย์กลางถ่วงอยู่ตำแหน่งเดียวกันจะไม่เกิดแรงคู่ควบ และวัตถุจะยังคงอยู่ตำแหน่งเดิมได้ เรียกว่า สมดุลสะเทิน (Neutrally stable)



รูปที่ 2.81 เสถียรภาพของวัตถุจม (ก) Stable (ข) Neutrally stable (ค) Unstable [63]

#### 2.6.2.1.2 วัตถุลอย

เสถียรภาพของวัตถุลอยสามารถหาได้จากจุดเมตาเซนเตอร์ (Metacenter: M) หรือจุดที่วัตถุเริ่มโคลงหรือหมุนรอบเมื่อวัตถุถูกทำให้เอียงเป็นมุมเล็กน้อย หาได้จากจุดตัดของเส้นแนวแรงลอยตัวกับเส้นแกนของวัตถุ (เส้นที่ลากตั้งฉากกับวัตถุ หรือเส้นประดังรูปที่ 2.82) ถ้าวัตถุลอยในสภาวะสมดุลเสถียร จุด M จะอยู่สูงกว่าจุด G เมื่อวัตถุเอียง จุดศูนย์กลางของแรงลอยตัวจะเลื่อนจากตำแหน่งเดิม ถ้าเขียนเส้นแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัวที่เลื่อนนี้ (B') จะตัดเส้นแนวเดิมที่จุด M เมื่อแรงลอยตัวกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัว และน้ำหนักของวัตถุกระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงจะเกิดโมเมนต์คู่ควบในทิศตรงข้ามทำให้วัตถุกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้ ดังรูปที่ 2.82 (ก - ข) แต่ถ้าจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G (ดังรูปที่ 2.82 ค) จะไม่มีแรงคู่ควบมากพอที่จะทำให้วัตถุกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม แสดงว่าวัตถุลอยนั้นไม่เสถียร



รูปที่ 2.82 เสถียรภาพของวัตถุลอย (ก) Stable (ข) Neutrally stable (ค) Unstable [63]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Momina et. al. (2021) ศึกษาอุตสาหกรรมที่มีการใช้ผงซักฟอกในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดมลภาวะของสารลดแรงตึงผิวที่ไม่พึงประสงค์ คือ Sodium dodecyl sulphate (SDS) หากไม่ได้รับการบำบัดอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะสัตว์น้ำ ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบมีแผ่นพองฟุ้ง (Floating treatment wetland, FTWs) เป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนของแบคทีเรียที่รากของพืชสองชนิด ได้แก่ *Brachiaria mutica* และ *Leptochloa fusca* โดยพืชน้ำถูกปลูกอยู่บนแผ่นลอยน้ำพองฟุ้ง เพื่อให้รากอยู่ใต้น้ำช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยกลุ่มของแบคทีเรียที่รากพืชเป็นกลุ่ม *Acinetobacter sp.* สายพันธุ์ BRS156 และสายพันธุ์ CYRH21 และแบคทีเรีย *Acinetobacter junii* สายพันธุ์ TYRH47 ถูกนำไปใช้เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการย่อยสลาย ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า FTW ที่ปลูกด้วยพืชทั้งสองชนิดสามารถกำจัด SDS ออกจากน้ำได้สำเร็จ อย่างไรก็ตามการเพิ่มแบคทีเรียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด โดยความเข้มข้นของ SDS ลดลงสูงสุด 97.5% ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) 92.0% ความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) 94.2% และความขุ่น 99.4% พบได้ในน้ำที่บำบัดด้วยพืช *B. mutica* ซึ่งพบปริมาณแบคทีเรียที่รากเพิ่มขึ้น และพบการเจริญเติบโตของรากและยอดของต้น *B. mutica* มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ *L. fusca* การศึกษานี้สรุปว่า FTWs มีศักยภาพในการกำจัด SDS ออกจากน้ำเสีย และมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้จากการมีแบคทีเรียเสริมการย่อยสลาย [22]

Gustavo Stolzenberg Colares et. al. (2021) ศึกษาการระบบผสมผสานที่ประกอบด้วยชุดกรองชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic biofilter, AF) และระบบบึงประดิษฐ์แบบมีแผ่นพองฟุ้ง (Floating treatment wetland, FTWs) ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial fuel cells, MFC) ในการบำบัดน้ำเสียที่วิทยาเขตของมหาวิทยาลัย (University of Santa Cruz do Sul; UNISC) และศึกษาการเกิดไฟฟ้าชีวภาพ ในขั้นที่หนึ่งน้ำเสียปริมาตร 1450 ลิตรถูกสูบเข้าสู่ถังกรอง AF ผ่านท่อพลาสติก จากนั้นในขั้นที่สองน้ำเสียที่ผ่านการกรองจะเข้าสู่ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตรทำหน้าที่พักน้ำที่จะเข้าสู่บ่อจำลองระบบบึงประดิษฐ์แบบมีแผ่นพองฟุ้ง (FTW) ขนาด 1,000 ลิตร ซึ่งใช้ชุดพองฟุ้งทำจากพอลิยูรีเทนสำหรับพองฟุ้งผักหลากหลายชนิดให้ลอยตัวอยู่ในบ่อจำลอง โดยมีการป้อนน้ำจากถังพักสัปดาห์ละ 700 ลิตร ที่รากของพืชติดขั้วกราไฟท์เป็นขั้วแคโทดและที่ก้นถังติดแท่งกราไฟท์จำนวน 40 แท่งไว้ภายในท่อพลาสติกที่ยึดติดกับลวดสแตนเลสเป็นขั้วแอโนด ทำการวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองแบบ Open circuit ทุกวันเป็นเวลา 6 สัปดาห์ และสุดท้ายวัดความต่างศักย์แบบ Closed circuit

โดยต่อกับตัวต้านทาน 1000 โอห์ม หลังการทดลองพีชลอยน้ำแต่ละชนิดที่ปลูกถูกเก็บเกี่ยวเพื่อวัดปริมาณชีวมวลและการเจริญเติบโต ผลการทดลองพบว่า ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพในการลด BOD<sub>5</sub> (55.1%) COD (71.4%) ความขุ่น (90.9%) และคอลิฟอร์มทั้งหมด (99.9%) แต่ให้ประสิทธิภาพต่ำในการลดไนโตรเจนทั้งหมด (8.4%) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (11.4%) เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าจากขั้วแกรไฟท์ที่รากพืชและกันอย่างพบว่ามีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูงสุดในวันที่เติมน้ำเสีย โดยมีค่าถึง 225 mV และ 0.93 mW/m<sup>2</sup> ตามลำดับ และค่าลดลงตลอด 7 วันต่อมา นอกจากนี้ยังพบว่าพืชที่มีการเจริญเติบโตของรากมากให้ค่าความต่างศักย์สูงกว่าพืชที่มีระบบรากเติบโตน้อยกว่าซึ่งอาจเกิดจากปริมาณออกซิเจนจากรากพืช ดังนั้นการรวมระบบ FTW และ MFC รวมกันมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสีย และการสร้างพลังงานไฟฟ้า [64]

Katy Chapman et. al. (2020) ได้ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยพืชโดยใช้ Floating mats wetland plant เพื่อลดปริมาณฟอสฟอรัสที่มากเกินไปในน้ำซึ่งจะมีผลเสียต่อการเกิด Eutrophication โดยการทดสอบศักยภาพในการลดฟอสฟอรัสด้วยพืช 5 ชนิดคือ 1. *Pteris vittata* 2. *Lemna minor* 3. *Rumex orbiculatus* 4. *Rumex verticillatus* 5. *Typha x glauca* ทั้งในห้องปฏิบัติการและในบ่อบำบัดจริงโดยวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในลำต้นและรากของพืชจากบ่อบำบัดจริง และเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสฟอรัสจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองจากทั้งสองแหล่งพบว่าพืช *T. glauca* สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากที่สุด โดยผลจากบ่อบำบัดจริงพบว่าลำต้นของ *T. glauca* กำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำ 3.7 กรัม ฟอสฟอรัส (P)/ลำต้น ในขณะที่ทั้งต้นและรากกำจัดได้ถึง 12.67 กรัม ฟอสฟอรัส/ต้น ส่วนผลจากห้องปฏิบัติการพบว่าต้น *T. glauca* กำจัดฟอสฟอรัสได้ 84% ต้น *Rumex orbiculatus* ให้ผลการบำบัดในปริมาณที่สูงรองลงมาคือกำจัดได้ 0.46 กรัม P/ลำต้น 1.93 กรัม P/ต้น (รากและลำต้น) ในบ่อบำบัดจริง และ กำจัดฟอสฟอรัสได้ 90% ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองแสดงให้เห็นศักยภาพที่ดีของต้นพืชพันธุ์ *T. glauca* และ *R. orbiculatus* ในการลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำ [65]

ชนิษฐา (2555) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบสวนพีชลอยน้ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม รวมถึงการเติบโต และการอยู่รอดของหญ้าแฝก ในน้ำเสียจากการฟอกย้อมซึ่งมีค่า pH 5.78 ซีไอดี 317 mg/L ซีไอดี 150.13 mg/L ความขุ่น 27.16 เอ็นทียู ปริมาณของแข็งแขวนลอย 55.67 mg/L จากการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบสวนแฝกลอยน้ำ พบว่าอายุของหญ้าแฝกมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย หญ้าแฝกที่มีอายุ 3 เดือนจะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพค่าพีเอช ลดค่าบีไอดี ซีไอดี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และกำจัดสีได้ร้อยละ 13, 77, 36, 37, 88 และ 43 ตามลำดับ และเมื่อศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกพบว่าหญ้าแฝกที่อายุ 3 เดือนมีความสูง 134 cm ความยาวราก 24.62 cm และมีอัตราการอยู่รอดของหญ้าแฝกร้อยละ 95.5 [10]

Lauren M. Garcia Chance et. al. (2019) ได้ศึกษา Floating treatment wetlands (FTWs) ที่เป็นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำจากพืชเพื่อกำจัดสารอาหาร และโลหะออกจากน้ำภายใต้สภาวะต่างๆ พืชที่ปลูกในระบบ FTWs สามารถสะสมและกักเก็บสารอาหารภายในเนื้อเยื่อ แต่ปริมาณการดูดซึม และการจัดเก็บขึ้นอยู่กับชนิดพืช และความเข้มข้นของอาหาร งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุอาหารที่ให้ และการดูดซึมธาตุอาหารของพืช 2 สายพันธุ์ และรูปแบบการแบ่งตัวภายในเนื้อเยื่อพืช (รากและยอด) ในระบบ FTWs เพื่อควบคุมคุณภาพของน้ำ การบำบัดน้ำประกอบด้วยขั้นตอนที่ (1) ป้อนไนโตรเจนความเข้มข้นสูง 15 mg ไนโตรเจน (N)/L และความเข้มข้นต่ำ 5 mg N/L เป็นปุ๋ยที่

ละลายน้ำได้ และ ขั้นตอนที่ (2) ศึกษาการบำบัดในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้สภาวะควบคุม 4 รูปแบบ ได้แก่ (a) แหล่งน้ำ (b) มีแผ่นพืชน้ำที่ไม่มีพืชลอยบนผิวน้ำ (c) แผ่นลอยน้ำพืชน้ำ *Pontederia cordata* L. และ (d) แผ่นลอยน้ำพืชน้ำ *Juncus effusus* L. ผลการทดลองพบว่า *P. cordata* มีอัตราการกำจัดสูงสุดคือ N ( $0.31 \text{ mg} \cdot \text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ ) ฟอสฟอรัส (P) ( $0.34 \text{ mg} \cdot \text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ ) และ สำหรับพืช *J. effusus* แสดงอัตราการบำบัดที่ความเข้มข้นของสารอาหารได้ค่าการบำบัดที่ต่ำ คือ N ( $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ ) และ P ( $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ ) พบการสะสมของ N กับ P ในพืช *J. effusus* มากสุดในเดือนกันยายน ทั้งในราก ( $50 \text{ g N}$  และ  $4.8 \text{ g P}$ ) และเนื้อเยื่อของลำต้น ( $98 \text{ g N}$  และ  $12.5 \text{ g P}$ ) ส่วนการดูดซึมธาตุอาหาร N และ P ในพืช *P. cordata* สูงที่สุดที่เนื้อเยื่อรากในเดือนสิงหาคม ( $307 \text{ g N}$  และ  $30.5 \text{ g P}$ ) และเนื้อเยื่อลำต้นในเดือนกันยายน ( $1490 \text{ g N}$  และ  $219.5 \text{ g P}$ ) ซึ่งในพืชทั้งสองชนิดมีการสะสมของ N และ P ที่ลำต้นมากกว่าที่ราก ส่งผลให้อัตราส่วนของความยาวรากต่อลำต้นมีค่าน้อยจากทุกช่วงเดือนของการทดลอง การเก็บเกี่ยวพืชทั้งสองสายพันธุ์จาก FTWs ควรเกิดขึ้นก่อนที่พืชจะร่วงโรยในฤดูใบไม้ร่วง โดยใช้พืช *P. cordata* และ *J. effusus* เป็นสายพันธุ์ตัวอย่าง ซึ่งทดลองในช่วงกลางถึงปลายเดือนกันยายนใน USDA Hardiness Zone 8a ทางตะวันออกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา [66]

João Alexandre Saviolo Ostia et. al. (2020) ได้ทำการทดสอบเกาะลอยน้ำเทียม (Artificial floating islands; AFI) เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากบ่อปลานิล เกาะลอยน้ำประดิษฐ์เป็นรูปแบบหนึ่งของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed wetlands; CWs) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่ใช้พื้นที่เพียง 10% ของพื้นที่การผลิตจากสมมติฐานที่ว่า AFI มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารออกจากบ่อเลี้ยงปลาที่ผลิตได้ จึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของ AFI ร่วมกับผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ในการกำจัดสารอาหารในบ่อเลี้ยงปลานิล การทดลองทำในบ่อเลี้ยงสองรูปแบบคือมีและไม่มี AFI ในช่วงระยะเวลาเจริญเติบโตของปลานิล เรียกว่าหนึ่งรอบการผลิต การเก็บตัวอย่างแบบสุ่มทำทั้งสองบ่อ โดยทำการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิของน้ำ ออกซิเจนละลาย การนำไฟฟ้า pH ความขุ่น (NTU) ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอนินทรีย์รวม (TIN) ฟอสฟอรัสรวม (TP) และออร์โธฟอสเฟต (P-PO<sub>4</sub>) ของน้ำเข้าและออกจากบ่อปลาทุกสัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ย ออกซิเจนละลายน้ำ การนำไฟฟ้า pH และ DO ไม่แตกต่างกันระหว่างบ่อปลาทั้งสองแบบ แต่ปริมาณ TN, TIN, TP และ P-PO<sub>4</sub> จากบ่อเลี้ยงปลาที่มี AFI ต่ำกว่าจากระบบที่ไม่มี AFIs อาจกล่าวได้ว่า AFIs ปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งเป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องประมาณการพื้นที่ขั้นต่ำที่จำเป็นสำหรับการนำ AFI ไปปรับปรุงคุณภาพน้ำ เพื่อเพิ่มปริมาณการกำจัดธาตุอาหารโดยเฉพาะฟอสฟอรัส การควบคุมเวลาที่น้ำอยู่ภายในบ่อปลา ก่อนปล่อยออกต้องพัฒนาให้ดีขึ้นเพื่อมีเวลาพอในการเกิดของแพลงก์ตอนพืชและเป็นผลดีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส [67]

Mark T. Brown et. al. (2018) มีเป้าหมายของงานวิจัยคือการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบบำบัดน้ำแบบใช้แผ่นลอยน้ำพืชน้ำในระดับนำร่อง (pilot) สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus; TP) ในทะเลสาบที่มีปัญหาเกี่ยวกับสารอาหารในน้ำมากเกินไปในแถบฟลอริดาตอนกลาง ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยระบบบำบัดใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ และระบบบำบัดทางกายภาพ-เคมี ในขั้นแรกเป็นการศึกษาระบบบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ และทางกายภาพ-เคมีตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ในทะเลสาบตามธรรมชาติที่มีการควบคุมสภาวะการทดลอง และในห้องปฏิบัติการ ในการทดลองทำในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ 13 แห่ง ที่มีความหลากหลายของสารอาหารและพืชน้ำ โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด TP การกำจัดออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) และอัตราการกำจัด

ต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการใช้เครื่อง Jar test และคอลัมน์ ที่มีชนิดของสารดูดซับแตกต่างกัน 7 ชนิด รวมกับผงเรซินอีก 3 ชนิด เพื่อวิเคราะห์ความจุในการดูดซับสาร เมื่อการทดสอบแบบแยกแต่ละทะเลสาบเสร็จแล้วจึงมาทำการออกแบบและทดสอบระบบบำบัดแบบเกาะลอยน้ำ (Floating island treatment system; FITS) ในทะเลสาบทางตอนกลางของฟลอริดาเป็นเวลา 8 เดือน (เรียกว่าหนึ่งรอบปีการเจริญเติบโตของพืช = a) ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในทะเลสาบมีค่าเฉลี่ย 40-50% มีค่าการดูดซับสารเฉลี่ยในทะเลสาบทุกแห่งเท่ากับ 5.0 กรัมต่อตารางเมตรต่อรอบปีพืช ( $\text{gm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ) โดยระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือในระบบที่มีพืชใต้น้ำ (Submerged aquatic vegetation; SAV) และ ระบบที่มีตัวกรองสาหร่าย (Algae scrubber; AGS) ซึ่งสามารถกำจัดสารได้ 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ( $\text{mgm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) และเท่ากับการกำจัดเฉลี่ย 5.5 และ 12.0  $\text{gm}^{-2}\text{a}^{-1}$  สำหรับระบบ SAV และ AGS ตามลำดับ สำหรับสารดูดซับจากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าสาร alum residual (AR) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยลดความเข้มข้นของ  $\text{PO}_4^{3-}$  ได้ประมาณ 75% ในเวลา 5 นาที ส่วนการดูดซับด้วยเรซินที่มีจำหน่ายทั่วไปพบว่า เรซิน PhosX ให้ผลที่ดีที่สุดกว่าเรซินชนิดอื่น โดยกำจัดฟอสฟอรัสได้ 40% ในเวลา 30 นาที และ 60% ในเวลา 60 นาที จากผลการทดลองในทุกรูปแบบของการบำบัดพบว่าเมื่อใช้ระบบ FITS ได้ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{PO}_4^{3-}$  ประมาณ 53% โดยคำนวณจากชุดข้อมูลที่ percentile ที่ 50 และ 90 ของค่าการลดลงของ  $\text{PO}_4^{3-}$  และพบว่าระบบบำบัดเฉพาะ FITS และระบบบำบัดที่ใช้ FITS ร่วมด้วยให้ประสิทธิภาพ 56% และ 86% ตามลำดับ และอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสต่อหน่วยพื้นที่มีค่าระหว่าง 8.9 ถึง 16.5  $\text{gm}^{-2}\text{a}^{-1}$  [68]



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงการเตรียมวัตถุดิบ อุปกรณ์ สารเคมี เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นลอยน้ำ พยางค์จากเส้นใยมะพร้าว และขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลของชนิดตัวประสาน ศึกษาผลของความดันในการขึ้นรูป ต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพยางค์จากใยมะพร้าว และศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์

##### 3.1.1 วัตถุดิบ

1. ใยมะพร้าว
2. กาวน้ำใส
3. กาวลาเท็กซ์
4. กาวยางบง
5. กาวยางพารา
6. กาวผง

##### 3.1.2 เครื่องมือ

1. เครื่องปั่น ยี่ห้อ Smart home
2. ถาดแม่แบบสำหรับขึ้นรูปสำหรับศึกษาสมบัติเชิงกลขนาด กว้าง 35 cm ยาว 25 cm หนา 2.5 cm
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. ชุดเครื่องมือแก้ว ได้แก่
  - บีกเกอร์ขนาด 10, 50, 250, และ 500 ml
  - กรวยกรอง
  - กระจกตวงขนาด 100 ml
  - ขวดรูปชมพู่ขนาด 50, 250, 1,000 ml
  - Volumetric Flask ขนาด 10, 50, 250, 500 และ 1,000 ml
  - หลอดเนสเลอร์ขนาด 100 และ 50 ml
  - Glass bead
  - ขวดสีชาที่ทำด้วยแก้วบอโรซิลิเกต
5. ตู้อบ Hot Oven
6. ลูกกลิ้ง
7. ฟองน้ำ
8. ไตรฟิเปา
9. เครื่องอัดแผ่น
10. เครื่อง Universal Testing machine ยี่ห้อ TE Superior รุ่น WDW-20

11. ดินน้ำมัน
12. เลนส์กล้องกำลังขยาย 20 เท่า ยี่ห้อ Chulasmartlens
13. โถดูดความชื้น Desiccator
14. เครื่อง UV Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ biochrom รุ่น Libra S70
15. ชุดกรองสุญญากาศ Buchner
16. ตู้ดูดควัน Fume hood
17. เครื่อง pH meter รุ่น Lap 845
18. กระดาษกรอง GF/C ขนาด 4.7 mm
19. ถ้วยอลูมิเนียม ฟอยล์
20. ปากคีบ

### 3.1.3 สารเคมี

1. Phenolphthalein ( $C_{20}H_{14}O_4$ )
2. Sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) 5 N
- 3 Sodium hydroxide (NaOH)
4. Ammonium molybdate
5. Potassium antimony tartrate hemihydrate ( $KSbO$ )  $C_4H_4O_6 \cdot 0.5.H_2O$  AR grade
6. Ascorbic Acid ( $C_6H_8O_6$ )
7. Potassium Dihydrogen phosphate ( $KH_2PO_4$ )
8. Hydrochloric acid
9. Potassium Iodide (KI)
10. Zinc sulfate ( $ZnSO_4$ )
11. สาร EDTA
12. Ammonium chloride ( $NH_4Cl$ )
13. Mercuric Iodide ( $HgI_2$ )

## 3.2 การเตรียมแผ่นลอยน้ำพองพืชจากไยมะพร้าว

ศึกษาผลของชนิดการประสาน ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นลอยน้ำพองพืชจากไยมะพร้าว

เตรียมเส้นใย กาวประสาน ชุดอัดแผ่นความดันและให้ความร้อน เตรียมไยมะพร้าวที่มีความยาวเฉลี่ยของใยประมาณ 0.4 นิ้ว โดยที่ผ่านการทำความสะอาด พร้อมบดล็อกขึ้นรูปแผ่นคอมโพสิตจากไยมะพร้าวกับกาวประสาน ขนาด กว้าง 10 นิ้ว ยาว 7 นิ้ว ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นเตรียมกาวประสาน 5 ชนิด ได้แก่ กาวน้ำใสกาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ไยมะพร้าว และถาดแม่แบบสำหรับศึกษาสมบัติเชิงกล



รูปที่ 3.2 ลักษณะกาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง

- 3.2.2 กระจายใยมะพร้าวอย่าให้พันกัน จากนั้นชั่งน้ำหนักใยและตัวประสาน
- 3.2.3 ปั่นด้วยเครื่องปั่น ผสมใยมะพร้าวกับกาวประสานโดยปริมาณใยมะพร้าว 30 g และกาวประสาน 30 g/ น้ำ 200 g
- 3.2.4 นำใยมะพร้าวผสมกับกาวน้ำใส ผสมลงบนถาดแม่แบบที่เตรียมไว้จำนวน 7 แผ่นต่อกาวหนึ่งชนิดเพื่อขึ้นรูปแผ่นลายนํ้าพุงพิษจากใยมะพร้าว
- 3.2.5 เกลี่ยใยมะพร้าวให้เต็มแผ่น ชับน้ำส่วนที่เกินออกแล้วใช้ลูกกลิ้งรีดให้หน้าเรียบ
- 3.2.6 อบแห้งเป็นเวลา 15 min ที่อุณหภูมิ 120 °C แล้วนำแผ่นออกจากถาดแม่แบบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อบแห้งไยมะพร้าวและกาวประสาน

3.2.7 ทำข้อ 3.2.2 - 3.2.7 ซ้ำโดยเปลี่ยนจากกาวประสานเพื่อเตรียมแผ่นลอยน้ำพุงพีช

3.2.8 เมื่อขึ้นรูปแผ่นลอยน้ำพุงพีชเสร็จเรียบร้อยนำไปอัดด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน  $50 \text{ kg/cm}^2$  อุณหภูมิ  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  เวลา 90 วินาทีในแต่ละด้าน โดยอัดแผ่นทั้งสองด้าน จากนั้นจะได้แผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวทั้งหมด 35 แผ่น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอัด

3.2.9 ทำซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนถาดแม่แบบสำหรับการศึกษการย่อยสลายทางชีวภาพขนาดกว้าง 35 cm ยาว 25 cm จำนวน 6 แผ่น ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ถาดแม่แบบสำหรับศึกษการบำบัดน้ำเสีย

### 3.3 การศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

3.3.1 เตรียมแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวดังอธิบายในข้อ 3.2 จำนวน 7 แผ่น ต่อกาวหนึ่งชนิด

3.3.2 กาวประสานที่ใช้ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง

3.3.3 เปลี่ยนชนิดกาวที่ใช้เป็นตัวประสานดังข้อ 3.3.2 จนครบ รวม 35 แผ่น โดยใช้สัดส่วนกาวประสาน 30 g/ น้ำ 200 g เหมือนกันกับกาวทุกชนิด

3.3.4 ขึ้นรูปแผ่นลอน้ำพุงพีชเสร็จเรียบร้อยนำไปอัดด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน  $50 \text{ kg/cm}^2$  อุณหภูมิ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เวลา 90 วินาทีในแต่ละด้าน โดยทำการอัดแผ่นทั้งสองด้าน

3.3.5 นำแผ่นลอน้ำพุงพีชที่เตรียมจากกาวประสานทั้ง 5 ชนิดไปทดสอบสมบัติเชิงกลดังอธิบายในข้อ 3.5

### 3.4 การศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

3.4.1 เตรียมแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวดังอธิบายในข้อ 3.2 โดยใช้กาวยางพารา (เนื่องจากทำการทดสอบมาแล้วพบว่ากาวยางพาราให้ผลในการย่อยสลายและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด)

3.4.2 ใช้สัดส่วนกาวยางพารา 30 g ต่อน้ำ 200 g ผสมกับเส้นใยมะพร้าวลงบนลาดแม่แบบที่เตรียมไว้จำนวน 16 แผ่น

3.4.3 หลังจากนำแผ่นลอน้ำพุงพีชไปอบแห้งเป็นเวลา 15 min ที่อุณหภูมิ  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน 50 70 90 และ  $100 \text{ kg/cm}^2$  ที่อุณหภูมิ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 90 วินาทีในแต่ละด้าน โดยทำการอัดแผ่นทั้งสองด้าน

3.4.4 นำแผ่นลอน้ำพุงพีชที่เตรียมด้วยความดันในการอัดแผ่นทั้ง 4 ค่าความดันไปทดสอบสมบัติเชิงกลดังอธิบายในข้อ 3.5

### 3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว ได้แก่ (1) ความหนาแน่นรวม (2) การดูดซับน้ำ (3) การรับน้ำหนักของแผ่นลอน้ำ (4) การวิเคราะห์พื้นผิว ช่องว่างเส้นใยด้วย SEM (5) การทดสอบแรงกดและระยะการคืนรูปด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) (6) การวิเคราะห์ค่า Vicker hardness test, HV วิธีการวิเคราะห์เป็นดังนี้

3.5.1 วิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

3.5.1.1 นำชิ้นงานแผ่นลอน้ำพุงพีชมาชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกผลของน้ำหนัก (m)

3.5.1.2 วัดขนาดเพื่อคำนวณหาปริมาตร (v) โดยใช้สูตรกว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา ของแผ่นลอน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

3.5.1.3 คำนวณหาความหนาแน่นรวม ( $\rho$ ) ได้จากสมการที่ 3.1

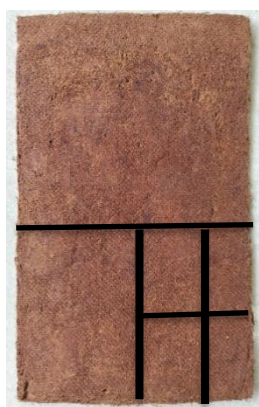
$$\rho ; (\text{g/cm}^3) = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

3.5.1.4 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.5.1.5 ทำข้อ 3.5.1.1 - 3.5.1.4 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

3.5.2 วิเคราะห์ร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

3.5.2.1 นำแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวตัดแบ่งเป็น 1/12 ส่วนของแผ่น โดยใช้จำนวน 3 แผ่น ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผ่นลอยน้ำพุงพีชแบ่งส่วน

3.5.2.2 นำแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวไปชั่งน้ำหนักก่อนแช่น้ำ ( $W_{\text{dry}}$ ) ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 23 ชั่วโมง เพื่อให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แช่แผ่นลอยน้ำพุงพีชในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง

3.5.2.3 นำตัวอย่างขึ้นมาชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำโดยไม่ต้องซับน้ำ ( $W_{wet}$ )

3.5.2.4 คำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับน้ำได้จากสมการที่ 3.2

$$\% \text{ การดูดซับน้ำ} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.5.2.5 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.5.2.6 ทำข้อ 3.5.2.1 - 3.5.2.4 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอยน้ำพุงพืชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

3.5.3 วิเคราะห์การรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพืชจากใยมะพร้าว

3.5.3.1 หาน้ำหนักที่ทำให้แผ่นลอยน้ำพุงพืชจมพอดีโดยนำแผ่นลอยน้ำไปวางที่ผิวน้ำแล้ววางดินน้ำมันที่มีน้ำหนักแตกต่างกันวางกระจายตัวให้เท่าๆ กัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ทดสอบการรับน้ำหนัก

3.5.3.2 บันทึกค่าน้ำหนัก (g) ที่แผ่นลอยน้ำพุงพืชจมพอดี

3.5.3.3 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.5.3.4 ทำข้อ 3.5.3.1 - 3.5.3.3 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอยน้ำพุงพืชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

3.5.4 วิเคราะห์พื้นผิว ช่องว่างระหว่างเส้นใย ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น WDW-20

3.5.4.1 นำชิ้นตัวอย่างแผ่นลอยน้ำพุงพืชวางบนแท่นตัวอย่างทองแดง

3.5.4.2 ฉาบชิ้นงานด้วยทองเพื่อให้ผิวชิ้นงานวิเคราะห์ด้วยอิเล็กตรอนจากการส่องกราดของเครื่อง

3.5.4.3 วิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นลอยน้ำพุงพืชที่เตรียมจากกาวประสานทั้ง 5 ชนิด เพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิว และช่องว่างระหว่างเส้นใย

3.5.4.4 บันทึกภาพ SEM ที่ได้ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า 100 เท่า และ 500 เท่า

นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะเส้นใยของแผ่นลอนน้ำพุงพีชโดยใช้เลนส์กล้อง มีขั้นตอนดังนี้  
 3.5.4.5 นำเลนส์กล้องกำลังขยาย 20 เท่า มาติดเข้ากับกล้องโทรศัพท์ปรับให้เหมาะสม ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เลนส์กำลังขยายจุฬาสมาร์ทเลนส์

3.5.4.6 ค่อยๆ ซึมเข้าใกล้แผ่นลอนน้ำพุงพีชของกาวชนิดที่ 1 จนภาพชัดเจนขึ้นโดยการถ่ายรูปผ่านเลนส์กล้องโทรศัพท์

3.5.4.7 บันทึกผลก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

3.5.4.8 ทำข้อ 3.5.4.4 - 3.5.4.7 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

3.5.5 วิเคราะห์การรับแรงกดของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น WDW-20

3.5.5.1 นำชิ้นตัวอย่างแผ่นลอนน้ำพุงพีชใส่ในเครื่องทดสอบโดยให้หัวจับสัมผัสกับชุดทดสอบ

3.5.5.2 ให้นำหนักกดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเกิดการแตกหัก

3.5.5.3 บันทึกค่า Max force (kN) และ Displacement (mm)

3.5.5.4 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.5.5.5 ทำข้อ 3.5.5.1 - 3.5.5.4 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

3.5.6 นำค่า Max force และ Displacement ไปคำนวณหา (Vicker hardness test; HV) จากสมการที่ 3.3

$$HV = \frac{1.854P}{D^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ

P = แรงหรือน้ำหนักกด (Max force ; kN)

D = ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด (Displacement; mm)



### 3.6 การศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

ศึกษาผลของชนิดกาวประสานของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว โดยศึกษาระยะเวลา 2 เดือน

3.6.1 นำชิ้นงานแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวไปแช่น้ำปริมาณ 7,500 ml ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผ่นลอนน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวแช่น้ำ

3.6.2 สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่แช่น้ำ และเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงกับแผ่นที่ไม่แช่น้ำ

3.6.3 บันทึกผลการย่อยสลายทางชีวภาพ (วันเว้นวัน) ถ่ายรูปลักษณะการเปลี่ยนแปลง และอัตราการเกิดเชื้อราเป็นเวลา 2 เดือน

3.6.4 ทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.6.5 ทำข้อ 3.6.1 - 3.6.4 ซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากกาวประสานชนิดต่างๆ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และวิจารณ์ผล

บทนี้เป็นการรายงานผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองตามที่ระบุไว้ในจุดประสงค์ของโครงการ ได้แก่ (1) เพื่อศึกษาผลของชนิดของตัวประสาน ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง ในการเตรียมแผ่นลายนํ้าตอสมบัติเชิงกลของแผ่นลายนํ้าพุงพีชจากไยมะพร้าว (2) เพื่อศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลายนํ้าพุงพีช ตอสมบัติเชิงกล และ (3) เพื่อศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลายนํ้าพุงพีช

#### 4.1 ผลการศึกษาชนิดของกาวประสานตอสมบัติเชิงกลของแผ่นลายนํ้าพุงพีชจากไยมะพร้าว




การขึ้นรูปแผ่นลายนํ้าพุงพีชจากไยมะพร้าวโดยใช้กาวประสาน 5 ชนิด ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง จากนั้นปั่นผสมไยมะพร้าวกับกาวประสานโดยปริมาณไยมะพร้าว 30 g และกาวประสาน 30 g/นํ้า 200 g การคำนวณในภาคผนวก ก. นำไปเทลงบนถาดแม่แบบเพื่อให้ได้ขนาดที่มาตรฐานเท่ากันทุกแผ่นแล้วนำไปอบแห้งเป็นเวลา 15 min ที่อุณหภูมิ 120 °C เมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้วนำแผ่นไปอัดเพื่อให้แผ่นมีความเรียบมากขึ้น

##### 4.1.1 ผลของชนิดกาวประสานตอลักษณะเส้นใย และลักษณะของแผ่นลายนํ้าพุงพีช

จากการเตรียมแผ่นลายนํ้าพุงพีชโดยใช้กาวน้ำใส เนื้อจะเป็นสีใส ซึ่งสามารถสังเกตเห็นว่าขณะเนื้อเปียกจะมีรูพรุนระหว่างเส้นใยมาก มีการยึดเกาะน้อยทำให้แผ่นมีความอ่อนตัว ในทางตรงกันข้ามเมื่อเนื้อแห้งหลังการอบจะมีรูพรุนน้อยมีการยึดเกาะมากขึ้นทำให้แผ่นมีความแข็งตัว ส่วนกาวลาเท็กซ์เนื้อจะเป็นสีขาว เหนียวข้น ขณะเนื้อเปียกจะมีรูพรุนไม่มาก เมื่อเนื้อแห้งรูพรุนน้อยลง เกิดการยึดเกาะติดกันมากขึ้น และเนื้อที่ผ่านการอัดจะสังเกตเห็นว่าในแต่ละจุดจะมีสีเข้มอ่อนแตกต่างกันไป กาวยางบงมีลักษณะเนื้อเปียก และแฉะมาก มีความหนืดมาก เมื่อเนื้อแห้งแล้วเกิดการยึดเกาะกันได้อย่างดี แผ่นมีความแข็งมาก ส่วนกาวยางพารามีลักษณะเนื้อขณะเปียกจะสังเกตเห็นว่ามีรูพรุนค่อนข้างมาก เมื่อเนื้อเริ่มแห้งรูพรุนลดลง แผ่นมีความแข็งแรง และกาวผงมีลักษณะรูพรุนมาก เมื่อเนื้อแห้งแล้วรูพรุนลดลงเพียงนิดเดียว สังเกตเห็นได้ว่าลักษณะเนื้อที่ผ่านการอัดแล้วจะเห็นรูพรุนตามจุดต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ดังตารางที่ 4.1

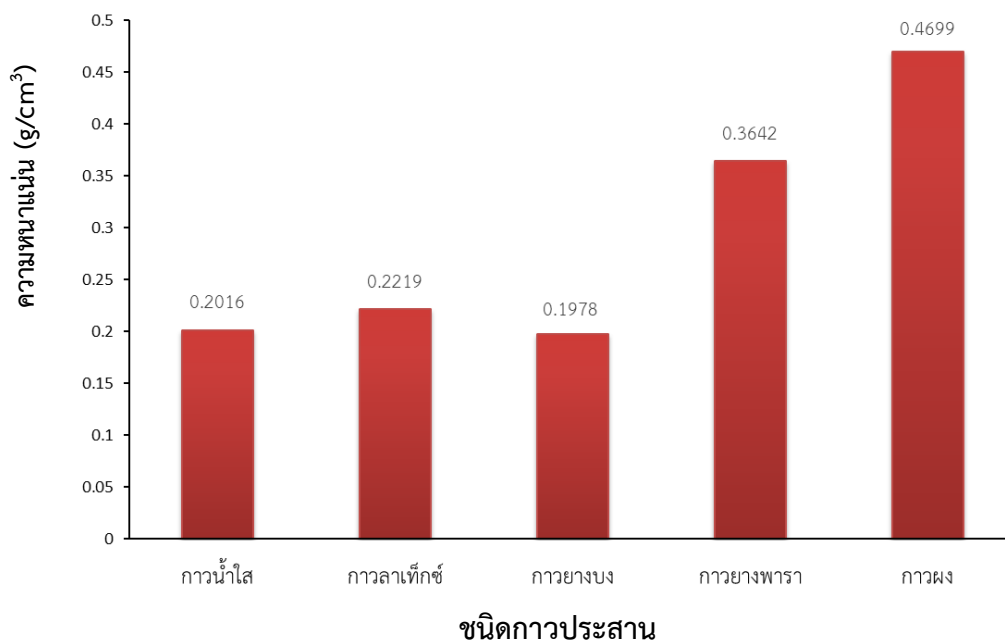
เนื่องจากแผ่นลายนํ้าพุงพีชจากไยมะพร้าวเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยไม่ต่อเนื่อง และไม่เป็นระเบียบ โดยเส้นใยในวัสดุคอมโพสิตไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้สมบูรณ์ ดังนั้นสมบัติในแต่ละจุดอาจมีความแตกต่างกันทำให้สังเกตเห็นลักษณะในบางจุดที่อาจมีสีเข้ม และอ่อนตามจุดแตกต่างกันไป โดยกาวประสานจะเป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับเมทริกซ์ (Matrix) ของไยมะพร้าว ช่วยเพิ่มความแข็งแรงทำให้วัสดุเกิดการยึดติดกัน โดยจะยึดติดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติของชนิดกาวประสาน

ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดกาวประสานต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นลอยน้ำพยุ่งพีช

ชนิดกาว ประสาน	รูปภาพลักษณะ เนื้อที่เปียก	รูปภาพลักษณะ เนื้อที่แห้ง	รูปภาพลักษณะเนื้อ ที่ผ่านการอัดแล้ว
กาวน้ำใส			
กาวลาเท็กซ์			
กาวยางบง			
กาว ยางพารา			
กาวผง			

#### 4.1.2 ผลของชนิดกาวประสานต่อความหนาแน่นของแผ่นลอยน้ำพยุ่งพีช

การทดสอบความหนาแน่นรวมของแผ่นลอยน้ำพยุ่งพีชโดยใช้กาวประสาน 5 ชนิด ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง ขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดกว้าง 25.5 cm ยาว 17.3 cm หนา 0.4 cm ปริมาตรของแผ่นเท่ากับ  $178.5 \text{ cm}^3$  โดยความหนาแน่นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อปริมาตรจึงต้องพิจารณาตัวแปรทั้งสองควบคู่กัน โดยผลจากการทดลองการคำนวณความหนาแน่นรวม ดังตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข. ซึ่งแผ่นลอยน้ำพยุ่งพีชจากไยมะพร้าวที่มีความหนาแน่นรวมต่ำกว่าความหนาแน่นของน้ำ (ประมาณ  $1 \text{ g/cm}^3$ ) แสดงว่าแผ่นลอยน้ำพยุ่งพีชที่เตรียมจากกาวทุกชนิดสามารถลอยน้ำได้ทั้งนี้เนื่องจากไยมะพร้าวมีน้ำหนักเบาแต่มีปริมาตรระหว่างเส้นใยสูง

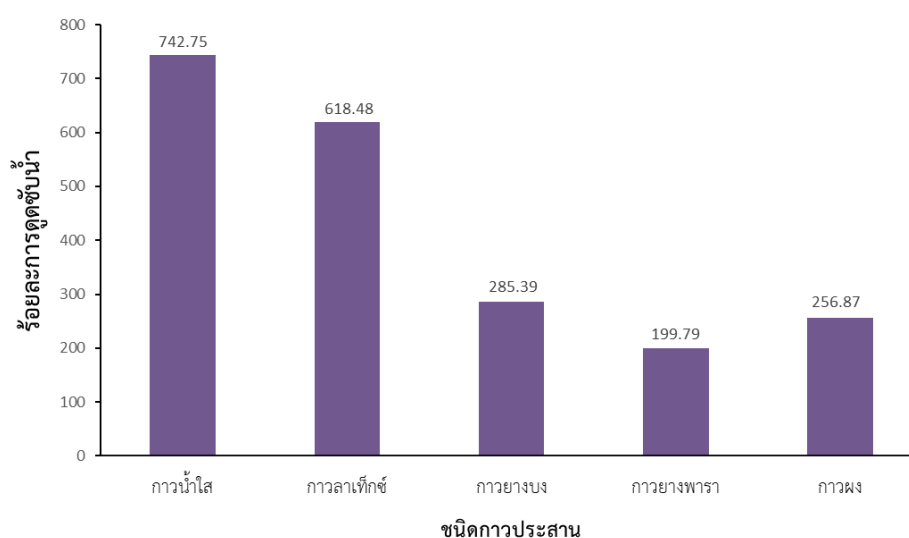


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและชนิดกาวประสาน

จากรูปที่ 4.1 พบว่ากาวยางพาราและกาวผงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการอัดแผ่นขึ้นรูป ทั้งนี้อาจเกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันของกาวประสานแต่ละชนิด

#### 4.1.3 ผลของชนิดกาวประสานต่อร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นลอนน้ำพุงพีช โดยแช่น้ำเป็นเวลา 23 ชั่วโมง จากผลร้อยละการดูดซับน้ำพบว่าแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด คือ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง ตามลำดับ ดังตารางที่ ข.3 หลังจากนำแผ่นลอนน้ำแช่ครบ 23 ชั่วโมง สีของน้ำมีความเข้มข้นมากขึ้นแสดงให้เห็นถึงการละลายของ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับน้ำและชนิดกาวประสาน

กาวบางส่วน ส่งผลให้เกิดการละลายของเส้นใย โดยรูปลักษณะก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำดังตารางที่ ข.4 ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำอยู่แล้วซึ่งสามารถดูดซับได้ประมาณ 200% ของตัวเส้นใยเองแต่จาก 200% ขึ้นไปอาจจะเป็นความสามารถของตัวกาวประสานที่เข้ามาช่วยในการดูดซับน้ำ เช่น กาวน้ำใสกับกาวลาเท็กซ์ ที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยที่มีค่าสภาพการละลายน้ำ (Solubility) ของกาวน้ำใส หรือ Polyvinyl alcohol มีค่าการละลายเท่ากับ 89 % [71] และกาวลาเท็กซ์หรือ Polyvinyl acetate, PVAc มีค่าการละลายเท่ากับ 67% [72] ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของกาวน้ำใสมีค่าสูงกว่าลาเท็กซ์ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูป 4.2 ในขณะที่กาวยางบง กาวยางพารา เป็นกาวธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างแบบสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังรูปที่ 2.54 ส่งผลให้การละลายน้ำของกาวมีค่าน้อย และกาวผงเป็นสารประเภทยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยส่งผลให้ค่าดูดซับน้ำต่ำเช่นกัน

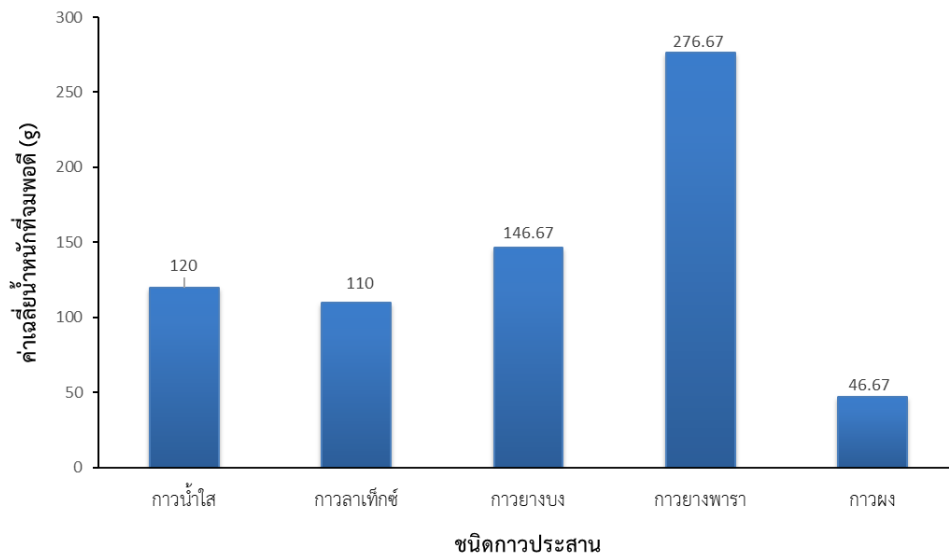
#### 4.1.4 ผลของชนิดกาวประสานต่อการรับน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

การทดสอบการรับน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำพุงพีชโดยใช้กาวประสานทั้ง 5 ชนิด นำแผ่นไปลอยในกะละมังใส่น้ำจากนั้นวางดินน้ำมัน 2 ขนาด คือ 10 g และ 50 g ลงบนแผ่นลอนน้ำพุงพีชจนแผ่นลอนน้ำจมพอดี เนื่องจากแรงลอยตัวของน้ำมากกว่าน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำ โดยผลการรับน้ำหนักของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวดังตารางที่ ข.7 ซึ่งแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวที่สามารถรับน้ำหนักได้มาก คือ กาวยางพารา กาวยางบง กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ และกาวผง ตามลำดับจากการทดลองจุดที่แผ่นลอนน้ำจมพอดีผิวน้ำ คือ แรงลอยตัวของน้ำสมดุลกับแรงของแผ่น เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของแผ่นเท่ากันจากสมการที่ 4.1

$$F_B = W = \rho_f \cdot gV \quad (4.1)$$

เมื่อ	$F_B$	= แรงลอยตัวของน้ำ
	$\rho_f$	= ความหนาแน่นของของไหล (น้ำ)
	$W$	= น้ำหนักของวัตถุ
	$g$	= ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	$V$	= ปริมาตรของไหลที่ถูกแทนที่

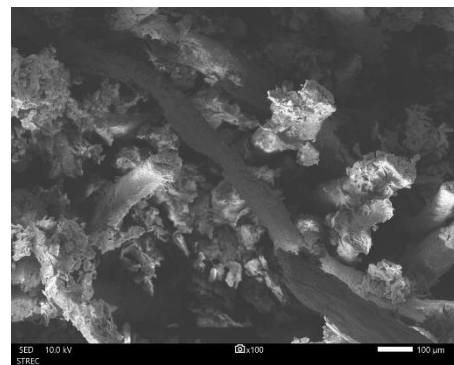
แสดงว่าการรับแรงของแผ่นลอนน้ำเพื่อเอาชนะแรงลอยตัวจึงเป็นผลมาจากโครงสร้างของแผ่นลอนน้ำ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดีกับชนิดกาวประสาน ดังรูปที่ 4.3 พบว่าโครงสร้างของกาวยางพาราสามารถรับแรงได้ดีมากที่สุดทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบผิวของเส้นใยของกาวยางพาราช่วยเสริมแรงให้กับเส้นใย เนื่องจากกาวประสานเป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) เพื่อทำให้เส้นใยมะพร้าว (matrix) ประสานยึดติดเข้าด้วยกัน เพื่อให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง ดังรูป SEM ที่ 4.4 (ก) ลักษณะเส้นใยถูกเคลือบด้วยกาวยางพาราทำให้เส้นใยอยู่ชิดติดกันเพิ่มความแข็งแรง ในขณะที่เมื่อใช้กาวผงซึ่งรับน้ำหนักได้น้อยที่สุดพบว่ากาวผงแยกเป็นกลุ่มก้อนออกจากเส้นใยมะพร้าวส่งผลให้โครงสร้างรับแรงได้น้อย ดังรูป SEM ที่ 4.4 (ข)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดิและชนิดกาวประสาน



(ก) กาวยางพารา

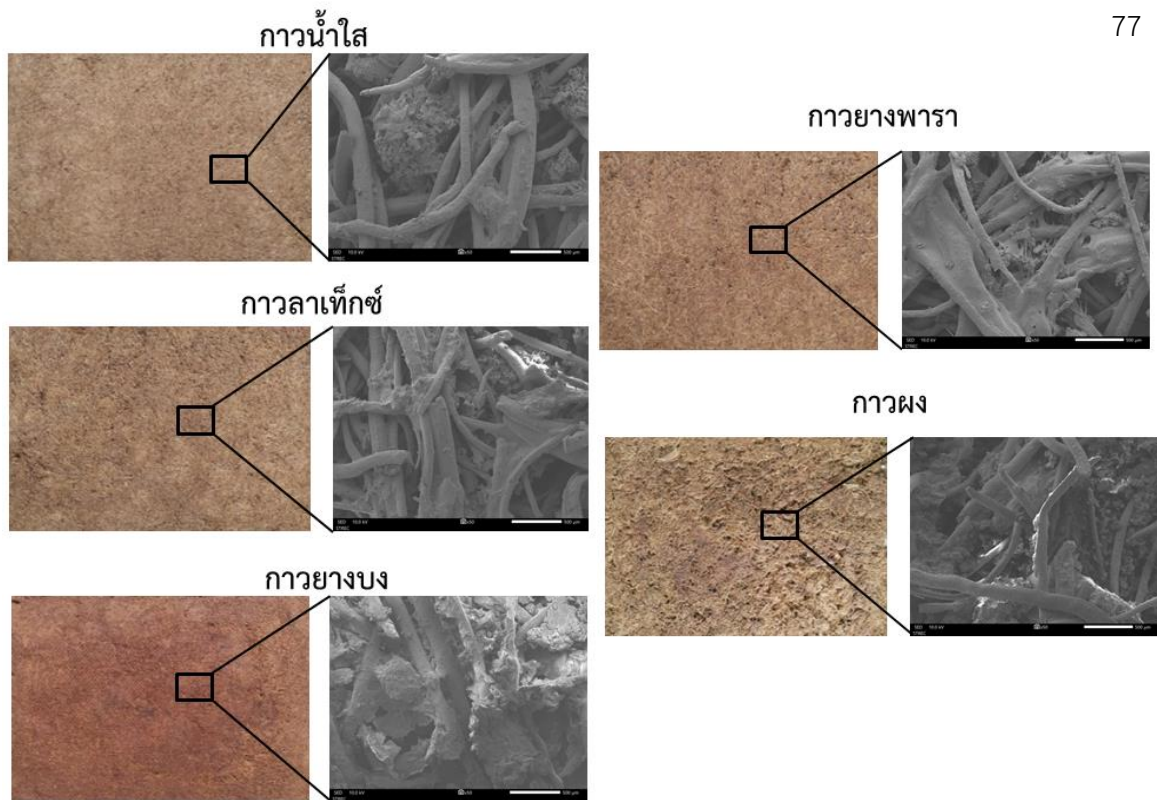


(ข) กาวผง

รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของแผ่นลอยน้ำพุงพีชเมื่อใช้กาวประสาน (ก) กาวยางพารา (ข) กาวผง

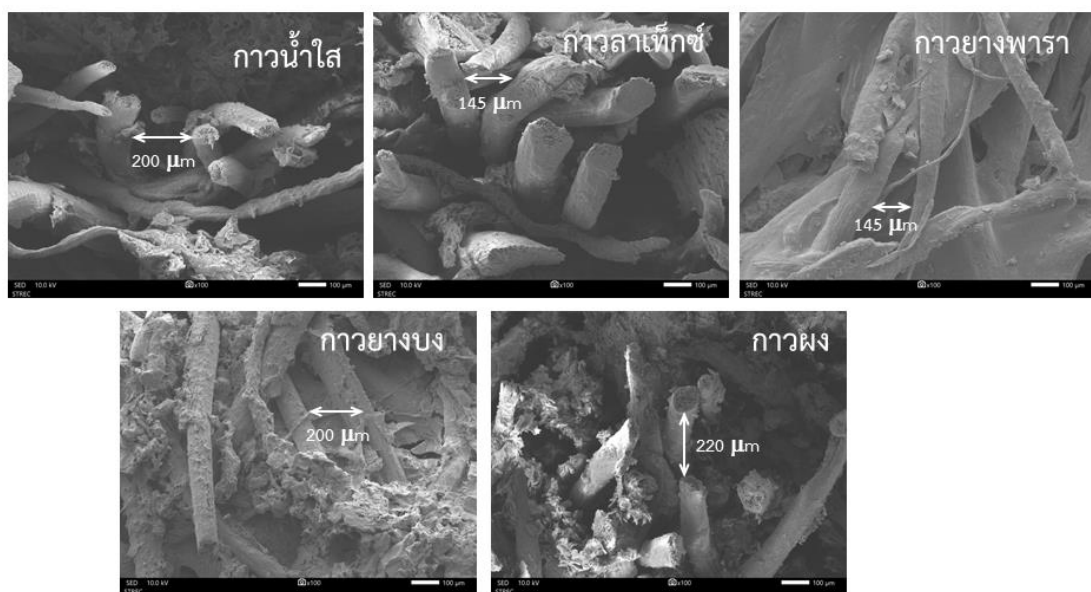
#### 4.1.5 ผลของชนิดกาวประสานต่อพื้นผิว ช่องว่างเส้นใยของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาชนิดของกาวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นคอมโพสิตจากเส้นใยมะพร้าว ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.5 เป็นลักษณะของแผ่นคอมโพสิตหลังการอัดด้วยความร้อนพร้อมภาพ SEM เพื่อดูลักษณะเส้นใยและการกระจายตัวของกาวที่เส้นใย รวมถึงการเกาะตัวกันระหว่างกาวประสานกับเส้นใย จากรูปสังเกตได้ว่ากาวรวมตัวจับกันเป็นก้อนอยู่ระหว่างเส้นใย หรือบนเส้นใย โดยเฉพาะกาวผง กาวยางบงที่เห็นลักษณะของอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อนชัดเจนทำให้ผิวของแผ่นคอมโพสิตมีลักษณะขรุขระ มีช่องว่างระหว่างเส้นใย ส่วนยางพารา และกาวลาเท็กซ์ ลักษณะกาวจะเคลือบบนเส้นใยและเชื่อมประสานเส้นใยได้ดี มีส่วนน้อยที่เกาะตัวรวมกัน ในขณะที่กาวน้ำใสเป็นการเกาะตัวของกาวได้ค่อนข้างชัดเจน



รูปที่ 4.5 แผ่นคอมโพสิตจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวประสานชนิดต่างกัน

การศึกษากลไกของชนิดกาวประสานต่อการลักษณะพื้นผิว ขนาดช่องว่าง ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) จากรูปที่ 4.5 พบว่ากาวประสานชนิดผง ได้แก่ กาวยางบง และกาวผง มีการรวมตัวของกาวเป็นกลุ่มก้อน และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยเกิดขึ้น ส่วนกาวที่เป็นของเหลวเส้นใยถูกเคลือบผิวและเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลง รูปที่ 4.6 แสดงการเทียบช่องว่างระหว่างเส้นใยพบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยมะพร้าวในแผ่นคอมโพสิตมีระยะระหว่าง 145 - 220 ไมโครเมตร ขึ้นกับกาวประสานในการเชื่อมระหว่างเส้นใย ซึ่งกาวลาเท็กซ์ และกาวยางพารามีช่องว่างน้อยและมีการเชื่อมช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ดี ซึ่งส่งผลต่อการรับน้ำหนักของแผ่นคอมโพสิต













รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวและช่องว่างระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับกาวประสานจากภาพ SEM

นอกจากนี้ผลการศึกษาลักษณะของเส้นใยของแผ่นลอนน้ำพุงพีชโดยใช้เลนส์กล้องที่มีกำลังขยาย 20 เท่า จุดตำแหน่งการถ่ายรูป ดังรูปที่ 4.7 โดยบันทึกผลก่อน และหลังการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 เพื่อดูลักษณะเส้นใยและการกระจายตัวของกาวประสาน จากภาพสังเกตเห็นกาวบางที่แผ่นลอนน้ำได้ชัดเจนกว่ากาวชนิดอื่นก่อนการทดสอบการย่อยสลาย และหลังทดสอบกาวบางหลุดออกจากผิวของเส้นใยอย่างชัดเจน หากพิจารณาลักษณะวัสดุคอมโพสิตของเส้นใยมะพร้าวกับกาวประสาน อาจจะสามารถกล่าวได้ว่าแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่เตรียมไว้เป็นแผ่นคอมโพสิตแบบ fiber composite ประเภท Discontinuous แบบ Randomly oriented





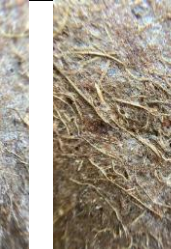












รูปที่ 4.7 จุดตำแหน่งการถ่ายรูปด้วยเลนส์กล้องกำลังขยาย 20 เท่า











ตารางที่ 4.2 ลักษณะเส้นใยของแผ่นลอนน้ำพุงพีชถ่ายด้วยเลนส์กำลังขยาย 20 เท่า ก่อนย่อยสลายทางชีวภาพ





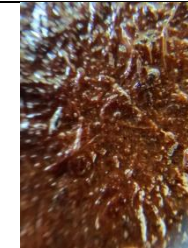










ชนิดกาว ประสาน	รูปลักษณะก่อนย่อยสลายทางชีวภาพ				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
กาวน้ำใส					
กาวลา เท็กซ์					



ชนิดกาว ประสาน	รูปลักษณะก่อนย่อยสลายทางชีวภาพ				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
กาวยาง บง					
กาว ยางพารา					
กาวผง					

ตารางที่ 4.3 ลักษณะเส้นใยของแผ่นลอน้ำพุงพีชถ่ายด้วยเลนส์กำลังขยาย 20 เท่า หลังย่อยสลายทางชีวภาพ

ชนิดกาว ประสาน	รูปลักษณะหลังย่อยสลายทางชีวภาพ				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
กาวน้ำใส					
กาวลา เท็กซ์					

ชนิดกาว ประสาน	รูปลักษณะหลังย่อยสลายทางชีวภาพ				
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
กาวยาง บง					
กาว ยางพารา					
กาวผง					

#### 4.1.6 ผลของชนิดกาวประสานต่อการรับแรงกดและระยะการคืนรูปของแผ่นลอยน้ำพองพืชจากไยมะพร้าว ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

ในการทดสอบการรับน้ำหนักโดยใช้กาวชนิดละ 1 แผ่น ขนาด 1/12 ส่วน ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) Model WDW - 20 โดยวัดค่าแรงกดที่สามารถทนได้แรงสูงสุดพบว่าแผ่นลอยน้ำพองพืชที่มีค่าแรงกดที่สามารถทนได้แรงสูงสุดมาก ดังแสดงดังตารางที่ 4.4 และเมื่อแผ่นลอยน้ำได้รับแรงแล้วมีการเปลี่ยนรูป เกิดรอยบวมหรือมีค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดระยะทางการกระจัดที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปถาวรก็แสดงว่าวัสดุมีความเครียดสูง ผลการวัดค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดดังตารางที่ 4.5 การศึกษาผลของชนิดกาวประสานต่อการทดสอบแรงกด (Max Force) และระยะรอยกด (Displacement) พบว่า ค่าการรับน้ำหนักจะแตกต่างกันไปเนื่องจากความเค้น (Stress) ที่เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับวัสดุแล้วจะเกิดแรงภายในขึ้นที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อกับวัสดุแล้วส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ที่ต่อต้านการเปลี่ยนรูปหรือการแตกหัก โดยระยะรอยกดของแผ่นคอมโพสิตจากไยมะพร้าวเมื่อใช้กาวยางพาราพบว่าให้ค่าระยะรอยกดยาวน้อยที่สุดคือ 5 มิลลิเมตร แต่มีความสามารถในการรับแรงหรือความเค้นที่ 0.023 kN แสดงว่าแผ่นสามารถรับแรงได้มากแต่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปน้อย ซึ่งเป็นสมบัติทางกลที่แสดงความคงตัวของวัสดุได้อีกหนึ่งตัวแปร ในขณะที่แผ่นที่ใช้กาวน้ำใสรรับแรงกดได้น้อยและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีระยะกดสูงแสดงถึงความไม่แข็งแรงของโครงสร้าง

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่า Max force ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อกาวประสานแต่ละชนิด

ชนิดกาวประสาน	Max force (kN)			Mean	Sd
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
กาวน้ำใส	0.009	0.013	0.007	0.010	0.002
กาวลาเท็กซ์	0.021	0.046	0.018	0.036	0.017
กาวยางบง	0.042	0.044	0.047	0.044	0.002
กาวยางพารา	0.019	0.02	0.03	0.023	0.005
กาวผง	0.019	0.014	0.013	0.015	0.003

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่า Displacement ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชต่อกาวประสานแต่ละชนิด

ชนิดกาว	Displacement (mm)			Mean	sd
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
กาวน้ำใส	16.81	22.71	19.69	19.737	2.409
กาวลาเท็กซ์	11.54	8.41	4.83	9.320	3.001
กาวยางบง	11.74	12.54	15.6	13.293	1.663
กาวยางพารา	4.41	6.17	5.55	5.377	0.729
กาวผง	5.33	6.4	7.04	6.257	0.705

#### 4.1.7 ผลของชนิดกาวประสานต่อการค่า Vicker hardness test, HV ของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

การคำนวณค่า Vicker hardness test, HV คำนวณจากค่า Max force; P (kN) และ Displacement; D (mm) แทนค่าในสมการ (3.3) 
$$HV = \frac{1.854P}{D^2}$$
 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 การทดลองนี้ใช้เครื่องมือทดสอบแทนการทดสอบความร่วนของแผ่นคอมโพสิต เนื่องจากสามารถแสดงค่าความแข็งแรงและระยะรอยกดเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนรูปเมื่อแผ่นได้รับแรงกระทำและเมื่อนำมาคำนวณหาความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ โดยกาวที่มีความแข็งแรงมากที่สุด คือ กาวยางพารา กาวลาเท็กซ์ กาวผง กาวยางบง กาวน้ำใส ดังตาราง 4.6 ดังนั้นลักษณะแผ่นลอนน้ำพุงพีชที่เหมาะสมควรทนแรงกดได้มากในขณะที่เปลี่ยนรูปได้น้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าถึงแม้กาวยางบงจะมีค่าแรงกดที่สามารถทนได้แรงสูงสุดมาก แต่ก็มีค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดที่มากเช่นกัน แต่ในทางตรงกันข้ามกาวยางพารามีค่าแรงกดที่สามารถทนได้แรงสูงสุดมาก และมีค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดน้อย โดยเมื่อแผ่นมีโครงสร้างที่แข็งแรงก็สามารถรับน้ำหนักได้มากเช่นกัน ดังนั้นแผ่นลอนน้ำที่รับแรง และการเปลี่ยนรูปร่างได้มากจะแสดงถึงความไม่แข็งแรงของแผ่นลอนน้ำนั้น จากผลการทดลองพบว่า กาวน้ำใส กาวยางบง กาวผง และกาวลาเท็กซ์ มีค่าแรงกดที่สามารถทนแรงสูงสุดน้อย และค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดระยะทางกระจัดมาก ทำให้เมื่อได้รับแรงเพียงเล็กน้อยก็เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแล้ว ส่วนกาวยางพารามีค่าแรงกดที่สามารถทนได้แรงสูงสุดมาก และค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการรับน้ำหนักของกาวยางพาราที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.4 ซึ่งสรุป

ได้ว่าแผ่นคอมโพสิตไยมะพร้าวที่ใช้กาวยางพาราเป็นตัวประสานมีค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ  $147.49 \times 10^{-5} \text{ kN/mm}^2$

ตารางที่ 4.6 การคำนวณความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอน้ำพุงพืชที่ใช้กาวแต่ละชนิด

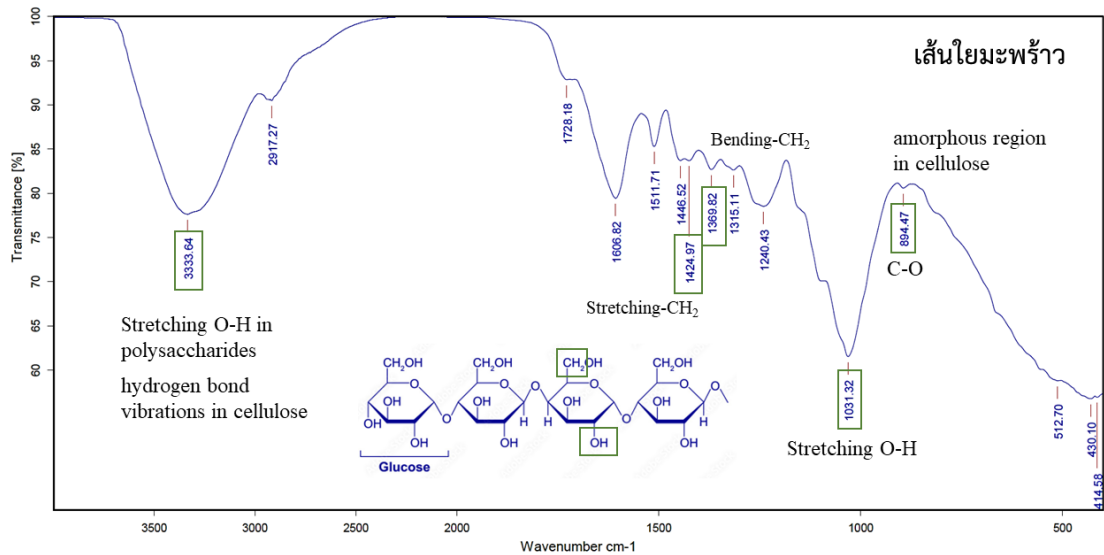
ชนิดกาว	ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ( $\text{kN/mm}^2$ )( $\times 10^{-5}$ )
กาวน้ำใส	4.75
กาวลาเท็กซ์	76.84
กาวยางบง	46.17
กาวยางพารา	147.49
กาวผง	71.03

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของแผ่นลอน้ำพุงพืชจากไยมะพร้าวด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นลอน้ำพุงพืชจากไยมะพร้าว โดยใช้ชนิดกาวประสาน ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง โดยวิเคราะห์ความหนาแน่น การรับน้ำหนัก การดูดซับน้ำ การรับแรงกด และรูปลักษณะเส้นใย ซึ่งความหนาแน่นกาวประสานทุกตัวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำทั้งหมด การรับน้ำหนักเห็นได้ชัดเจนว่ากาวยางพาราสามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด ในขณะที่แผ่นจมนพอดิ กาวผงสามารถดูดซับน้ำได้น้อยที่สุด การรับแรงกดแผ่นกาวยางพาราสามารถรับแรงกดได้มากในขณะที่เกิดการเปลี่ยนรูปไปได้น้อย และรูปลักษณะเส้นใยสังเกตจากภาพ SEM เนื้อกาวประสานสามารถกระจายตัวได้ดี

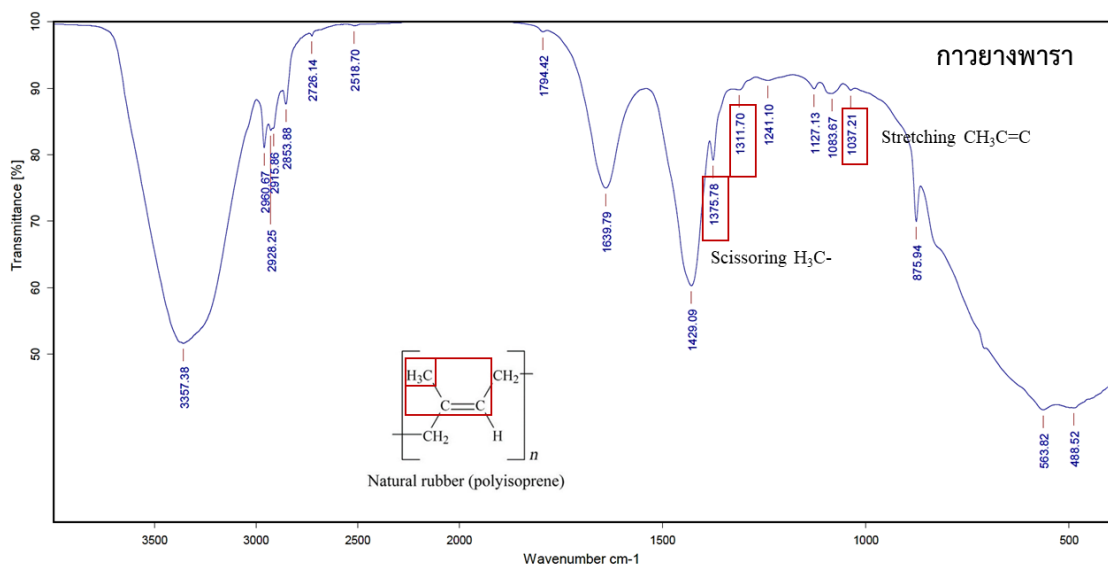
ดังนั้นแผ่นลอน้ำพุงพืชจากไยมะพร้าวที่ประสานกันด้วยกาวยางพาราจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมมากที่สุดที่จะช่วยพุงพืชในการนำมาบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากแผ่นมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำสามารถลอน้ำได้ แผ่นสามารถรับน้ำหนักได้มาก แผ่นมีการดูดซับน้ำได้น้อย แผ่นสามารถรับแรงกดมากโดยมีค่าแรงกดที่สามารถทนแรงได้สูงที่สุดมาก ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกตระยะทางการกระจัดน้อย และมีรูปลักษณะเส้นใยของกาวประสานเนื้อกาวมีการกระจายตัวที่ดี

การศึกษาสมบัติทางเคมีหรือองค์ประกอบทางเคมีของกาวประสานกับแผ่นลอน้ำพุงพืช รวมถึงเส้นใยมะพร้าว เพื่อพิจารณารูปแบบการเกิดคอมพอสิตระหว่างเส้นใยและกาวประสานว่าเป็นในรูปแบบการประสานเชิงกายภาพ หรือเกิดพันธะเคมีระหว่างกาวและไยมะพร้าว หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบของแผ่นลอน้ำพุงพืชหลังจากการเตรียมแผ่นลอน้ำพุงพืช ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของไยมะพร้าวแสดงดังรูปที่ 4.8 พบ absorption bands broad peak ที่ wave number  $3333 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง stretching vibration ของ hydroxyl group (OH-) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส (cellulose) และ absorption bands ที่  $1425, 1367, 1031$  และ  $894 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงพันธะ stretching  $-\text{CH}_2$ , Bending  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}$  และ  $\text{C}-\text{O}$  ใน cellulose [73] นอกจากนี้ที่ wave number  $897 \text{ cm}^{-1}$  ยังแสดงถึงส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของเซลลูโลส



รูปที่ 4.8 FTIR spectra ของเส้นใยมะพร้าว

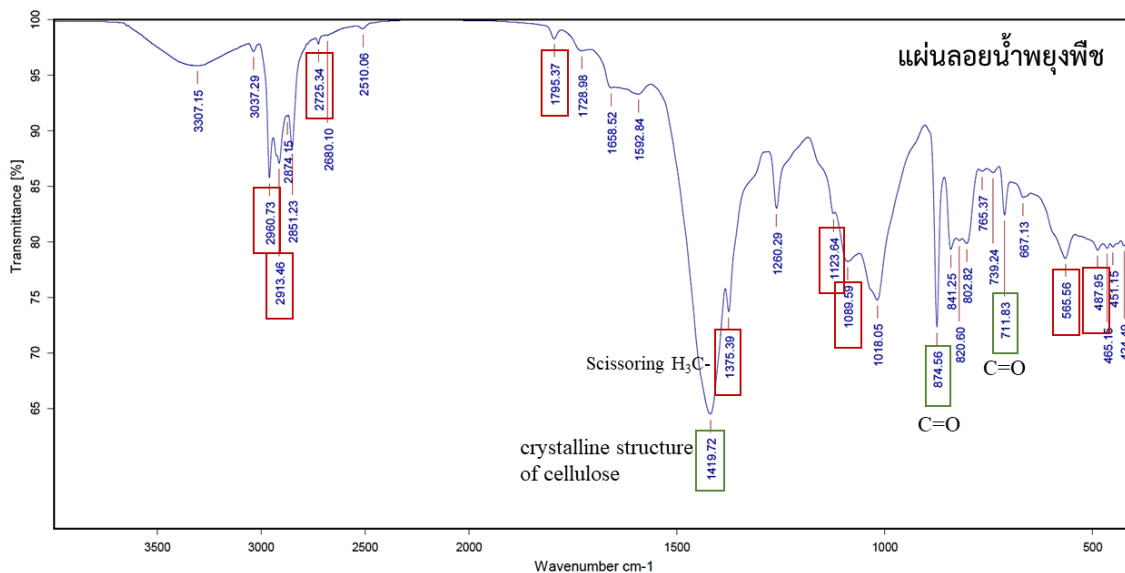
ส่วนกาวยางพาราซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ และมี polyisoprene เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง [74] ของ FTIR พบ absorption band ที่ wave number 1375, 1311  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงพันธะ  $\text{H}_3\text{C}-$  ที่มีการสั่นแบบ Scissoring และที่ 1037  $\text{cm}^{-1}$  ของพันธะ  $\text{CH}_3\text{C}=\text{C}$  ที่มีการสั่นแบบ Stretching ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 FTIR spectra ของกาวยางพารา

ผลการวิเคราะห์ FTIR Spectra ของแผ่นลอยน้ำพุงที่ชงจากใยมะพร้าวที่เตรียมได้ พบพีคที่ 874 และ 711  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงพันธะ  $\text{C}=\text{O}$  ในเซลล์ูโลส และพบพีคใหม่ที่ 1419  $\text{cm}^{-1}$  ที่แสดงความเป็นผลึกของเซลล์ูโลส นอกจากนี้เมื่อเทียบ FTIR spectra ของกาวยางพารา กับแผ่นลอยน้ำพบการขยับ

ของพีคเล็กน้อยที่ wave number 2960, 2913, 2725, 1795, 1375 (Scissoring  $H_3C$ -), 1123, 1089, 565 และ  $488\text{ cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 4.10 จากการเปรียบเทียบดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่ากายภาพของแผ่นลายน้ำพุงพีชยังคงประกอบทางเคมีเช่นเดิมและทำหน้าที่ประสานระหว่างเส้นใยมะพร้าว



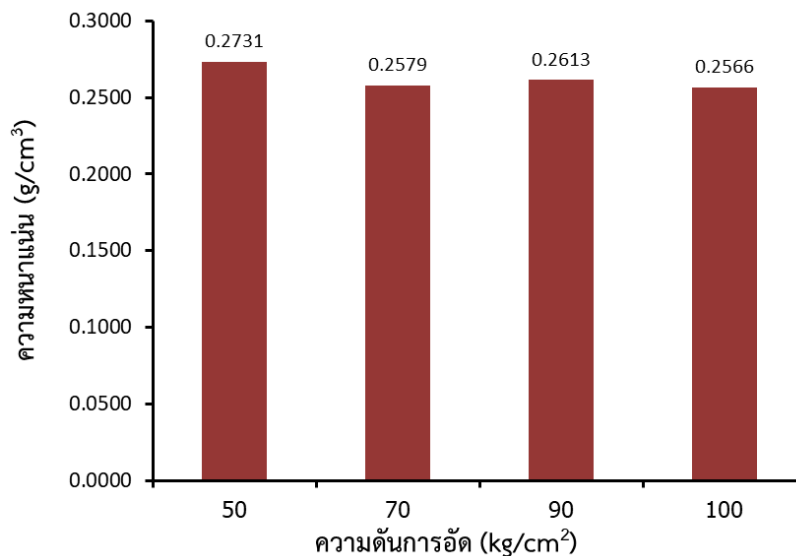
รูปที่ 4.10 FTIR spectra ของแผ่นลายน้ำพุงพีช

### 4.3 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลายน้ำจากใยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลายน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นลายน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวที่ประสานกันด้วยกายภาพพาราโมคูลสมบัตินี้เหมาะสำหรับการใช้พุงพีชเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยใช้กายภาพพาราเป็นกาวประสานโดยเพิ่มความดันการอัดจาก  $50\text{ kg/cm}^2$  เป็น  $70$   $90$  และ  $100\text{ kg/cm}^2$  ที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $90$  วินาทีในแต่ละด้าน ซึ่งลักษณะแผ่นเรียบหลังการอัดนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ซึ่งได้ผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 4.3.1 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นต่อความหนาแน่นของแผ่นลายน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

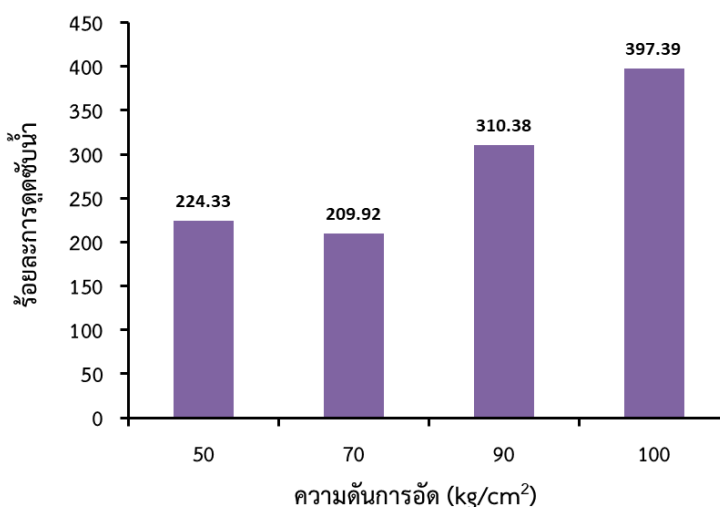
การทดสอบความหนาแน่นรวมของแผ่นลายน้ำพุงพีชโดยใช้กายภาพพารา ที่ความดันในการอัดแผ่น  $50$ - $100\text{ kg/cm}^2$  ผลการทดลองค่าความหนาแน่นแสดงดังตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข. พบว่าความหนาแน่นรวมของแผ่นลายน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.25$ - $0.27\text{ g/cm}^3$  แสดงว่าแผ่นลายน้ำพุงพีชสามารถลายน้ำได้ทั้งนี้เนื่องจากใยมะพร้าวมีน้ำหนักเบาแต่มีปริมาตรระหว่างเส้นใยสูง เมื่อนำผลจากตารางที่ ข.2 มาสร้างกราฟแท่งจะดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการอัดแผ่นความหนาแน่นมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและความดันการอัดแผ่น

#### 4.3.2 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นต่อร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

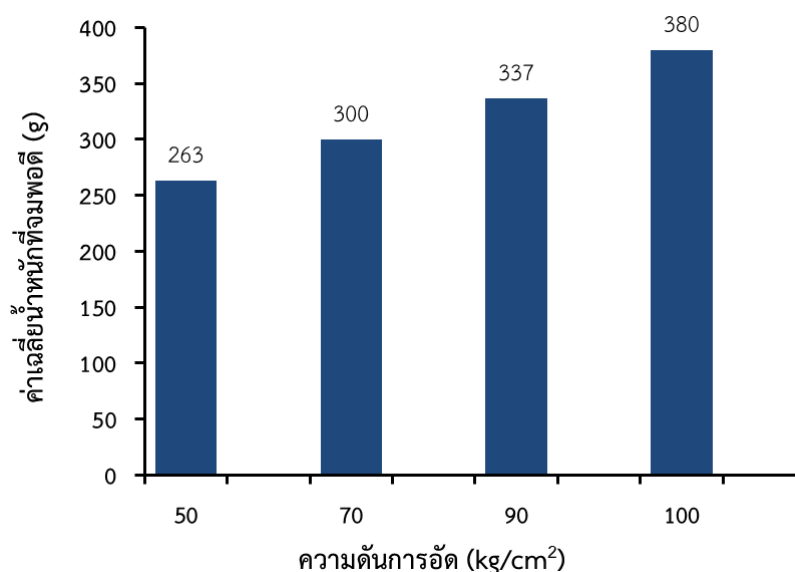
จากผลการทดลองในการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเกิดจากตัวเส้นใยมะพร้าวและช่องว่างระหว่างเส้นใย และความสามารถในการละลายน้ำของกาวประสานซึ่งกาวยางพาราให้ผลการดูดซับน้ำน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นกาวธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างแบบสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของความการอัดแผ่นที่ความดัน 50 70 90 และ 100 kg/cm<sup>2</sup> ผลการทดสอบการคำนวณ และลักษณะการแช่น้ำของแผ่นลอยน้ำแสดงในตารางที่ ข.5-ข.6 และนำผลการคำนวณมาแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.12 พบว่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันในการอัดแผ่นสูงขึ้นที่ 90 - 100 kg/cm<sup>2</sup> ในการเพิ่มความดันในการอัดไม่ส่งผลต่อการลดช่องว่างระหว่างเส้นใย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาตรของแผ่นสูงขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นความดันในช่วง 50 - 70 kg/cm<sup>2</sup> เป็นช่วงความดันที่เพียงพอในการเตรียมแผ่นลอยน้ำพุงพีช



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับน้ำและความดันการอัดแผ่น

### 4.3.3 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นต่อการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว

จากการทดสอบการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำที่ทำให้แผ่นลอยน้ำจมอยู่ที่ผิวน้ำพอดินั้น ปัจจัยที่มีผลในการรับน้ำหนักคือโครงสร้างของการเคลือบผิวของเส้นใยของกาวยางพาราช่วยเสริมแรงให้กับเส้นใย เนื่องจากกาวประสานเป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) เพื่อทำให้เส้นใยมะพร้าว (matrix) ประสานยึดติดเข้าด้วยกัน เพื่อให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง จากการทดสอบเพื่อรับน้ำหนักที่ความดันต่างกัน ได้ผลการทดลองการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพีชที่ความดันในการอัดแผ่นในช่วง 50-100 kg/cm<sup>2</sup> แสดงในตารางที่ ข.8 (ภาคผนวก ข.) และนำค่าเฉลี่ยการรับน้ำหนักที่ได้มาแสดง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดีและความดันการอัดแผ่น

ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.13 พบว่าแผ่นลอยน้ำพุงพีชมีความสามารถในการรับน้ำหนักมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในการอัดแผ่น แสดงถึงผลความแข็งแรงของโครงสร้างระหว่างกาวประสานที่เป็นตัวเสริมแรงกับ matrix ของเส้นใยมะพร้าว การเพิ่มความดันอาจส่งผลต่อการยึดเกาะของโครงสร้างของกาวยางพาราบน matrix ของเส้นใยมะพร้าว ทั้งนี้ผลของความดันในการอัดแผ่นต่อโครงสร้างความแข็งแรงของแผ่นลอยน้ำพุงพีชสามารถศึกษาจากการรับแรงกด และความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ในหัวข้อต่อไป

### 4.3.4 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นต่อการรับแรงกดและระยะการคืนรูปของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

การทดสอบแรงกด (Max Force) และระยะรอยกด (Displacement) เป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่แสดงความแข็งแรงของโครงสร้างคอมโพสิตใยมะพร้าวและกาวประสาน ซึ่งค่าการรับน้ำหนักจะแตกต่างกันไปเนื่องจากความเค้น (Stress) ที่เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับวัตถุแล้วจะเกิดแรงภายในขึ้นที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อกับวัตถุแล้วส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ที่ต่อต้านการเปลี่ยนรูปหรือการแตกหัก จากผลการทดลองโดยใช้กาวยางพาราเป็นตัวเสริมแรงให้ผลในการรับแรงสูงสุด แต่มีระยะรอยกดน้อยที่สุด แสดงว่าแผ่นสามารถรับแรงได้มากแต่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปน้อยในการทดลองในหัวข้อนี้เมื่อใช้กาวยางพาราเป็นกาวประสานแต่เปลี่ยนความดันในการอัดแผ่นในช่วง



50-100 kg/cm<sup>2</sup> ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าผลการรับแรงกดสอดคล้องกับผลการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำ กล่าวคือแผ่นลอยน้ำสามารถรับแรงกดได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน ซึ่งสนับสนุนสมมุติฐานที่ความดันในการอัดแผ่นเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างระหว่างกาวยางพาราและ matrix โยมะพร้าว

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่า Max force ของแผ่นลอยน้ำพยางพาราต่อความดันในการอัดแผ่น

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	Max force (kN)			Mean	Sd
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
50	0.05	0.05	0.03	0.045	0.010
70	0.05	0.06	0.04	0.051	0.007
90	0.07	0.06	0.08	0.070	0.007
100	0.07	0.08	0.08	0.077	0.005

ส่วนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีระยะกด (Displacement) แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างได้เช่นกันกล่าวคือหากวัสดุได้รับแรงกดและมีระยะการเปลี่ยนรูปร่างน้อยแสดงว่ามีโครงสร้างคงตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างจากผลการวิเคราะห์แผ่นลอยน้ำพยางพาราที่ความดันในการอัดแผ่นค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.8 พบว่าแผ่นลอยน้ำมีระยะการเปลี่ยนรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความดันในการอัดแผ่น แสดงถึงความคงตัวของกาวยางพาราในโครงสร้างของแผ่นลอยน้ำพยางพารา

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่า Displacement ของแผ่นลอยน้ำพยางพาราต่อความดันในการอัดแผ่น

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	Displacement (mm)			Mean	sd
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
50	5.021	5.507	5.632	5.387	0.264
70	5.208	5.523	5.301	5.344	0.132
90	5.113	5.892	4.978	5.328	0.403
100	5.879	5.663	5.351	5.631	0.217

#### 4.3.5 ผลการศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นต่อการค่า Vicker hardness test, HV ของแผ่นลอยน้ำพยางพาราจากโยมะพร้าว

การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ (Vicker hardness; HV) เป็นการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max force (kN) และค่า Displacement (mm) ดังสมการที่ 3.3 จากผลการทดลองเมื่อใช้กาวยางพาราที่ความดันในการอัดแผ่นต่างกัน ดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันในการอัดแผ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการรับน้ำหนัก และค่า Max force สามารถสรุปได้ว่าความดันในการอัดแผ่นเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างคอมโพสิตโยมะพร้าวที่มีกาวยางพาราเป็นตัวเสริมแรง โดยให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ความดันในการอัด 100 kg/cm<sup>2</sup> เท่ากับ  $271.25 \times 10^{-5}$  kN/mm<sup>2</sup>

ตารางที่ 4.9 การคำนวณความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอยน้ำพองพีชที่ความดันการอัดต่างๆ

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ (kN/mm <sup>2</sup> )(×10 <sup>-5</sup> )
50	141.92
70	175.74
90	245.11
100	271.25

จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าว โดยใช้ความดันในการอัดแผ่นในช่วง 50-100 kg/cm<sup>2</sup> โดยวิเคราะห์ความหนาแน่น การรับน้ำหนัก การดูดซับน้ำ การรับแรงกด และความแข็งแรง HV โดยสรุปความดันในการอัดแผ่นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และระยะการเปลี่ยนรูป (Displacement) แต่ส่งผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำ ค่าการรับน้ำหนัก ค่า Max force และ ความแข็งแรง HV กล่าวคือค่าดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเพิ่มขึ้น













#### 4.4 ผลการศึกษาชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าว และการเกิดเชื้อรา เป็นระยะเวลา 2 เดือน

ผลของชนิดกาวประสานต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าว ศึกษาระยะเวลา 2 สัปดาห์ 1 เดือน และ 2 เดือน แช่น้ำปริมาตร 7,500 ml สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงเพื่อดูการย่อยสลายของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าวตามธรรมชาติที่แช่น้ำ (วันเว้นวัน) และระดับความยุบจากผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก ค. ซึ่งสมบัติการละลายน้ำของชนิดกาวที่มีผลต่อการแพร่ผ่านของน้ำซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดความชื้นซึ่งเหมาะกับการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เป็นตัวย่อยสลายแผ่นลอยน้ำพองพีชผลการศึกษาพบผลการย่อยสลายตามชนิดกาวประสานแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.4.1 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้กาวน้ำใส

กาวน้ำใสสมบัติการละลายน้ำที่ดี และมีลักษณะความหนืดน้อยกว่ากาวลาเท็กซ์ จึงทำให้ละลายน้ำได้ดีกว่ากาวชนิดอื่นเส้นใยสลายตัวมีรูพรุนมาก ทำให้น้ำแพร่ผ่านได้ง่ายมีผลต่ออัตราการเกิดเชื้อรา ส่งผลให้เกิดเชื้อราดังตารางที่ 4.10










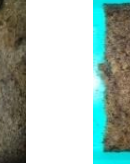

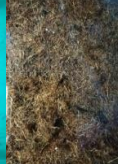












ตารางที่ 4.10 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวน้ำใส

ระยะเวลา	รูปลักษณะแผ่น		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
ก่อนแช่			
หลังแช่ 2 สัปดาห์	 แผ่นจมนลงก้นอ่าง	 แผ่นจมนลงก้นอ่าง	 แผ่นจมนลงก้นอ่าง มีการกระจาย ตัวของใย
หลังแช่ 1 เดือน	 มีความยุบมากขึ้น จนเส้นใยขาด	 มีความยุบมากขึ้น จนเส้นใยขาด	 มีความยุบและเส้นใยขาดออก จากกันมาก
หลังแช่ 2 เดือน	 แผ่นยุบมากขึ้น และ สังเกตเห็นเชื้อราสีขาวที่ บริเวณเส้นใยเมื่อใช้เลนส์ กล้องกำลังขยาย 20X	 แผ่นยุบมากขึ้น และ สังเกตเห็นเชื้อราสีขาวที่ บริเวณเส้นใยเมื่อใช้เลนส์ กล้องกำลังขยาย 20X	 แผ่นยุบมากขึ้น และสังเกตเห็น เชื้อราสีขาวที่บริเวณเส้นใยเมื่อใช้ เลนส์กล้องกำลังขยาย 20X

#### 4.4.2 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้ กาวลาเท็กซ์

กาวลาเท็กซ์ มีสมบัติการละลายน้ำที่ดี แต่มีลักษณะหนืดกว่ากาวน้ำใสส่งผลต่อการ เจริญเติบโตของเชื้อรา ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลาย การเกิดเชื้อราของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าว ลักษณะการย่อยสลายแสดงดังตารางที่ 4.11









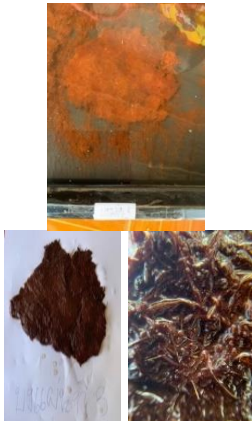
ตารางที่ 4.11 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้กาวลาเท็กซ์

ระยะเวลา	รูปลักษณะแผ่น					
	แผ่นที่ 1		แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 3	
ก่อนแช่						
หลังแช่ 2 สัปดาห์						
	แผ่นจมลงก้นอ่าง		แผ่นจมลงก้นอ่าง มีความยุบ โย แตกออก		แผ่นจมลงก้นอ่าง	
หลังแช่ 1 เดือน						
	แผ่นยุบมากขึ้น		แผ่นยุบมากและหลุดออกจากกัน		แผ่นยุบมากขึ้น	
หลังแช่ 2 เดือน						
	แผ่นหลุดล่อนจนเหลือแผ่นเล็ก และสังเกตเห็นเชื้อราสีขาวที่ บริเวณเส้นใยเมื่อใช้เลนส์กล้อง กำลังขยาย 20X		แผ่นหลุดล่อนจนเหลือแผ่นเล็ก และสังเกตเห็นเชื้อราสีขาวที่ บริเวณเส้นใยเมื่อใช้เลนส์กล้อง กำลังขยาย 20X		แผ่นหลุดล่อนจนเหลือแผ่นเล็ก และ สังเกตเห็นเชื้อราสีขาวที่บริเวณ เส้นใยเมื่อใช้เลนส์กล้อง กำลังขยาย 20X	

**4.4.3 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้ กาวยางบง**

กาวยางบงเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ และเชื้อรา จากผลการย่อยสลายของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่ากาวยางบงหลุดออกจากไยมะพร้าวได้รวดเร็ว ทำให้แผ่นลอยน้ำจากกาวยางบงย่อยสลายได้รวดเร็วภายใน 21 วัน













**ตารางที่ 4.12** ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้กาวยางบง

ระยะเวลา	รูปลักษณะแผ่น		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
ก่อนแช่			
หลังแช่ 2 สัปดาห์	 แผ่นส่วนขอบแผ่นเริ่มยุ่ย น้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มในน้ำมี กาวบงลอยออกมา	 แผ่นส่วนขอบแผ่นเริ่มยุ่ย น้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มในน้ำมี กาวบงลอยออกมา	 แผ่นส่วนขอบแผ่นเริ่มยุ่ย น้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มในน้ำมี กาวบงลอยออกมา
หลังแช่ 3 สัปดาห์ (21 วัน)	 แผ่นย่อยสลายเป็นผงชิ้นเล็กๆ ต้องเปลี่ยนน้ำครั้งที่3 แต่สีของน้ำก็ยังเข้มมากเนื่องจากเนื้อกาวละลายสังเกตเห็นเชื้อรา	 แผ่นย่อยสลายเป็นผงชิ้นเล็กๆ ต้องเปลี่ยนน้ำครั้งที่3 แต่สีของน้ำก็ยังเข้มมากเนื่องจากเนื้อกาวละลายสังเกตเห็นเชื้อรา	 แผ่นย่อยสลายเป็นผงชิ้นเล็กๆ ต้องเปลี่ยนน้ำครั้งที่3 แต่สีของน้ำก็ยังเข้มมากเนื่องจากเนื้อกาวละลายสังเกตเห็นเชื้อรา

#### 4.4.4 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้ กาวยางพารา

กาวยางพารามีสมบัติไม่ละลายน้ำ เป็นกาวประสานกับเส้นใยมะพร้าวได้ดี ทำให้น้ำซึมผ่านแผ่นลอนน้ำได้น้อย ดึงผลการดูดซับน้ำของแผ่นกาวยางพารา ส่งผลให้การย่อยสลายของแผ่นลอนน้ำที่ใช้กาวยางพาราเป็นกาวประสานย่อยสลายได้ช้า และไม่เกิดเชื้อรา ผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 4.13








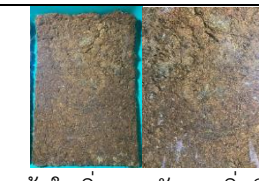




ตารางที่ 4.13 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวเมื่อใช้กาวยางพารา

ระยะเวลา	รูปลักษณะแผ่น		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
ก่อนแช่			
หลังแช่ 2 สัปดาห์	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น
หลังแช่ 1 เดือน	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป
หลังแช่ 2 เดือน	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป	 แผ่นมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แผ่นยังคงรูป

#### 4.4.5 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้ กาวผง

กาวผงไม่ค่อยละลายน้ำแต่จับตัวเป็นก้อน ดังรูป SEM ที่ 4.4 (ข) จึงทำให้เส้นใยสัมผัสกับน้ำได้ดี และจมภายใน 2 - 3 วัน เกิดการย่อยสลาย และเกิดเชื้อราดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวเมื่อใช้กาวผง

ระยะเวลา	รูปลักษณะแผ่น		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
ก่อนแช่			
หลังแช่ 2 สัปดาห์	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น	 แผ่นจมน้ำทั้งแผ่น
หลังแช่ 1 เดือน	 เส้นใยเริ่มแตกตัวและนิ่มขึ้น	 เส้นใยเริ่มแตกตัวและนิ่มขึ้น	 เส้นใยเริ่มแตกตัวและนิ่มขึ้น
หลังแช่ 2 เดือน	 แผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เกิดเชื้อรา สีขาวเมื่อใช้เลนส์กล้องกำลังขยาย 20X	 แผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เกิดเชื้อรา สีขาวเมื่อใช้เลนส์กล้องกำลังขยาย 20X	 แผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เกิดเชื้อรา สีขาวเมื่อใช้เลนส์กล้องกำลังขยาย 20X

ผลจากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว โดยใช้ชนิดกาวประสาน ได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง โดยวิเคราะห์การย่อยสลายระยะเวลา 2 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 4.10-4.14 สรุปได้ดังรูปที่ 13 สังเกตได้ชัดเจนว่าแผ่นที่ใช้กาวยางพารามีความคงรูปและไม่พบเชื้อราที่แผ่น โดยปกติเส้นใยมะพร้าวย่อยสลายได้ยากแต่การยึดเกาะของแผ่นคอมโพสิตขึ้นกับกาวประสานซึ่งความคงทนของกาวแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

และกาวบางชนิดละลายในน้ำและลอยขึ้นมาอยู่เหนือผิวน้ำ เช่น กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ โดยเฉพาะกาวยางบงที่ย่อยสลายเร็วอย่างชัดเจนในเวลา 21 วัน ส่วนกาวยางพาราให้ผลที่ดีมีความคงทนต่อการย่อยสลายในน้ำ



รูปที่ 4.14 ลักษณะแผ่นคอมโปสิตและเส้นใยมะพร้าวหลังการทดสอบย่อยสลายเป็นเวลา 2 เดือน

ดังนั้นแผ่นลอนน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าวที่ประสานกันด้วยกาวยางพาราจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมมากที่สุดที่จะช่วยพุงพีชในการนำมาบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากแผ่นมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำสามารถลอนน้ำได้ แผ่นสามารถรับน้ำหนักได้มาก แผ่นมีการดูดซับน้ำได้น้อย แผ่นสามารถรับแรงกดมากโดยมีค่าแรงกดที่สามารถทนแรงได้สูงที่สุดมาก ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกตระยะทางการกระจัดน้อย และมีรูปลักษณะเส้นใยของกาวประสานเนื้อกาวมีการกระจายตัวที่ดี และมีการย่อยสลายที่ช้าที่สุด



## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้สรุปผลการทดลองตามที่ระบุไว้ในจุดประสงค์ของโครงการ ได้แก่ (1) เพื่อศึกษาผลของชนิดของตัวประสานได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และ กาวผง ในการเตรียมแผ่นลอยน้ำต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว (2) เพื่อศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นลอยน้ำพุงพีช ต่อสมบัติเชิงกล และ (3) เพื่อศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีช

#### 5.1 สรุปผลการทำโครงการ

5.1.1 การศึกษาความหนาแน่นรวมของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าวโดยใช้กาวประสานทั้งห้าชนิดได้แก่ กาวน้ำใส กาวลาเท็กซ์ กาวยางบง กาวยางพารา และกาวผง พบว่าแผ่นลอยน้ำพุงพีชที่ใช้กาวประสานทุกชนิดมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ แผ่นจึงสามารถลอยน้ำได้เนื่องจากมีปริมาตรระหว่างเส้นใยสูง

5.1.2 การศึกษาการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับน้ำอยู่แล้ว แต่จะมีกาวประสานที่ค่าการละลายน้ำสูง เช่น กาวน้ำใส และกาวลาเท็กซ์ จะทำให้ค่าการดูดซับน้ำสูงด้วยซึ่งต่างจากกาวยางพาราที่มีโครงสร้างของกาวเป็นแบบสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งไม่มีขั้วทำให้ค่าการละลายน้ำน้อย ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำน้อยเช่นกัน

5.1.3 การศึกษาการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว พบว่ากาวยางพาราเป็นตัวช่วยเสริมแรงให้กับเส้นใยทำให้โครงสร้างแข็งแรง จึงทำให้กาวยางพาราสามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุดในทางกลับกันกาวผงมีโครงสร้างที่แยกเป็นกลุ่มก้อน ทำให้รับน้ำหนักได้น้อยที่สุด

5.1.4 การศึกษาลักษณะของการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและกาวประสานจากภาพ SEM จากรูปสังเกตได้ว่ากาวผง กาวยางบง กาวน้ำใสรวมตัวจับกันเป็นก้อนกาวอยู่ระหว่างเส้นใย หรือบนเส้นใย ส่วนกาวยางพารา และกาวลาเท็กซ์ ลักษณะกาวจะเคลือบบนเส้นใยและเชื่อมประสานเส้นใยได้ดี ไยมะพร้าวเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยไม่ต่อเนื่องที่กระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ โดยกาวประสานจะทำหน้าที่ในการเสริมแรงเกิดการยึดติดระหว่าง matrix ไยมะพร้าว

5.1.5 การศึกษาการรับแรงกด ค่าความแข็งแรง HV ของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว พบว่ากาวยางพารามีความแข็งแรงมากที่สุดเนื่องจากสามารถรับแรงกดได้สูงสุด แต่มีการเปลี่ยนรูปร่าง (Displacement) น้อยที่สุด

5.1.6 การศึกษาสมบัติทางเคมีจากผล FTIR spectra ของไยมะพร้าว กาวยางพารา และแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากกาวยางพารา พบว่ากาวยางพารายังคงองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดิมและทำหน้าที่ประสานระหว่างเส้นใยมะพร้าว และพบพิคในส่วนความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลสของไยมะพร้าวหลังการเตรียมเป็นแผ่นลอยน้ำพุงพีช

5.1.7 การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว และการเกิดเชื้อรา เป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่ากาวยางพาราย่อยสลายได้ช้าที่สุดในขณะที่กาวยางบงย่อยสลายได้ไวมาก เนื่องจากสมบัติการละลายน้ำของชนิดกาวประสานมีผลต่อการแพร่ผ่านของน้ำซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดความชื้นเหมาะกับการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เป็นตัวย่อยสลายแผ่นลอยน้ำพุงพีช

5.1.8 การศึกษาผลของความดันในการอัดแผ่นที่ 50, 70, 90 และ 100 kg/cm<sup>2</sup> ต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นลอยน้ำพยางพีช สรุปได้ว่าความดันในการอัดแผ่นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และระยะการเปลี่ยนรูป (Displacement) ของแผ่นลอยน้ำพยางพีช แต่ส่งผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำ ค่าการรับน้ำหนัก ค่า Max force และ ความแข็งแรง HV ของแผ่นลอยน้ำ กล่าวคือค่าดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำแผ่นลอยน้ำพยางพีชไปใช้กับน้ำเสียจริงในบ่อบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมต่อไป

## 5.3 ข้อควรระวัง

5.3.1 การขึ้นรูปแผ่นลอยพยางพีชควรตัดเส้นใยให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถปั่นกวนผสมเข้ากับประสานได้อย่างทั่วถึง

5.3.2 ควรทำการอบแห้งแผ่นลอยน้ำพยางพีชเพื่อไล่ความชื้น และเชื้อรา

5.3.3 การอัดแผ่นควรตรวจสอบว่าแผ่นแห้งสนิทหรือไม่เนื่องจากหากแผ่นแห้งไม่สนิทแล้วนำไปอัดโดยใช้ความร้อนจะทำให้ไปติดกับตัวเครื่องอัดได้

5.3.4 แผ่นลอยน้ำพยางพีชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียควรมีขนาดใหญ่ และกว่าแผ่นที่นำไปทดสอบกายภาพเพื่อให้แผ่นสามารถรับน้ำหนักของพีชได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุชนรา ตาลกุล คัสเซอร์. 2562. “เมื่อแหล่งน้ำกลายเป็นสีเขียว : การจัดการฟอสฟอรัสและการฟื้นฟูแหล่งน้ำจืด”. *วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม*. 15, 1 (มิถุนายน): 106-107.
- [2] ศุภพิชญ์ ชัยภัทรกุล. ม.ป.ป. “การวางแผนและดำเนินการเพื่อแก้ไขสถานการณ์การเกิดปัญหาสาหร่ายสีเขียว Algae bloom ในแหล่งน้ำชุมชนหมู่บ้านเคหะธานี 4 พื้นที่เขตสะพานสูง”. *ผลงานประกอบพิจารณาประเมินบุคคลเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์*. หน้า 1-2.
- [3] กฤษณะ จิรสารสวัสดิ์. ม.ป.ป. *การศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์โดยการตัดยอดพืช*. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- [4] พงศธร กองแก้ว และ ธาณินทร์ รัชโพธิ์. 2558. *การศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของพลาสติกเสริมแรงด้วยใยกาบกล้วยน้ำว้าและใยมะพร้าว*. ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- [5] กิจชัย จิตขจรวานิช. 2549. "กาว". *วารสารวิชาการ*. หน้า 94-110.
- [6] Fred S. Lubnow. 2014. "Using Floating Wetland Islands to Reduce Nutrient Concentrations in Lake Ecosystems. *National Wetlands Newsletter*. 36, 6
- [7] "floating wetlands" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://capecodgreenguide.wordpress.com/floating-wetlands/> (วันที่สืบค้น 6 พฤษภาคม 2565)
- [8] ธรรมนูญ ราชเดิม. 2560. *การศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบระบบท่อประปาโดยใช้ท่อพีวีซีและท่อพีพีอาร์ในโครงการโรงเรียนนานาชาติคอนคอร์เดีย*. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
- [9] "ท่อประปา SCG" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.homepro.co.th/p/1160720> (วันที่สืบค้น 6 พฤษภาคม 2565)
- [10] ขนิษฐา เจริญลาภ. 2555. *ประสิทธิภาพของระบบสวนพืชลอยน้ำในการบำบัดน้ำทิ้งจากการฟอกย้อม*. ปรินูญานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [11] "ตาข่ายพลาสติก : Plastic Net" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://kongsawat.com/products/plastic-net/> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [12] "การใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำเสียได้อย่างไร" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://lddmordin.ddd.go.th/web/data/Tank\\_Conservation/C\\_4.pdf](http://lddmordin.ddd.go.th/web/data/Tank_Conservation/C_4.pdf) (วันที่สืบค้น 6 พฤษภาคม 2565)

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] "Leo Net ตาข่ายพลาสติก" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://globalhouse.co.th/product/detail/052001074935> (วันที่สืบค้น 6 พฤษภาคม 2565)
- [14] เสริมศักดิ์ อาษา และ ทัดพรคุณ ประดิษฐ์. ม.ป.ป. **ผลของเวลากักเก็บ พื้นที่ และฤดูกาลในการกำจัดไนโตรเจนรวมและอโรฟอสเฟตในระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ชนิดเกาะลอยน้ำ**. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย (adiCET) มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
- [15] "การนำขยะกลับมาใช้ใหม่ (Reduce Reuse and Recycle: 3Rs)" 2562. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.srakrajom.go.th/home>. (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [16] "โฟม สำหรับงานอุตสาหกรรม" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [https://th.misumi-ec.com/th/pr/recommend\\_category/foam\\_material201907/](https://th.misumi-ec.com/th/pr/recommend_category/foam_material201907/) (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [17] "PE, PP, PVC, PS และ PU โฟมที่ดีที่สุด" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://m.th.cgdy.com/info/pe-pp-pvc-ps-and-pu-foam-who-is-best-24313868.html> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [18] "พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://119.46.166.126/self\\_all/selfaccess12/m6/703/more/07.php](http://119.46.166.126/self_all/selfaccess12/m6/703/more/07.php) (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [19] "Polyurethane คืออะไร คุณสมบัติ ข้อดี-ข้อเสีย และการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://tonghengplastic.com/polyurethane/> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [20] "พอลิยูรีเทนโฟม" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://ยางยูรีเทน.com/th/articles/15353>  
 0-พอลิยูรีเทน-/-pu-foam (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [21] "พลาสติกในชีวิตประจำวัน ตอนที่ 4 พอลิเอทิลีน" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=14> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [22] Momina Yasin, Muhammad Tauseef, Zaniab Zafar, Moazur Rahman, Ejazul Islam, Samina Iqbal, and Muhammad Afzal. 2021. " Plant-Microbe Synergism in Floating Treatment Wetlands for the Enhanced Removal of Sodium Dodecyl Sulphate from Water" **Sustainability**. n.d: 28-83.
- [23] ลลีนี ทับทิมทอง และ มณฑล ฐานุตตมวงศ์. 2554. **การบำบัดน้ำเสียจากหอพักนิติตด้วยระบบบึงประดิษฐ์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] ปัญจปัทมพร บัญพร้อม. ม.ป.ป. "การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติโดยระบบบึงประดิษฐ์". คณะสาธารณสุขศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ วิทยาลัยนครราชสีมา วิทยาการกรุงเทพฯ.
- [25] "การจัดการน้ำเสียครัวเรือนอย่างง่ายด้วยบึงประดิษฐ์" 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://oopm.rid.go.th/subordinate/opm11/report/2556/wetland.aspx> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [26] พันธุ์ชิตา ปิงชัย และ ศุวศา กานตวนิชกูร. ม.ป.ป. "การกำจัดโครเมียมโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวในแนวตั้ง "การประชุมวิชาการ" ครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- [27] "กฐูปฤณี" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/ฐูปฤณี> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [28] "18 สรรพคุณและประโยชน์ของต้นฐูปฤณี (กกช้าง)" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://medthai.com/ฐูปฤณี/> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [29] "พุทธรักษา (Canna/Canna Lily)" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.premiumseedshop.com/category/297/ไม้ดอก-ไม้ประดับ-flowers/หมวดดอก-ผ-พ-ฟ/พุทธรักษา-canna-canna-lily> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [30] ปรีดี เอกะวิภาต. 2525. "พุทธรักษา" วารสารพืชสวน. ปีที่ 17, ฉบับที่ 2: หน้า 11-27
- [31] "40 ไอเดียจัดสวนด้วยต้นพุทธรักษา เสริมสร้างความมงคลในบ้าน" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.khonlukbaan.com/40-ไอเดีย-จัดสวนด้วย-ต้นดอก/> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [32] มณีรัตน์ หวังวิบูลย์กิจ. 2561 "อนุกรมวิธานของพืชน้ำสกุล Echinodorus ในประเทศไทย" วารสารการประมงอิเล็กทรอนิกส์. 1, 1 (มกราคม-มีนาคม): 75-96.
- [33] ชรินทร์ กรผึ้ง, ประนิดดา เพ็งจิว, เขมณีจรรย์ สาริพันธ์ และ อุไรลักษณ์ พงษ์เกษ. ม.ป.ป. การบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์โดยใช้บัวเมซอน. ปริญญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.
- [34] "หญ้าแฝก สรรพคุณและประโยชน์ของหญ้าแฝกหอม 20 ข้อ และการปลูก" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://charoensinhos.go.th/2017/04/10/หญ้าแฝก-สรรพคุณและคุณประโยชน์/> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [35] กิตติมา ศิวอาทิตย์กุล. 2558. "การบริหารจัดการการใช้หญ้าแฝกอย่างยั่งยืน" กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 1 (กรกฎาคม): หน้า 10-16.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [36] ภัทรพร ครุฑสุธา, อติทัศน์ เอี่ยมรักษา และ ศกุนิตา ธีรชัยเกื้อกุล. 2561. **การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ สิ่งแวดล้อมจากวัสดุคอมโพสิตเส้นใยผักตบชวาแกลบและใยมะพร้าวสำหรับการรักษา อุณหภูมิ.** ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [37] “ศึกษาสมบัติวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิกเพื่อใช้เป็น วัสดุทำใบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้า” ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2558/2558240240238.pdf> (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [38] ธีรภัทร์ สุภานิล. 2558. **การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีผ้าทอ จากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะ วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [39] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ 2558. **หนังสือวัสดุวิศวกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [40] อุไรวรรณ สุขยัง, จุฑาทิพย์ อัจฉมณี และ สุรเดช มัจฉาเวช. 2562. **กาวไม้จากยางรีเคลม กราฟต์มาลิกแอนดไฮโดรผสมยางธรรมชาติอิพอกไซด์.** ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- [41] สุนิสา สุชาติ และ วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ. 2551. **การเตรียมกาวจากน้ำยางธรรมชาติเพื่อใช้ สำหรับงานไม้ยางพารา.** ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [42] ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง, มาริสา จินะประดิษฐ์, วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์, สุรัตน์ บุญพึ้ง, จิรพล กลิ่นบุญ, ไชยยันต์ ไชยยะ และฉันทมณี วงสะจันทานนท์. 2548. **กระดาษต้นไม้ออกจากวัสดุ เหลือใช้ทางการเกษตร.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [43] "สมุนไพอดีดี" 2564. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.samunpidede.com/product/65/ผงเปลือก-100-ขนาด-1-Kg> (วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2565)
- [44] "ยางพารา" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.trueplookpanya.com/blog/content/63889/-edu-agr-agr-> (วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2565)
- [45] "ยางไทย" 2557. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://hrang-trang.blogspot.com/p/blog-page\\_7116.html](http://hrang-trang.blogspot.com/p/blog-page_7116.html) (วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2565)
- [46] "กาวลาเท็กซ์" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://scpaperbox.blogspot.com/2013/10/blog-post\\_1584.html](http://scpaperbox.blogspot.com/2013/10/blog-post_1584.html) (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [47] "กาวลาเท็กซ์ทั่วไป TOA 32 ออนซ์ สีขาว" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.homepro.co.th/p/22519> (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [48] ทรงกฏ อุดรธา. ม.ป.ป. **วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.
- [49] "กาวน้ำ" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.officemate.co.th/th/office-supplies/glue-tape-packing-equipment/liquid-glue> (วันที่สืบค้น 21 เมษายน 2565)
- [50] "กาวน้ำ" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaiwatsadu.com/th/search?srtc> (วันที่สืบค้น 21 เมษายน 2565)
- [51] "กาวน้ำ" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.officemate.co.th/th/office-supplies/glue-tape-packing-equipment/liquid-glue> (วันที่สืบค้น 21 เมษายน 2565)
- [52] "กาวอีพ็อกซี" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.homepro.co.th/c/TOO0701>. (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [53] "Epoxy รู้จักกันดีแล้วหรือยัง" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://www.kru-aor.com/Chem\\_Tips/epoxy.html](http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html). (วันที่สืบค้น 18 เมษายน 2565)
- [54] "ซิลิโคนหรือยาแนว คืออะไร" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.kachathailand.com/articles>. (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [55] "ซิลิโคนคุณภาพสูงชนิดเป็นกลางสำหรับงานติดตั้งแผ่นเมทัลชีทและแผ่นโปรงแสง" 2562 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://www.kru-aor.com/Chem\\_Tips/epoxy.html](http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html). (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [56] "กาวอะคริลิก" 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.cementhaihomemart.com/repair-work/silicone-grout-grue/bosny-b212-black.html>. (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [57] "กาวอะคริลิกชนิดต่างๆ มีอะไรบ้าง" ม.ป.ป. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.netinbag.com/th/manufacturing/what-are-the-different-types-of-acrylicadhesive.html?fbc>. (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [58] "กาวผงร็อควูด" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.homepro.co.th/p/288945> (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [59] "กาวผงร็อควูด" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaicarpenter.com>. (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)
- [60] "กาวสำหรับงานไม้" ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://rubber.oie.go.th/box/ELib\\_Document/](http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/). (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2565)

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [61] มาศิริ โกศลกิจวงศ์. 2555. การปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมพอสิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมใยมะพร้าวสำหรับการเพาะชำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [62] กษิดิส รัตนภรณ์. 2562. การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยมะพร้าวอ่อนด้วยเอนไซม์เซลลูเลสเพื่อการผลิตเส้นด้าย. วิทยานิพนธ์คหกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [63] อนุรักษ์ถา จันทิมา. ม.ป.ป. “หน่วยที่ 2 สถิติศาสตร์ของของไหล” เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการไหลของของไหล. 1, 7-21.
- [64] Gustavo Stolzenberg Colares, Naira Dell’Osbel, Carolina V. Barbosa, Carlos Lutterbeck, Gislayne A. Oliveira, Lucia R. Rodrigues, Carlos P. Bergmann, Diosnel Rodriguez Lopez, Adriane Lawisch Rodriguez, Jan Vymazal and Enio L. Machado. 2021. "Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation" **Science of the Total Environment**. 776: 142474.
- [65] Katy Chapman and Jennifer Boucher. 2020. "Phosphorus phytoremediation using selected wetland plants in constructed floating mats". **Original Article**. 10-147.
- [66] Lauren M. Garcia Chance, Sarah C. Van Brunt, John C. Majsztrik and Sarah A. White. 2019. "Short- and long-term dynamics of nutrient removal in floating treatment wetlands" **Water Reserch**. 159: 153-163.
- [67] João Alexandre Saviolo Ostia, Clovis Ferreira do Carmo, Marcos Aureliano Silva Cerqueira, Maria Teresa Duarte Giamas, Ana Carolina Peixoto, André Martins Vaz-dos-Santos, Cacilda Thais Janson Mercante. 2020. "Nitrogen and phosphorus removal from fish farming effluents using artificial floating islands colonized by *Eichhornia crassipes*." **Aquaculture Reports** 17:100324
- [68] Mark T. Brown, Treavor Boyer a, R.J. Sindelar, Sam Arden a, Amar Persaud and Sherry Brandt-Williams. 2018. "A Floating Island Treatment System for the Removal of Phosphorus from Surface Waters" **Engineering**. 4: 597-609.
- [69] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2543. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: บริษัท แชน.อี 68 แล็บ จำกัด.



### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [70] ณปภัช รุ่งรัตน์มณีมาศ. 2562. การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในร้านสะดวกซื้อ. ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต. วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- [71] Yusheng Shi, Chunze Yan, Yan Zhou, Jiamin Wu, Yan Wang, Shengfu Yu, Ying Chen. 2021. " Chapter 4 - Polymer material for additive manufacturing–filament materials" **Materials for Additive Manufacturing**. 361-401.
- [72] Yong-Ho Kim, Chol-Yi Om, Yong-Su Hwang and Yong-Bom Hong. 2020 " Adhesive properties of water-soluble and biodegradable hot-melt adhesive based on partially saponified poly (vinyl acetate)" **Materials Reserch Express**. 121-403.
- [73] Viola Hospodarova, Eva Singovszka, Nadezda Stevulova. 2018 “Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials” **American Journal of Analytical Chemistry**. Vol.9 No.6; 303-310.
- [74] Dongmei Chen, Huafeng Shao, Wei Yao, and Baochen Huang. 2013 “Fourier Transform Infrared Spectral Analysis of Polyisoprene of a Different Microstructure” **International Journal of Polymer Science**. Article ID 937285; 1-5.

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การเตรียมแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

ก.1 ปริมาณเส้นใยที่ศึกษา (ปริมาณไยมะพร้าว 30 g และ กาวประสาน 30 g/น้ำ 200 g)



รูปที่ ก.1 ปริมาณเส้นใยที่ศึกษา (ก) 30 g (ข) 40 g (ค) 50 g

ก.1.1 การหาความเข้มข้นของกาวสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \text{ไยมะพร้าว } 30 \text{ g} & C_1V_1 &= C_2V_2 \\
 V_2 &= \text{น้ำปริมาณ } 200 \text{ ml} & 30 \times 100 &= C_2 \times 200 \\
 & & C_2 &= \frac{30 \times 100}{200} \\
 & & C_2 &= 15 \%
 \end{aligned}$$

ก.1.2 หาความเข้มข้นของกาวสำหรับทดสอบการบำบัดน้ำเสีย

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \text{ไยมะพร้าว } 200 \text{ g} & C_1V_1 &= C_2V_2 \\
 V_2 &= \text{น้ำปริมาณ } 1,000 \text{ ml} & 200 \times 100 &= C_2 \times 1,000 \\
 & & C_2 &= \frac{200 \times 100}{1,000} \\
 & & C_2 &= 15 \%
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

การทดสอบทางกายภาพหาค่า ความหนาแน่นรวม ร้อยละการดูดซับน้ำ การรับน้ำหนัก ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว

ข.1 การคำนวณหาความหนาแน่นรวมของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากไยมะพร้าว โดยผลการคำนวณดังตารางที่ ข.1-ข.2

$$\text{จาก } \rho ; (\text{g/cm}^3) = \frac{m}{v}$$

เมื่อ  $m =$  น้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพีช

$V =$  ปริมาตรแผ่นลอยน้ำพุงพีช กว้าง 25.5 cm × ยาว 17.5 cm × สูง 0.4 cm = 178.5 cm<sup>3</sup>  
ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นรวมของแผ่นลอยน้ำชนิดกาวน้ำใส ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ ข.1-ข.2

$$\text{แผ่นที่ 1 } \rho ; (\text{g/cm}^3) = \frac{35.1210}{178.5} \text{ g/cm}^3 = 0.1968 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{แผ่นที่ 2 } \rho ; (\text{g/cm}^3) = \frac{37.0921}{178.5} \text{ g/cm}^3 = 0.2078 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{แผ่นที่ 3 } \rho ; (\text{g/cm}^3) = \frac{35.7301}{178.5} \text{ g/cm}^3 = 0.2002 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g/cm}^3) = \frac{0.1968 + 0.2078 + 0.2002}{3} = 0.2016 \text{ g/cm}^3$$

ตารางที่ ข.1 ผลความหนาแน่นรวมและน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด

ชนิดกาว ประสาน	น้ำหนัก (g)			ค่าเฉลี่ย น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่นรวม ( $\rho$ ) หน่วย (g/cm <sup>3</sup> )			ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่นรวม (g/cm <sup>3</sup> )
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	
กาวน้ำใส	35.1210	37.0921	35.7301	35.9811	0.1968	0.2078	0.2002	0.2016
กาวลา เท็กซ์	38.2731	40.9302	39.6643	39.6225	0.2144	0.2293	0.2222	0.2219
กาวยางบง	36.6328	34.7144	34.6001	35.3158	0.2052	0.1945	0.1938	0.1978
กาว ยางพารา	61.9922	63.5427	69.4802	65.0050	0.3473	0.3560	0.3892	0.3642
กาวผง	94.2101	82.4134	74.9811	83.8682	0.5278	0.4617	0.4201	0.4699

ตารางที่ ข.2 ผลความหนาแน่นรวมและน้ำหนักที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอยน้ำพุงพีช

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (g)			ค่าเฉลี่ย น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่นรวม (ρ) หน่วย (g/cm <sup>3</sup> )			ค่าเฉลี่ย ความ หนาแน่น รวม (g/cm <sup>3</sup> )
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3		แผ่นที่1	แผ่นที่2	แผ่นที่3	
50	46.90	58.96	40.41	48.7567	0.2627	0.3303	0.2264	0.2731
70	43.59	42.95	51.56	46.0333	0.2442	0.2406	0.2889	0.2579
90	45.94	46.33	47.66	46.6433	0.2574	0.2596	0.2670	0.2613
100	48.33	43.92	45.17	45.8067	0.2708	0.2461	0.2531	0.2566

ข.2การคำนวณหาร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีชจากใยมะพร้าว โดยผลการคำนวณดัง  
ตารางที่ ข.3 และ ข.5 พร้อมภาพลักษณะการแช่น้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีช

$$\text{จาก } \% \text{ การดูดซับน้ำ} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100$$

เมื่อ  $W_{\text{dry}}$  คือ น้ำหนักแผ่นลอยน้ำพุงพีชก่อนแช่  
 $W_{\text{wet}}$  คือ น้ำหนักแผ่นลอยน้ำพุงพีชหลังแช่  
 ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำชนิดกาวน้ำใส

แผ่นที่ 1 % การดูดซับน้ำ =  $\frac{25.00 \times 2.93}{2.93} \times 100 = 753.24\%$

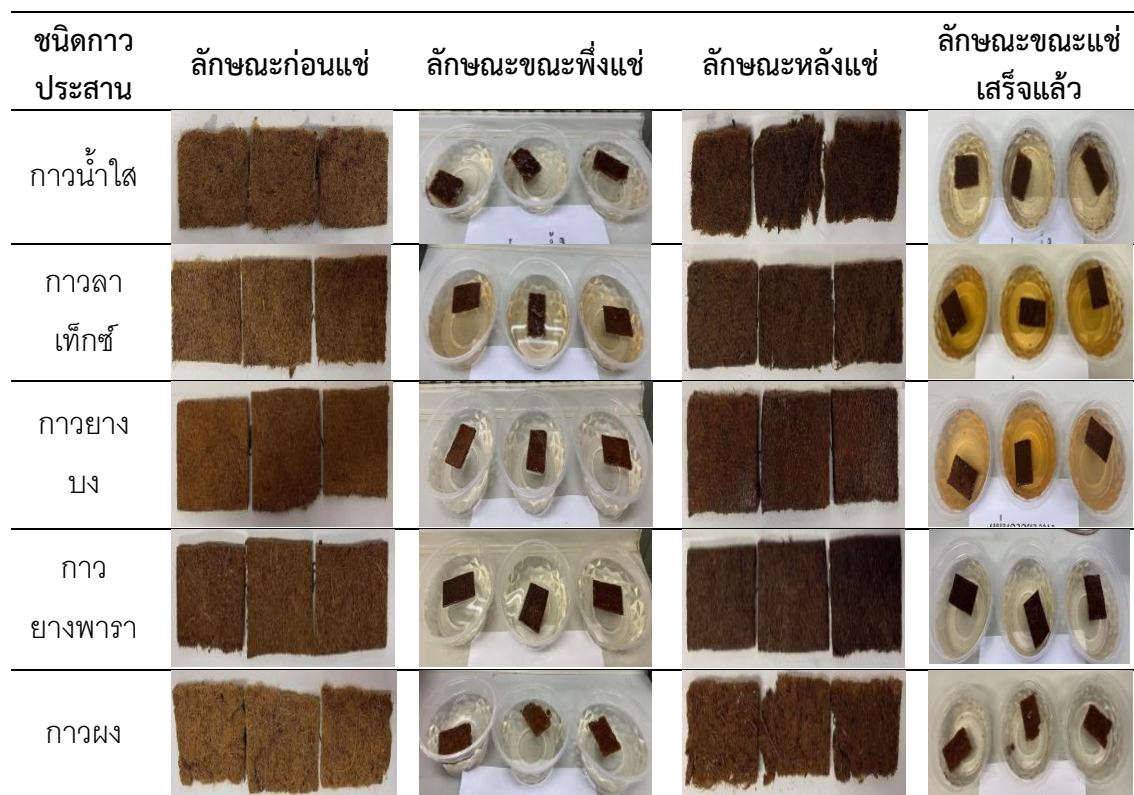
แผ่นที่ 2 % การดูดซับน้ำ =  $\frac{25.23 \times 2.84}{2.84} \times 100 = 788.38\%$

แผ่นที่ 3 % การดูดซับน้ำ =  $\frac{23.52 \times 2.99}{2.99} \times 100 = 686.62\%$

ตารางที่ ข.3 ผลร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพีชที่ใช้กาวแต่ละชนิด

ชนิดกาว ประสาน	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (W <sub>dry</sub> )			น้ำหนักหลังแช่น้ำ โดยไม่ซับน้ำ (W <sub>wet</sub> )			% การดูดซับน้ำ		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
กาวน้ำใส	2.93	2.84	2.99	25.00	25.23	23.52	753.24	788.38	686.62
กาวลาเท็กซ์	1.44	2.11	2.04	14.05	12.49	11.93	875.69	491.94	484.80
กาวยางบง	4.98	3.99	3.02	14.54	19.83	11.09	191.97	396.99	267.22
กาวยางพารา	5.41	5.12	4.50	16.61	15.15	13.34	207.02	195.90	196.44
กาวผง	5.98	6.48	6.58	23.81	23.77	20.11	298.16	266.82	205.62

ตารางที่ ข.4 ลักษณะก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำในการทดสอบร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นลอยน้ำพุงพืชที่ใช้กาวแต่ละชนิด



ตารางที่ ข.5 ผลร้อยละการดูดซับน้ำที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอยน้ำพุงพืช

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ ( $W_{dry}$ )			น้ำหนักหลังแช่น้ำ โดยไม่ซับน้ำ ( $W_{wet}$ )			% การดูดซับน้ำ		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3
	50	5.2473	4.2005	5.1377	15.3663	17.7610	13.2200	192.84	322.83
70	3.4594	3.4184	3.0745	9.1750	10.8799	10.6461	165.22	218.27	246.27
90	2.6031	3.2932	2.6813	10.8368	9.7164	13.9369	316.30	195.04	419.78
100	2.9587	2.9486	2.9738	14.0875	14.7266	15.3625	376.14	399.44	416.59

ตารางที่ ข.6 ลักษณะก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำในการทดสอบร้อยละการดูดซับน้ำความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอยน้ำพองพีซี

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	ลักษณะก่อนแช่	ลักษณะขณะ พองแช่	ลักษณะหลังแช่	ลักษณะขณะแช่ เสร็จแล้ว
50				
70				
90				
100				

ข.3 การคำนวณหาการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพองพีซีจากโয়มะพร้าว โดยผลการคำนวณ ดังตารางที่ ข.7-ข.8

ตัวอย่างการคำนวณหาการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำชนิดกาวน้ำใส

$$\text{ค่าเฉลี่ยการรับน้ำหนัก} = \frac{130 + 120 + 110}{3} = 120 \text{ g}$$

ตารางที่ ข.7 ผลการรับน้ำหนักของแผ่นลอยน้ำพองพีซีที่ใช้กาวแต่ละชนิด

ชนิดกาว ประสาน	น้ำหนักดินน้ำมัน (g)		ผลรวมน้ำหนักที่จมพอดิ (g)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จม พอดิ (g)
	50	10		
กาวน้ำใส				
แผ่นที่ 1	1 ลูก	8 ลูก	130	120
แผ่นที่ 2	1 ลูก	7 ลูก	120	
แผ่นที่ 3	1 ลูก	6 ลูก	110	
กาวลาเท็กซ์				
แผ่นที่ 1	1 ลูก	12 ลูก	120	110
แผ่นที่ 2	1 ลูก	10 ลูก	100	
แผ่นที่ 3	1 ลูก	11 ลูก	110	

กาวยางบง				
แผ่นที่ 1	1 ลูก	9 ลูก	140	
แผ่นที่ 2	1 ลูก	10 ลูก	150	146.67
แผ่นที่ 3	1 ลูก	10 ลูก	150	
กาวยางพารา				
แผ่นที่ 1	1 ลูก	21 ลูก	260	
แผ่นที่ 2	1 ลูก	23 ลูก	280	276.67
แผ่นที่ 3	1 ลูก	24 ลูก	290	
กาวผง				
แผ่นที่ 1	1 ลูก	5 ลูก	50	
แผ่นที่ 2	1 ลูก	4 ลูก	40	46.67
แผ่นที่ 3	1 ลูก	5 ลูก	50	

ตารางที่ ข.8 ผลการรับน้ำหนักที่ความดันค่าต่างๆ ในการอัดแผ่นลอยน้ำพุงพีช

ความดัน (Kg/cm <sup>2</sup> )	น้ำหนักดินน้ำมัน (g)		ผลรวมน้ำหนักที่จมพอดี้ (g)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่จมพอดี้ (g)
	50	10		
50	1 ลูก	21 ลูก	260	
	1 ลูก	21 ลูก	260	263.33
	1 ลูก	22 ลูก	270	
70	1 ลูก	25 ลูก	300	
	1 ลูก	26 ลูก	310	300.00
	1 ลูก	24 ลูก	290	
90	1 ลูก	27 ลูก	320	
	1 ลูก	30 ลูก	350	336.67
	1 ลูก	29 ลูก	340	
100	1 ลูก	33 ลูก	380	
	1 ลูก	33 ลูก	370	380.00
	1 ลูก	34 ลูก	390	



ข.4 การคำนวณหาความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของแผ่นลอยน้ำพองพีชจากไยมะพร้าว โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น WDW-20

ตัวอย่างการคำนวณหาความแข็งแรงวิกเกอร์ของแผ่นลอยน้ำชนิดกาวน้ำใส

$$\text{Vicker Hardness} = \frac{1.854 \times 0.019}{(19.737)^2} = 4.75 \times 10^{-5} \text{ KN/nm}^2$$

## ประวัติผู้เขียน

รองศาสตราจารย์ ดร. ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์  
Chantamane Poonjarernsilp, D.Eng.



## ข้อมูลเพื่อการติดต่อ

ที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

หมายเลขโทรศัพท์ 02 287 9600 ต่อ 2474 และ 2475

หมายเลขโทรศัพท์มือถือ 089 928 4256

e-mail: chantamane.w@mail.rmutk.ac.th, chantamane2001@gmail.com

## ประวัติการทำงาน

ปัจจุบัน – พ.ย. 2561 รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

2561 - ธ.ค. 2557 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

2557 – มิ.ย. 2548 อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2548 - มิ.ย. 2542 อาจารย์สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีเคมี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ

## ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	ปีที่จบการศึกษา	ชื่อหลักสูตรที่จบการศึกษา	สาขาที่จบการศึกษา	สถาบันที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก	2553	วศ.ด.	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปริญญาโท	2548	วศ.ม.	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปริญญาตรี	2542	วท.บ.	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

## ผลงานดีเด่น

- (1) นักวิจัยดีเด่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ประจำปี 2559
- (2) ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก ระหว่างปี พ.ศ. 2555 – 2557: A fellowship under the "FY 2012 JSPS Postdoctoral Fellowship for Foreign Researchers" at Kyoto University, 2012 - 2014.